

JULIHERME FRANCISCO PIFFER

**Estudo Acústico de Tubos de Dimensões Idênticas e Materiais
Diferentes utilizando Bocais de Flauta Doce e Flauta Transversal**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Física da UFES para
obtenção do título de Mestre em Física

Área de Concentração: Física

Orientador:

Prof. Humberto Belich Junior

Vitória

2011

Dissertação intitulada "Estudo Acústico de Tubos de Dimensões Idênticas e Materiais Diferentes utilizando Bocais de Flauta Doce e Flauta Transversal", de autoria do mestrando Julherme Francisco Piffer, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Humberto Belich Junior - Orientador

Prof. Dr. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando

Prof. Dr. Marcos Antonio dos Santos

Prof. Dr. Hidetoshi Takiishi

Vitória, 19 de agosto de 2011

Av. Fernando Ferrari 514 - Campus Goiabeiras, CEP: 29075-910 - Vitória - Espírito Santo - Brasil

Tel. : (+55-27) 4009-2833 - Fax : (+55-27) 4009-2823

À quem contribua para a construção de uma sociedade livre, igualitária, holista e integrada à Natureza.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e a minha família pelo apoio, paciência e compreensão;

Ao Prof. Dr. Humberto Belich Junior pela orientação e pelas dicas de apresentação;

Ao Prof. Dr. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando pela orientação; por ter possibilitado este trabalho e por ter dado suporte às interpretações realizadas;

Ao Prof. Dr. Hidetoshi Takiishi pelas correções, ideias e sugestões;

Ao Sr. Nelson José Aissum, Nivaldo Gulmini e à empresa Novatref Trefilados de Precisão Ltda. por terem produzido e fornecido todos os tubos utilizados neste trabalho;

Ao Prof. Dr. Leonardo Fuks por ter produzido e fornecido o bocal de flauta transversal utilizado neste trabalho e, também, pelas ideias e sugestões;

Às flautistas Letir Silva de Souza e Nara Franca Rodrigues pela participação;

Ao Prof. Dr. Regis Rossi Alves Faria pelo apoio e inspiração;

Ao Prof. Dr. Alfredo Akira Ohnuma Júnior pelo apoio e amizade;

Ao Prof. Dr. Wilson Correia Pinto de Aragão Filho pelas melhorias realizadas no resumo em português e principalmente no resumo em Esperanto;

Aos desenvolvedores dos programas utilizados neste trabalho: LibreOffice, Fityk [M. Wojdyr, J. Appl. Cryst. 43, 1126 (2010)] e SpectraPLUS;

À Universidade Federal do Espírito Santo e por toda sua estrutura;

Ao CNPq por ter financiado este projeto.

RESUMO

Mesmo que cientistas tenham demonstrado, até agora, que os materiais utilizados na construção de flautas pouco interferem em suas respectivas características sonoras, parece que algo ainda está em aberto, pois diversos músicos ainda insistem no fato de que o material utilizado na construção de flautas influencia de forma significativa o som produzido. Assim, na busca por resultados que possam contribuir nessa discussão, foi realizado um estudo acústico com três pares de tubos de dimensões idênticas, sendo dois de alumínio, dois de cobre e dois de latão, com o propósito de comparar seus respectivos sons harmônicos em três experiências semelhantes: (Experiência 1) tubos acoplados a um bocal de flauta doce, contralto, da marca Yamaha, tocadas por um flautista; (Experiência 2) tubos acoplados a um bocal de flauta transversal, em fibra de carbono, especialmente construído para este trabalho, tocadas por outro flautista; (Experiência 3) tubos acoplados ao mesmo bocal de flauta doce, contralto, da marca Yamaha, tocadas por um soprador artificial alimentado por um cilindro de gás nitrogênio (99,9% de pureza) com fluxo controlado e contínuo. Três sinais de áudio foram capturados por cada tubo em cada experiência, totalizando 54 medidas, ao passo que, após uma seleção dos dados, visando à eliminação de parâmetros, apenas os dados com fluxo de 2 litros/min da Experiência 3 (6 medidas) foram tratados e analisados devido à sua melhor qualidade, melhor estabilidade e maior precisão em relação aos dados obtidos nas Experiências 1 e 2. Desta forma, constatou-se que o som fundamental e os dois primeiros sons harmônicos emitidos por cada tubo são os fatores que determinam o perfil do som emitido pelas flautas utilizadas neste trabalho. A partir de uma análise mais detalhada da distribuição das frequências ajustadas com Lorentzianas, verificou-se que a FWHM (largura a meia altura) de tais fatores determina a característica sonora de cada um dos metais utilizados. Além disso, verificou-se que, a partir das experiências realizadas com parâmetros fixos (temperatura, umidade do ar, fluxo de gás, tipo de gás, geometria e dimensões dos bocais e dos tubos), somente o tipo de material é o fator que determina o perfil do som produzido pelas flautas utilizadas neste trabalho.

ABSTRACT

Even though scientists have shown so far that the materials used in the construction of flutes has little interference in their respective sound characteristics, it seems that there is more to be discussed, because many musicians still insist that the material used in the construction of flutes influences significantly the sound produced. Thus, aiming to search for results that can contribute in this discussion, an acoustic study was carried out with three pairs of tubes of identical dimensions, being two of them made of aluminum, two made of copper and two made of brass. The purpose of the study was to compare their respective harmonics sounds in three similar experiments: (Experiment 1) tubes coupled to a treble (alto) recorder mouthpiece, Yamaha branded, played by a flute player; (Experiment 2) tubes coupled to a transverse flute mouthpiece, in carbon fiber, specially built for this study, played by another flutist; (Experiment 3) tubes coupled to the same treble (alto) recorder mouthpiece, Yamaha branded, played by an artificial blower powered by a cylinder of nitrogen gas (99.9% of purity) with a controlled and continuous flow. Three audio signals were captured from each tube in each experiment, on a total of 54 measures. After data selection, in order to exclude parameters, only data with 2 liters/min of flow from Experiment 3 (6 measures) was processed and analyzed due to its best quality, best stability and greater accuracy in relation to data obtained in Experiments 1 and 2. Thus, it was observed that the fundamental sound and the first two harmonics sounds emitted by each tube were the factors that determined the profile of the sound emitted by the flutes used in this work. From a more detailed analysis of the frequency distribution adjusted with Lorentzian, it was found that the FWHM (full width at half maximum) of these factors determined the sound characteristic of each of the metals used. In addition, it was found that, from the realized experiments with fixed parameters (temperature, air humidity, gas flow, gas type, geometry and dimensions of the mouthpieces and tubes), that only type of material was the only factor that determines the profile of the sound produced by the flutes used in this work.

RESUMEN

A pesar de que los científicos han demostrado previamente que los materiales utilizados en la construcción de las flautas no interfiere en sus respectivas características de sonido, parece que algo está todavía abierto, porque muchos músicos siguen insistiendo en que el material utilizado para la construcción de flautas influye significativamente en el sonido producido. Así, con el fin de buscar resultados que puedan contribuir en esta discusión, un estudio acústico se llevó a cabo con tres pares de tubos de idénticas dimensiones, siendo dos de aluminio, dos de cobre y dos de latón, con el fin de comparar sus sonidos armónicos en tres experimentos similares: (Experimento 1) tubos conectados a una boquilla de flauta dulce, alto, de la marca Yamaha, tocadas por un flautista; (Experimento 2) tubos acoplados a una boquilla de flauta transversa, en fibra de carbono, construida especialmente para esta obra, tocadas por otro flautista; (Experimento 3) tubos acoplados a la misma boquilla de flauta dulce, alto, de la marca Yamaha, tocadas por un soplador artificial accionado por un cilindro de gas de nitrógeno (99,9% de pureza) con flujo controlado y continuo. Tres señales de audio fueron capturadas de cada tubo en cada experimento, en un total de 54 medidas, mientras que, después de una selección de datos, a fin de eliminar parámetros, sólo los datos con el flujo de 2 litros/min del Experimento 3 (6 medidas) fueron procesados y analizados por su mejor calidad, mejor estabilidad y mayor precisión en relación a los datos obtenidos en los Experimentos 1 y 2. De esta forma, se constató que el sonido fundamental y los dos primeros sonidos armónicos emitidos por cada tubo fueron los factores que determinaron el perfil del sonido emitido por las flautas utilizadas en este trabajo. A partir de un análisis más detallado de la distribución de frecuencias ajustadas con Lorentzianas, se encontró que la FWHM (ancho a mitad de altura) de estos factores determinaron el sonido característico de cada uno de los metales utilizados. Además, se encontró que, a partir de las experiencias realizadas con parámetros fijos (temperatura, humedad del aire, flujo de gas, tipo de gas, geometría y dimensiones de las boquillas y tubos), sólo el tipo de material fue el factor que determinó el perfil del sonido producido por las flautas utilizadas en este trabajo.

RESUMO (*Esperanto*)

Eĉ se sciencistoj estas montritaj, ĝis nun, ke la materialoj uzitaj en la konstruado de flutoj malmulte intervenas siajn sonajn karakterojn, ŝajnas, ke io ankoraŭ estas malfermita, ĉar variaj muzikistoj ankoraŭ insistas en la fakto, ke la materialoj uzitaj en la konstruado de flutoj determinas signifoplene la produktitan sonon. Do, serĉante rezultojn, kiuj povas kontribui al ĉi tiu diskutado, sona serĉo-studo estas plenumita pri tri paroj da tuboj, kun egalaj dimensioj: Du faritaj el aluminio, du el kupro kaj du el latuno, kun la celo kompari iliajn respektivajn harmoniajn sonojn, per tri similaj eksperimentoj: (Eksperimento 1) tuboj kuplitaj al bokalo de dolĉa fluto, kontraŭta, de marko Yamaha, sonorigitaj de unu flutisto; (Eksperimento 2) tuboj kuplitaj al bokalo de transversa fluto, el karbono fibro, speciale farita por ĉi tiu laboro, sonorigitaj de alia flutisto; (Eksperimento 3): tuboj kuplitaj al la sama bokalo de dolĉa fluto, kontraŭta, de marko Yamaha, sonorigitaj de unu artefarita blovilo, nutrita per cilindro de nitrogeno gaso (99,9% de pureco) kun alfluo kontrolita kaj kontinua. Tri signaloj de aŭdio estis kaptitaj de ĉiu tubo dum ĉiu eksperimento, entute 54 mezuroj, kaj, post elekto de datumoj, cele al nuligado de parametroj, nur la datumoj kun alfluo de po 2 litroj en minuto (2 litroj/min) de la Eksperimento 3 (6 mezuroj) estas traktitaj kaj analizitaj tial, ke ili havis pli bonajn kvaliton, stabilecon kaj pli grandan precizecon kompare al la datumoj akiritaj en la Eksperimentoj 1 kaj 2. Tiel, oni konstatis, ke la fundamenta sono kaj la du unuaj harmoniaj sonoj emisiitaj per ĉiu tubo estas la faktoroj, kiuj determinas la profilon de la sono emisiita de la flutoj uzitaj en ĉi tiu laboro. Ekde analizo pli detala pri la distribuo de la frekvencoj alĝustitaj per Lorentzianoj, oni konstatis, ke la FWHM (larĝeco je duon-alteco) de tiaj faktoroj determinas la karakterojn sonajn de ĉiu el la metaloj uzitaj. Krome, oni kontrolis, ke, ekde la eksperimentoj plenumitaj kun parametroj fiksj (temperaturo, malsekeco de la aero, alfluo de gaso, tipo de gaso, geometrio kaj dimensioj de la bokaloj kaj de la tuboj), nur la tipo de la materialo estas la faktoro, kiu determinas la profilon de la sono emisiita per la flutoj uzitaj en ĉi tiu laboro.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Motivação.....	18
1.2 Objetivos.....	19
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1 Sobre a Acústica Musical.....	20
2.2 Ondas e Som.....	22
2.3 Aspectos Quantitativos de uma Onda.....	25
2.4 Modos Vibratórios e a Acústica de um Tubo.....	29
2.5 Sons Musicais.....	42
2.5.1 Intensidade Sonora.....	43
2.5.2 Alturas e Intervalos.....	45
2.5.3 Sons Harmônicos e a Séria Harmônica.....	48
2.5.4 Escala Natural e Temperada.....	52
2.5.5 A Unidade Cents (¢).....	53
2.5.6 O Timbre e o Espectro de um Som.....	54
2.6 A Flauta.....	59
2.6.1 A Flauta Doce.....	62
2.6.2 A Flauta Transversal.....	64
2.7 Influência do Material da Flauta.....	66
2.7.1 Estudos Anteriores.....	66
2.7.2 Materiais e Acústica.....	70
2.8 Análise e Processamento de Sinais.....	72
2.8.1 Representação Espectral.....	73
2.8.2 Teorema de Fourier.....	77
2.8.3 Transformada de Fourier.....	78
2.8.4 Transformada de Fourier Discreta.....	80
3 METODOLOGIA.....	83
3.1 Princípios e Critérios.....	83
3.2 Definição do Arranjo Experimental.....	84
3.3 Equipamentos e Materiais Utilizados.....	85
3.3.1 Tubos.....	86
3.3.2 Bocais.....	88

3.3.3 Soprador Artificial.....	90
3.3.4 Programa para Análise e Processamento de Sinais.....	93
3.3.5 Acessórios.....	96
3.4 Teste-Piloto.....	98
3.5 Descrição dos Experimentos.....	99
3.6 Condições Experimentais.....	101
3.7 Obtenção dos Dados.....	102
3.8 Seleção dos Dados.....	105
3.9 Tratamento dos Dados.....	106
4 RESULTADOS.....	108
4.1 Dados Obtidos.....	109
4.1.1 Experiência 1.....	109
4.1.2 Experiência 2.....	110
4.1.3 Experiência 3.....	111
4.2 Comparação dos Sons Harmônicos.....	113
4.2.1 Tubos A.....	113
4.2.2 Tubos B.....	116
4.3 Opinião dos Flautistas.....	118
4.4 Análise da Característica Sonora de Cada Material.....	119
4.5 Conclusões.....	125
4.6 Trabalhos Futuros.....	126
4.7 Disponibilização dos Dados.....	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	- Tipos de equilíbrio	23
Figura 2.2	- Rarefação e Compressão	25
Figura 2.3	- Gráfico da função seno no plano xy	26
Figura 2.4	- Princípio da superposição	30
Figura 2.5	- Interferência de ondas	31
Figura 2.6	- Nós e anti-nós de uma onda	33
Figura 2.7	- Dinâmica nos tubos aberto-aberto e aberto-fechado	34
Figura 2.8	- Fases da oscilação de uma onda estacionária num tubo	36
Figura 2.9	- Oscilação da onda estacionária correspondente ao segundo modo acústico num tubo	36
Figura 2.10	- Representação das ondas estacionárias (da velocidade das partículas) correspondente aos três primeiros modos de um tubo aberto-aberto	38
Figura 2.11	- Configuração das ondas estacionárias correspondentes aos três primeiros modos de um tubo aberto-fechados	39
Figura 2.12	- Representação visual da Amplitude e do Comprimento de onda em um gráfico de Intensidade x Tempo	43
Figura 2.13	- Intensidade sonora de alguns sons do cotidiano	45
Figura 2.14	- Representação visual de duas ondas com alturas (frequências) diferentes em um gráfico de Intensidade x Tempo	45
Figura 2.15	- Representação visual de notas musicais (sons de frequência bem determinada) com durações e intensidades diferentes em uma pauta musical	46
Figura 2.16	- Localização das notas musicais com suas respectivas frequências no piano	47
Figura 2.17	- Sons harmônicos (ondas sonoras) produzidos no interior de uma flauta transversal	49

Figura 2.18 - Série Harmônica escrita na pauta musical, começando pela clave de Fá e “subindo” pela clave de Sol	53
Figura 2.19 - Ondas sonoras de mesma frequência e diferentes timbres produzidas por diversas fontes	55
Figura 2.20 - Períodos e/ou etapas de uma onda	56
Figura 2.21 - Representação do espectro de um arquivo de áudio a partir do programa de computador Audacity 1.2.6	58
Figura 2.22 - Flauta básica: dedilhado e respectivos tons produzidos	60
Figura 2.23 - Tipos de embocadura de aresta	61
Figura 2.24 - Elementos da flauta doce	62
Figura 2.25 - Geometria acústica do bocal de flauta doce	64
Figura 2.26 - Representação temporal (domínio temporal): amplitude (intensidade) x tempo	74
Figura 2.27 - Representação espectral (domínio frequencial): amplitude (intensidade) x frequência	74
Figura 2.28 - Representação visual de um Espectrograma: frequência x tempo. Neste caso, a intensidade de cada frequência é crescente da cor azul para o vermelho	75
Figura 2.29 - Sinais com frequências 2, 4 e 8	75
Figura 2.30 - Sinal periódico e seus modelos de frequência	76
Figura 2.31 - Processo de conversão da transformada de Fourier usando a transformada discreta	81
Figura 3.1 - Arranjo experimental das flautas	84
Figura 3.2 - Tela do programa SpectraPLUS 5.0 em funcionamento	93
Figura 3.3 - Gráfico do ruído de fundo registrado na sala onde foram realizadas todas as medidas	101

Figura 3.4	- Fluxograma do procedimento experimental utilizado na obtenção dos dados	104
Figura 3.5	- Tela do programa Fityk 0.9.8	107
Figura 4.1	- Identificação dos picos do sinal gerado pelo tubo A de alumínio na Experiência 3 com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min	111
Figura 4.2	- Identificação dos picos do sinal gerado pelo tubo A de cobre na Experiência 3 com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min	111
Figura 4.3	- Identificação dos picos do sinal gerado pelo tubo A de latão na Experiência 3 com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min	111
Figura 4.4	- Identificação dos picos do sinal gerado pelo tubo B de alumínio na Experiência 3 com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min	113
Figura 4.5	- Identificação dos picos do sinal gerado pelo tubo B de cobre na Experiência 3 com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min	113
Figura 4.6	- Identificação dos picos do sinal gerado pelo tubo A de latão na Experiência 3 com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min	113
Figura 4.7	- Representação visual da FWHM (largura a meia altura)	117

LISTA DE FOTOS

Foto 2.1	- Diversos tipos de flautas	59
Foto 2.2	- Flauta transversal desmontada	62
Foto 2.3	- Flauta doce contralto montada	63
Foto 2.4	- Modelos e tipos de flauta doce diferentes fabricados pela Yamaha	63
Foto 2.5	- Flauta transversal montada	65
Foto 3.1	- Tubos utilizados nos experimentos	87
Foto 3.2	- Detalhe de identificação do par de tubos de cobre	87

Foto 3.3	- Bocal da flauta transversal e adaptador: A – Desacoplados; B – Acoplados	88
Foto 3.4	- Bocal da flauta doce contralto (sem o adaptador) acoplado à entrada do soprador artificial	89
Foto 3.5	- Bocal da flauta transversal junto com o adaptador	90
Foto 3.6	- Montagem do soprador artificial acoplado ao bocal da flauta doce	92
Foto 3.7	- Cilindro de gás utilizado	92
Foto 3.8	- Microfone utilizado para a captura dos sinais nas experiências	95
Foto 3.9	- Termômetro digital infravermelho utilizado para a captura dos sinais nas experiências	96
Foto 3.10	- Par de luvas de lã utilizadas	97
Foto 3.11	- Medidor de umidade e temperatura utilizado	97
Foto 3.12	- Arranjo experimental da Experiência 3 na sala onde foram realizadas todas as medidas	100
Foto 3.13	- Posicionamento do bocal acoplado ao soprador artificial em relação ao microfone	102
Foto 3.14	- Equipamento utilizado para a medição do ângulo entre o microfone e o bocal em uso em relação ao chão	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	- Intervalos musicais mais utilizados na música ocidental	48
Tabela 2.2	- Proporções entre intervalos sonoros	50
Tabela 2.3	- Comparação do tamanho dos intervalos naturais e temperados	54
Tabela 2.4	-- Tabela da escala cromática temperada em cent (ϕ)	54

Tabela 3.1	- Características e dimensões dos tubos utilizados nos experimentos	87
Tabela 3.2	- Dimensões do bocal da flauta transversal	88
Tabela 3.3	- Dimensões do bocal da flauta doce	89
Tabela 3.4	- Dimensões do adaptador	90
Tabela 3.5	- Especificações técnicas do Microfone utilizado nas experiências	95
Tabela 3.6	- Especificações técnicas do termômetro digital infravermelho utilizado nas experiências	96
Tabela 4.1	- Dados Referentes à Experiência 1: Flauta Doce Tocada pelo Flautista D	108
Tabela 4.2	- Dados Referentes à Experiência 2: Flauta Transversal Tocada pelo Flautista T	109
Tabela 4.3	- Dados Referentes à Experiência 3: Flauta Doce Tocada pelo Soprador Artificial Contendo Nitrogênio White Martins 4.6	110
Tabela 4.4	- Identificação dos harmônicos dos sinais gerados pelos tubos A de alumínio, cobre e latão, respectivamente, na Experiência 3, com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min	112
Tabela 4.5	- Identificação dos harmônicos dos sinais gerados pelos tubos B de alumínio, cobre e latão, respectivamente, na Experiência 3, com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min	114
Tabela 4.6	- Comparação da frequência fundamental e dos dois primeiros harmônicos dos sinais gerados pelos tubos A de alumínio, cobre e latão, respectivamente, na Experiência 3, com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min	118

Tabela 4.7 - Comparação da frequência fundamental e dos dois primeiros harmônicos dos sinais gerados pelos tubos B de alumínio, cobre e latão, respectivamente, na Experiência 3, com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min	119
---	-----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 - Comparação dos harmônicos dos sinais gerados pelos tubos A de alumínio, cobre e latão, respectivamente, na Experiência 3, com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min	112
Gráfico 4.2 - Comparação dos harmônicos dos sinais gerados pelos tubos B de alumínio, cobre e latão, respectivamente, na Experiência 3, com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min	114
Gráfico 4.3 - Comparação da frequência fundamental e dos dois primeiros harmônicos dos sinais gerados pelos tubos A de alumínio, cobre e latão, respectivamente, na Experiência 3, com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min	118
Gráfico 4.4 - Comparação da frequência fundamental e dos dois primeiros harmônicos dos sinais gerados pelos tubos B de alumínio, cobre e latão, respectivamente, na Experiência 3, com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min	119

1 INTRODUÇÃO

"A arte alimenta-se de ingenuidades, de imaginações infantis que ultrapassam os limites do conhecimento; é aí que se encontra o seu reino. Toda a ciência do mundo não seria capaz de penetrá-lo."

Loinello Venturi

Até que ponto toda a ciência do mundo seria capaz de penetrar e desvelar o reino das subjetividades? Longe de tentar abordar e explanar sobre tamanho mistério, pretendemos neste trabalho realizar um estudo científico, tendo a arte como nosso pano de fundo.

Neste trabalho estaremos abordando um assunto que ainda é tema de discussão entre músicos e cientistas quanto a influência do material utilizado na construção de instrumentos musicais em relação ao seu respectivo som.

É bem sabido que o material influencia diretamente no som de certos instrumentos musicais como o violino e o violão, mas que para instrumentos de sopro como a trompa, o trompete e a flauta, ainda há pontos em discussão, ou seja, "em algumas situações, o material está diretamente envolvido na geração do som, enquanto que em outros instrumentos, esse não é o caso", como afirma Gregor Widholm da University of Music and Performing Arts in Vienna, "Para o violino, o material é extremamente importante, porque o corpo do instrumento gera o som que nós ouvimos. O outro extremo é a clarineta, onde a coluna de ar interna gera o som e o material é apenas necessário para dar forma à coluna de ar. Neste caso, você pode utilizar qualquer material"¹, Zappas (2010).

Assim, restringindo nossos estudos a flautas montadas com tubos de mesmas dimensões e de materiais diferentes estimulados pelo som gerado tanto por um bocal de flauta doce quanto um bocal de flauta transversal, onde seus respectivos harmônicos variam de acordo com a intensidade com que o ar passa pelo instrumento, pretendemos verificar variações tímbricas do som produzido pela respectiva flauta a partir da análise sonora de arquivos de áudio gravados durante a realização de alguns ensaios experimentais.

Nos últimos 40 anos, uma série de experimentos foram e vem sendo

¹ Todas as traduções de citações que surgem neste trabalho são da responsabilidade do autor.

realizados por cientistas, músicos ou não, na tentativa de verificar alguma diferença significativa entre sons produzidos por instrumentos musicais constituídos por materiais diferentes.

Mesmo que cientistas venham demonstrando que os materiais utilizados na construção de flautas pouco interferem no som produzido pelo instrumento, sendo que tal diferença possa também ser considerada imperceptível pela audição humana, parece que algo ainda está em aberto, pois cientistas e músicos ainda não chegaram a um consenso aceitável, ou seja, diversos músicos ainda insistem no fato de que o material utilizado na construção de flautas influencia no seu respectivo som.

1.1 Motivação

Apesar do meu interesse pessoal por música, teoria musical e pela construção de instrumentos musicais (lutheria), várias contribuições científicas vem sendo realizadas através da aplicação de conceitos de Música à Física ou à Matemática e vice-versa. A música se manifesta através de fenômenos físicos que podem ser medidos, quantificados e analisados dentro de uma certa metodologia. Assim, espera-se neste trabalho produzir conteúdo voltado tanto para físicos quanto para músicos, instrumentistas e/ou luthiers².

O estudo do comportamento de materiais pode desencadear resultados que podem ser aplicados a quaisquer outras situações, repercutindo em contribuições muito além da música e da construção de instrumentos musicais. Assim, o desenvolvimento de métodos para a identificação da característica sonora de materiais utilizados em instrumentos musicais podem trazer contribuições tanto no campo da ciência quanto na arte. Neste ponto, a análise e a comparação de sons produzidos por instrumentos com as mesmas dimensões, mas de materiais diferentes pode, por exemplo, reduzir significativamente os custos de produção com a utilização de materiais mais econômicos que possuam características sonoras semelhantes a materiais de custo mais elevado.

Mesmo com tantos estudos já realizados neste campo, ainda são encontradas divergências de opinião entre músicos e cientistas quanto à influencia do material no

² Luthier: construtor\la de instrumentos musicais.

som de uma flauta, ou seja, este assunto ainda não está encerrado, podendo até, talvez, ser considerado como um dilema atual. A análise quantitativa pode esclarecer situações em que "exista, é claro, um efeito psicológico", como dito por Widholm e confirmado por Elizabeth Holm, uma cientista de materiais e música amadora, que compara instrumentos musicais a tacos de golfe. Ela afirma que "existe um forte efeito placebo. Se você tem mais confiança nos seus tacos, eles não farão você jogar um pouco melhor pelo menos por um tempo?" Zappas (2010). Assim, neste trabalho buscamos priorizar por aspectos quantitativos ao invés de aspectos qualitativos.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é verificar se existem diferenças significativas no som produzido por tubos de mesmas dimensões e de materiais diferentes estimulados por bocais de flauta doce e flauta transversal em três experiências diferentes. Com isso, pretendemos também:

- Realizar uma análise acústica dos materiais utilizados nas flautas;
- Identificar e comparar os sons fundamentais e seus respectivos harmônicos, a partir de técnicas de análise de sinais, produzidos pelas flautas com a fixação dos parâmetros físicos: temperatura, fluxo, dimensões e umidade do ar;
- Identificar a característica sonora de cada material utilizado neste trabalho: alumínio, cobre e latão.

2 REVISÃO DE LITERATURA

“Se queres prever o futuro, estuda o passado.”

Confucio

Neste capítulo estaremos apresentando uma série de temas e ferramentas para uma melhor compreensão e abordagem do tema principal, ou seja, a verificação da influência dos materiais no som (timbre) produzido por uma flauta.

2.1 Sobre a Acústica Musical

Mesmo que a ciência e a arte tenham um caráter de oposição em certos momentos da história, em outros, complementaram-se de forma extraordinária ao proporcionar exímia beleza estética. Durante a renascença, Leonardo da Vinci, Alberti, Fra Luca Pacioli, entre outros, consideravam o conhecimento técnico essencial antes de iniciar qualquer obra, ao passo que, nessa época pluridisciplinar a arte e a ciência tiveram vários pontos de contato.

Como exemplo, podemos considerar que um dos maiores destaques entre arte e ciência seria o número de ouro, ou mesmo, proporção áurea, que Fra Luca Pacioli chamou de a divina proporção. Tal proporção é uma constante real algébrica irracional denotada pela letra grega ϕ (phi) que é igual a

$$\frac{a+b}{a} = \frac{a}{b} = \phi = \frac{\sqrt{5}+1}{2} \approx 1,618 \quad (2.1)$$

sendo muito utilizada na arte, na literatura e na música e encontrada na proporção de diversas estruturas da natureza, no reino animal, vegetal e, inclusive, nas proporções anatômicas do corpo humano que foram bem representadas pelo "Homem Vitruviano" na obra de Leonardo Da Vinci.

Retomando a dicotomia entre arte e ciência, um de seus aspectos que mais se diferenciam é a reprodutividade das experiências e dos resultados, tornando, assim, resultados estéticos, às vezes, irrepetíveis. Por outro lado, um aspecto importante da ciência e do seu método científico é a sua capacidade de

confrontação com a realidade ao se poder reproduzir resultados já obtidos no passado, ou mesmo, prever aspectos teóricos da realidade antes mesmo que sua devida comprovação experimental fosse possível por questões de limitação tecnológica.

Assim, ciência e arte, tendo duas atitudes distintas perante a realidade, a primeira sendo regida pela racionalidade e a segunda pela sensibilidade, deve-se observar que com a arte podemos ter infinitas possibilidades no momento em que não há leis a serem seguidas, ao contrário da ciência, onde existem limites bem definidos pelo conhecimento da realidade, pelas teorias em vigor, além de regras muito bem estabelecidas pela comunidade científica. Assim, considerando a criação artística como uma forma de intuição, sendo mais rica de acordo com o acúmulo de conhecimento por parte do artista e/ou cientista, podemos considerar que quanto mais criativa uma visão científica, maior poderá ser a abordagem tanto científica quanto artística da realidade à partir de certos fenômenos e teorias.

Karl Popper, filósofo que desenvolveu uma série de estudos em relação ao método científico, propôs que a diferença essencial entre arte e ciência é de que a arte nunca poderia ser refutada por não se tratar de uma teoria, ao contrário da ciência, sempre passível de refutação por se basear em leis e teorias.

Mesmo com tamanha dicotomia, à partir do método científico podemos aproximar a arte da ciência através de uma abordagem científica da acústica musical, ao utilizarmos processos experimentais para avaliarmos processos e fenômenos naturais amplamente utilizados nos meios artísticos, como no nosso caso, onde devemos capturar e analisar o som emitido por uma flauta ao ser soprada por um instrumentista ou por algum equipamento adequado e justamente configurado para a devida execução do som, com o objetivo de verificar a influência do material no respectivo som, ou mesmo, em seu timbre.

A acústica musical é uma área do conhecimento que tem como objetivo estudar cientificamente todos os temas relacionados à produção, propagação e recepção do som para fins essencialmente musicais. Por isso, como disciplina científica, a acústica musical pode ser considerada uma área muito complexa devido à sua interdisciplinaridade, relacionando áreas como: música, física, engenharia, psicologia, fisiologia, anatomia, biologia, estética, arquitetura, etnomusicologia, construção de instrumentos musicais, entre outros, ao passo que, a acústica física e

alguns conceitos de música são utilizados de maneira mais relevante neste trabalho.

Considerando o som como um "objeto sonoro"³ ou objeto musical ele também pode ser investigado por meios tecnológicos e informáticos atuais, através da análise e processamento de sinais musicais e sonoros. Assim, a análise acústica pode diferenciar e distinguir em detalhes uma execução dita neutra de uma outra dita expressiva, mas não, porque a diferença é percebida pelo homem como neutra ou expressiva. Para isso, a acústica musical depende da sensibilidade humana, ou seja, de aspectos da arte para tal avaliação.

2.2 Ondas e Som

O Universo está em movimento. Cada elemento ocupa uma posição em relação à uma outra posição dentro de um referencial estabelecido. Dentre os vários movimentos que encontramos na natureza, o mais comumente observado é o movimento periódico, ou seja, um movimento em que o corpo percorre sempre a mesma trajetória em intervalos de tempos iguais. Como exemplo direto, podemos observar o movimento de rotação e translação dos planetas, assim como o balançar contínuo de um pêndulo, que neste caso, sendo um pêndulo não ideal, realiza oscilações cada vez menores por causa do atrito intrínseco ao sistema.

Assim, os movimentos periódicos mais importantes em acústica seriam os movimentos oscilatórios, ou mesmo, vibratórios, caracterizados por um movimento periódico alternado, isto é, que muda periodicamente de sentido, realizando um "vai-vem" em torno de uma posição de equilíbrio, como o movimento de um pêndulo supra citado. Da mesma forma, os movimentos mais estudados em acústica envolvem oscilações mecânicas, ou seja, que dependem de um meio de propagação no qual deve haver uma posição de equilíbrio estável, onde sempre há uma força de restituição que acelera o corpo para a sua posição de equilíbrio.

³ Termo introduzido por Pierre Schaeffer na sua obra de referência - Schaeffer, Pierre (1977), *Traité des Objets Musicaux*, Paris, Seuil.

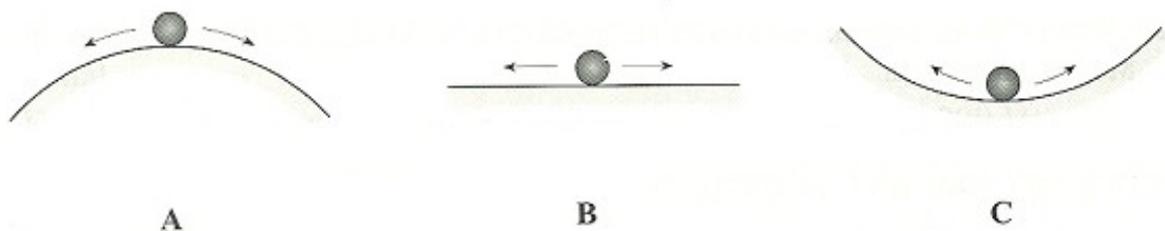


Figura 2.1 – Tipos de equilíbrio: A – Instável; B – Neutro; C – Estável.⁴

Apesar do termo acústico ser tradicionalmente associado a som, isso não significa que um oscilador acústico emita um som audível. Quando o foco do estudo está direcionado ao comportamento do fluido - vibração do ar dentro de um tubo -, chamamos de *vibração acústica* e, *vibração mecânica* quando o foco do estudo está direcionado ao corpo sólido ou estrutura - vibração de um tubo -, ao passo que, para sistemas genéricos e em particular no caso dos instrumentos musicais, sempre há um acoplamento entre vibrações acústicas e mecânicas, sendo também conhecidos como *sistemas acústico-mecânicos*.

No caso de um tubo que vibra sob a ação de um agente externo ou *emissor*, que pode ser um instrumentista soprando uma flauta ou uma mangueira de ar comprimido ligado ao instrumento- por exemplo, a flauta emite o que chamamos de som, ou mesmo, uma onda sonora que executa um movimento periódico através do que chamamos *meio* de propagação, neste caso o ar, e que se desloca do tubo até os nossos ouvidos ou até uma fonte de captação de ondas sonoras, como um microfone por exemplo, definido como *receptor*, com a possibilidade de podermos registrar e analisar o comportamento de tais ondas sonoras através de meios digitais ou informáticos. Assim, devemos compreender melhor o que seriam ondas sonoras antes de darmos continuidade aos nossos estudos.

De acordo com Nussenzveig (2002)⁵, "uma onda é qualquer sinal que se transmite de um ponto a outro de um meio, com velocidade definida", ou seja, "fala-se de onda quando a transmissão do sinal entre dois pontos distantes ocorre sem que haja transporte direto da matéria de um desses pontos ao outro". Assim, o som é uma qualidade perceptiva, resultado da percepção da movimentação de moléculas que se agitam no ar devido a ação de uma onda mecânica no meio em um certo espaço de tempo, ou seja, o som nada mais é do que uma onda mecânica

⁴ Retirado de Henrique (2002), p. 45.

⁵ p.98

que se propaga através dos gases, líquidos e sólidos, e que é detectada pelo sistema auditivo ou por receptores eletrônicos.

Um aspecto importante e característico do movimento ondulatório é o fato do movimento transportar energia e quantidade de movimento, mas não matéria, ou seja, a energia é transmitida de um ponto ao outro através do meio de propagação, mas o meio em si, não é transportado. Além disso, o meio funciona como um suporte para a perturbação inicial provocada pela vibração de uma fonte sonora poder se propagar, ao passo que, o meio em que ouvimos habitualmente é o ar e as ondas que nele se propagam designam-se *ondas de pressão* ou *ondas de compressão ou rarefação*.

Para compreendermos melhor o que seriam e como se formam as ondas sonoras, imagine um sino que vibra a uma determinada frequência após ser golpeado. Como o movimento aleatório das moléculas de ar, nosso meio considerado neste caso, em seu estado de "equilíbrio" não possui qualquer ordem ou regularidade que se possa traduzir em sons, o deslocamento periódico do ar provocado pelo sino provoca ondas de pressão no meio "empurrando" uma certa quantidade de moléculas de ar que se encontram próximas às moléculas "empurradas" inicialmente. Com isso, este movimento gera uma compressão, criando uma camada com uma maior densidade de moléculas seguida de outra camada com uma menor densidade de moléculas e assim por diante, devido à periodicidade do fenômeno, criado pelo "vai-vem" da vibração do sino. Assim, como uma reação em cadeia, as ondas de pressão se propagam até atingir a membrana do tímpano ou um microfone, colocando-os para vibrar na mesma frequência de vibração com que o sino vibra e, conseqüentemente, com que as ondas se propagam e chegam aos receptores.

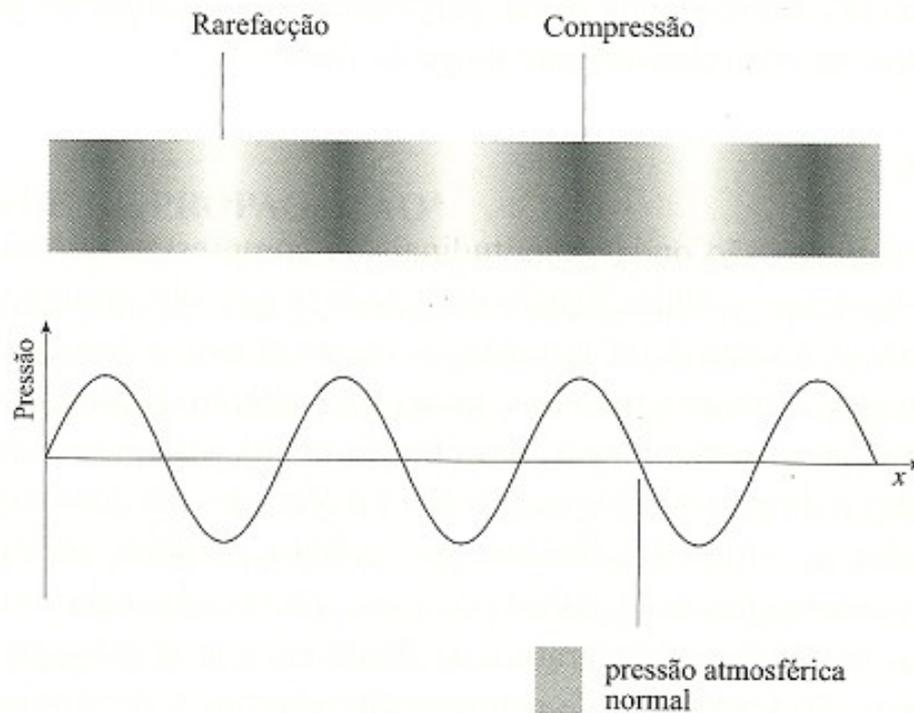


Figura 2.2 – Rarefacção e Compressão: considerando a pressão normal equivalente ao valor zero, as compressões apresentam valores positivos, enquanto que as rarefações correspondem a valores negativos.⁶

O som ao propagar-se no ar gera flutuações de pressão (pressão relativa) em relação à pressão atmosférica. Assim, nosso ouvido, sendo um órgão extremamente sensível às variações de pressão no ar, consegue detectar tais diferenças e distingui-las em diferentes tipos e alturas de som. O aumento de pressão relativa em relação à pressão atmosférica, provocada pela onda, é chamado de *pressão acústica*, López (2000).

Logo, podemos compreender que as ondas sonoras são ondas longitudinais de pressão (compressão/rarefação), onde as moléculas oscilam para a frente e para trás no mesmo sentido de propagação da onda, que se propagam em um meio material qualquer (sólido, líquido ou gasoso) e que são capazes de provocar uma sensação auditiva.

2.3 Aspectos Quantitativos de uma Onda

Dada a natureza das ondas sonoras que executam movimentos periódicos ou que se repetem regularmente, vamos agora abordar alguns aspectos quantitativos

⁶ Retirado de Henrique (2002), p. 203.

que são comumente utilizados para medi-las.

Uma das formas mais simples e comuns de representar uma onda ideal é a partir do esboço de um gráfico da função *seno* (Figura 2.3), pois tal função possui uma característica periódica que se repete sempre em um intervalo de tempo por ela ser derivada do movimento circular, ou seja, se fixarmos um giz a uma roda que gira no sentido anti-horário a uma velocidade angular ω (normalmente em rad/s) constante e que se move na direção e no sentido positivo do eixo x , lateralmente a um quadro negro a uma velocidade v (normalmente em m/s - metros por segundo) constante, o risco do giz no quadro formará a figura de uma senoide. Tal figura também lembra o movimento realizado por uma corda amarrada em uma de suas extremidades e movimentada com as mãos pela outra extremidade para cima e para abaixo.

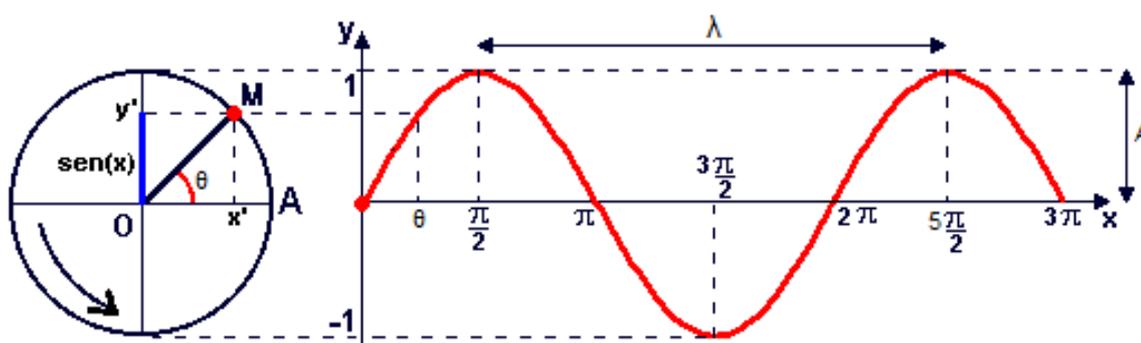


Figura 2.3 – Gráfico da função seno no plano xy.

Como uma senoide é um recurso teórico matemático, tal comportamento ideal é inexistente na natureza, logo nenhum som natural produz uma forma idêntica à uma onda senoide ideal, mesmo que as ondas sonoras produzidas por um diapasão se aproximem bastante dessa forma. Apesar disso, mais adiante veremos que qualquer onda complexa, ou mesmo, natural pode ser decomposta como uma soma de diversas (ou infinitas) ondas senoides, possibilitando assim, uma análise detalhada de seu comportamento. Com isso, definimos uma função temporal que descreverá os fenômenos ondulatórios mais simples, a *função seno*. O seno de um ângulo também é definido como sendo a razão entre dois lados de um triângulo retângulo, ou seja, a razão entre o lado oposto ao respectivo ângulo e a hipotenusa (o maior lado de um triângulo retângulo).

Observando a Figura 2.3 podemos notar seu comportamento periódico e, considerando seu comportamento no decorrer do tempo, o fenômeno se repete dentro de um intervalo de tempo, neste caso, constante. Assim, chamamos de *período* T (em segundos normalmente) o tempo necessário para que uma onda realize um *ciclo*, ou seja, que ela percorra todo o percurso efetuado, ao fim do qual o movimento repete as mesmas características.

Realizando um raciocínio inverso, podemos afirmar que uma onda realiza o mesmo percurso certas vezes dentro de um intervalo de tempo. Considerando o intervalo de tempo como sendo o período T , chamamos de *frequência* ν (em Hertz - s^{-1} - normalmente) a quantidade de vezes que uma onda realiza seu ciclo por segundo. Logo, a frequência é o inverso do período

$$\nu = \frac{1}{T} \quad (2.2)$$

Em cada ciclo, a onda percorre um percurso com uma *amplitude* A (em metros normalmente), ou seja, ela varia de 0 até $+A$ ou $-A$, sendo o módulo de A o seu deslocamento máximo em relação à posição de equilíbrio. Devemos observar que a amplitude A da senoide é igual ao valor do raio R da circunferência.

Visualizando a senoide como uma onda que se propaga longitudinalmente no espaço, chamados de *comprimento de onda* λ (em metros normalmente) a medida entre dois momentos idênticos da onda ou a medida do percurso total percorrido por uma onda em um ciclo. Assim, para o tempo total de um ciclo temos

$$\lambda = \nu \cdot T \quad (2.3)$$

ou seja,

$$v = \lambda \cdot \nu \quad (2.4)$$

onde v é a mesma velocidade com que a onda se propaga longitudinalmente no espaço e com que a roda de nosso exemplo se desloca paralelamente ao quadro.

A onda de nosso exemplo permanece no plano xy , mantendo sua forma à medida que se propaga na direção e no sentido positivo do eixo x a uma velocidade v constante, tal que, em um instante t o pulso se move por uma distância vt . A coordenada y indica o deslocamento transversal de um ponto particular da onda, dependendo tanto da posição x quanto do tempo t . Logo, podemos escrever essa dependência de ambas variáveis como uma função $y(x, t)$ ou $f(x, t)$. Agora, considere o sistema de eixos $x'y'$ cuja origem está localizada bem no centro da roda. Podemos descrever a função $f(x, t)$ em relação a este novo sistema de eixos através da função $f(x', t)$, pois a relação entre as coordenadas x nos dois sistemas de eixos é $x' = x - vt$. Assim, em um tempo t , a onda será descrita por

$$f(x, t) = f(x') = f(x - vt) \quad (2.5)$$

Aplicando a definição da função seno ao sistema de eixos $x'y'$ temos

$$\text{sen}(\theta) = \frac{y'}{A} \rightarrow y' = A \text{sen}(\theta) = A \text{sen} \frac{2\pi}{\lambda} x' \rightarrow f(x, t) = A \text{sen} \frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) \quad (2.6)$$

Pois

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \frac{v}{\lambda} \rightarrow \theta = \frac{2\pi}{\lambda} vt, vt = x, \theta = \frac{2\pi}{\lambda} x, x' = x - vt \rightarrow \theta = \frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) \quad (2.7)$$

Reescrevendo a função $f(x, t)$ utilizando as quantidades

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{e} \quad \omega = 2\pi v \quad (2.8)$$

onde tanto κ (rad/m) quanto ω (rad/s) são quantidades angulares, temos

$$f(x, t) = A \text{sen}(\kappa x - \omega t) \quad (2.9)$$

ou na forma mais geral

$$f(x, t) = A \text{sen}(\kappa x - \omega t - \phi) \quad (2.10)$$

onde ϕ é o *ângulo de fase*, ou simplesmente *fase* ϕ (medido em radianos ou graus normalmente), que determina a posição inicial de uma onda em relação ao início do movimento. A equação acima é a equação de propagação da onda senoidal no sentido positivo do eixo x , e que será amplamente utilizada no capítulo sobre Análise de Sinais. Na Figura 2.3, a fase da senoide é igual a zero, pois o ângulo inicial do movimento medido do centro da circunferência é igual a zero, ou mesmo, foi admitido que o deslocamento y era igual a zero na posição $x=0$ no instante de tempo $t=0$.

Assim, as ondas são caracterizadas pelo seu comprimento de onda e pela frequência de onda, sendo este, o inverso do seu período, ao passo que, tais grandezas estão relacionadas pela velocidade de propagação da onda.

2.4 Modos Vibratórios e a Acústica de um Tubo

Podemos observar frequentemente duas ou mais ondas propagando-se simultaneamente através da mesma região do espaço de forma totalmente independente, como no caso de uma música executada por vários músicos ao mesmo tempo, onde podemos distinguir nitidamente o som produzido por cada instrumento musical individualmente. Esse fenômeno de combinação em um ponto, no nosso tímpano ou em um microfone, de diversos sons originários de diversos emissores diferentes é chamado de *interferência* e ilustra o *princípio da superposição*, estabelecendo que quando várias ondas se combinam em um ponto, o deslocamento de cada partícula em um dado instante de tempo é simplesmente a soma dos deslocamentos nela causados por cada onda de forma independente das demais. Dessa forma, analiticamente, o deslocamento em uma corda sob a ação simultânea de n -ondas independentes será

$$f(x, t) = f_1(x, t) + f_2(x, t) + \dots + f_n(x, t) \quad (2.11)$$

sendo que, para ondas mecânicas em um meio elástico, o princípio da superposição é válido sempre que a força de restauração variar linearmente com o deslocamento,

tal que, isso é válido para a maioria das circunstâncias abordadas neste texto.

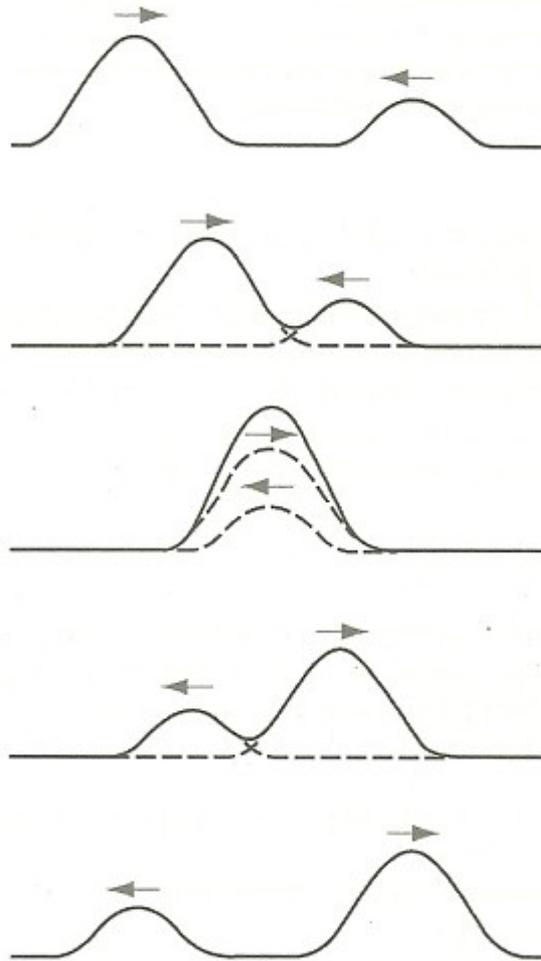


Figura 2.4 – Princípio da superposição: dois pulsos viajam em sentidos opostos ao longo de uma corda tensa. O princípio da superposição se aplica à medida que os pulsos se movem um através do outro.⁷

Uma interferência pode ser *construtiva*, onde as ondas se reforçam completamente e a onda resultante tem uma amplitude de valor quase dobrado em relação às amplitudes das duas componentes, ou *destrutiva*, onde ocorre quase que um cancelamento completo em cada ponto e a amplitude resultante é próxima de zero.

⁷ Retirado de Resnick & Halliday & Krane (2007), p. 128

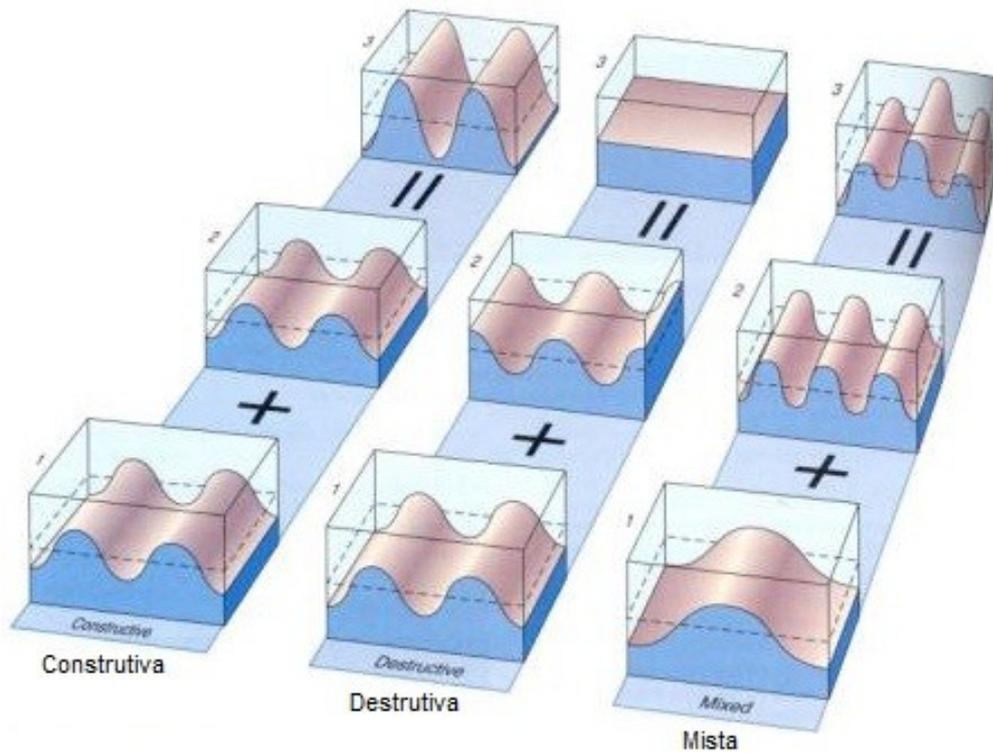


Figura 2.5 - Interferência de ondas: ondas diferentes (1 e 2) podem se encontrar e produzirem diferentes padrões de interferência (3). Quando ondas idênticas, que estejam *em fase*, se encontram produzem uma onda totalmente construtiva. Neste caso, as amplitudes de ambas as ondas são somadas, mas seus comprimentos de onda são mantidos. No caso contrário, quando ondas idênticas com 180° de diferença de fase (ou *fora de fase*) se encontram, elas são completamente canceladas produzindo uma interferência destrutiva. Nos casos mais comuns em que ondas de alturas diferentes se encontram, há a formação de ondas que podem possuir uma estrutura complexa, formando assim, um onda mista.⁸

Para duas ondas senoides transversais de mesma amplitude e comprimento de onda, que se propagam na direção e no sentido positivo do eixo x com a mesma velocidade, suas equações de onda são dadas por

$$f_1(x, t) = A \text{sen}(\kappa x - \omega t - \phi_1) \quad (2.12)$$

e

$$f_2(x, t) = A \text{sen}(\kappa x - \omega t - \phi_2) \quad (2.13)$$

Pelo princípio da superposição temos

$$f(x, t) = f_1(x, t) + f_2(x, t) = 2A \cos\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \text{sen}\left(\kappa x - \omega t - \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}\right) \quad (2.14)$$

⁸ Retirado de H. V. Thurman (1997)

onde $\Delta\phi=(\phi_2-\phi_1)$ é a *diferença de fase* entre as duas ondas. Assim, podemos determinar se uma onda está "atrasada" em relação à outra ou simplesmente em fase, ou seja, quando não há diferença de fase ou defasamento. Quando a diferença de fase for nula, as duas ondas se sobrepõem completamente, ou seja, a crista de uma cairá sobre a crista da outra, assim como os vales, determinando uma interferência construtiva completa. Quando a diferença de fase é de 180° , a amplitude resultante será nula, então dizemos que as ondas estão em *oposição de fase* e, quando a diferença de fase é de 90° ou 270° , chamamos de *quadratura de fase*.

Consideremos agora o caso em que as ondas se propagam em *sentidos opostos* e, por simplificação, vamos supor que tenham a mesma amplitude e constante de fase nula, ou seja

$$f_1(x,t)=A\text{sen}(\kappa x-\omega t) \quad (2.15)$$

e

$$f_2(x,t)=A\text{sen}(\kappa x+\omega t) \quad (2.16)$$

Pelo princípio da superposição temos

$$f(x,t)=f_1(x,t)+f_2(x,t)=2A\text{sen}(\kappa x)\cos(\omega t) \quad (2.17)$$

Como a equação resultante é o produto de um função de x por uma função de t , então não há a propagação da onda resultante, isto é, a forma da corda permanece sempre semelhante, com o deslocamento mudando apenas de amplitude e eventualmente de sinal. Uma característica importante dessa superposição é que há certos pontos sobre a corda em que o deslocamento é nulo em todos os instantes. Esses pontos são chamados de *nós* (ou *nodos*) e entre dois nós existem os *antinós* (ou *antinodos*, ou *ventres*), em que os deslocamentos oscilam com amplitude máxima. Assim, essa estrutura de nós e antinós é chamada de *onda estacionária* e é o que acontece nos instrumentos musicais de cordas, tubos, membranas, etc, que são meios elásticos. Desta forma, assim que um instrumentista realiza um ataque⁹ no seu instrumento musical, são geradas ondas

⁹ Começa a tocar uma frase musical.

sonoras que se propagam até os limites do instrumento, refletindo-se e formando ondas estacionárias que vibram em uma determinada frequência relacionada a nota musical que percebemos através de nosso sistema auditivo.

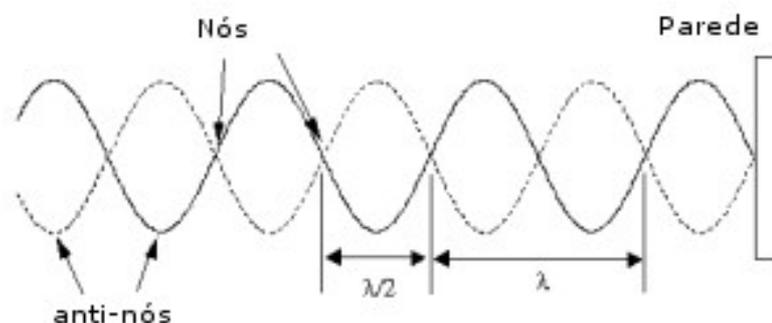


Figura 2.6 – Nós e anti-nós de uma onda.

Neste trabalho estudamos o comportamento acústico de uma flauta, sendo que, o modelo teórico mais aproximado para tal é de um tubo aberto-aberto (aberto em ambos os lados), ao passo que, o modelo de um tubo aberto-fechado (aberto de um lado e fechado do outro) é o modelo acústico que mais se aproxima ao clarinete. Para isso, descreveremos um exemplo encontrado no livro *Acústica Musical* de Luís L. Henrique¹⁰.

Considerando um tubo cilíndrico de comprimento l , uniforme, liso (sem orifícios laterais) e aberto em ambas as extremidades, podemos utilizar as equações (2.15) e (2.16) como uma solução típica para a equação de propagação de ondas em tubos, ou seja, como uma solução de d'Alembert [Morse & Ingard(1968); Pierce (1989)].

Inicialmente a pressão do ar que está dentro do tubo é igual à pressão atmosférica exterior, que podemos considerar como sendo zero para medirmos as devidas variações de pressão em relação a esse valor. Assim, podemos considerar as compressões como sendo pressão positiva e as rarefações como sendo pressão negativa. Supondo que neste tubo um pistão faça um movimento impulsivo em uma abertura localizada no centro do tubo, originando uma compressão (onda incidente $f_1(x, t)$) que se propaga até a outra extremidade, expandindo-se para fora do tubo devido à inércia do ar e formando uma rarefação (onda refletida $f_2(x, t)$) que se propaga no tubo no sentido inverso, sendo que, durante este processo a pressão na

¹⁰ Henrique (2002), p. 151-159.

extremidade aberta mantém-se igual à pressão atmosférica, logo, neste ponto temos $f_1(x,t) + f_2(x,t) = 0$. Ou seja, a onda de rarefação refletida, $f_2(x,t)$, é exatamente oposta à onda de compressão incidente, $f_1(x,t)$. Ao regressar à extremidade inicial do tubo, aberta, a onda será novamente refletida, dando lugar agora a uma compressão idêntica à inicial. Desta forma, em um tubo aberto-aberto, a onda percorre duas vezes o tubo em um ciclo (Figura 2.7-A).

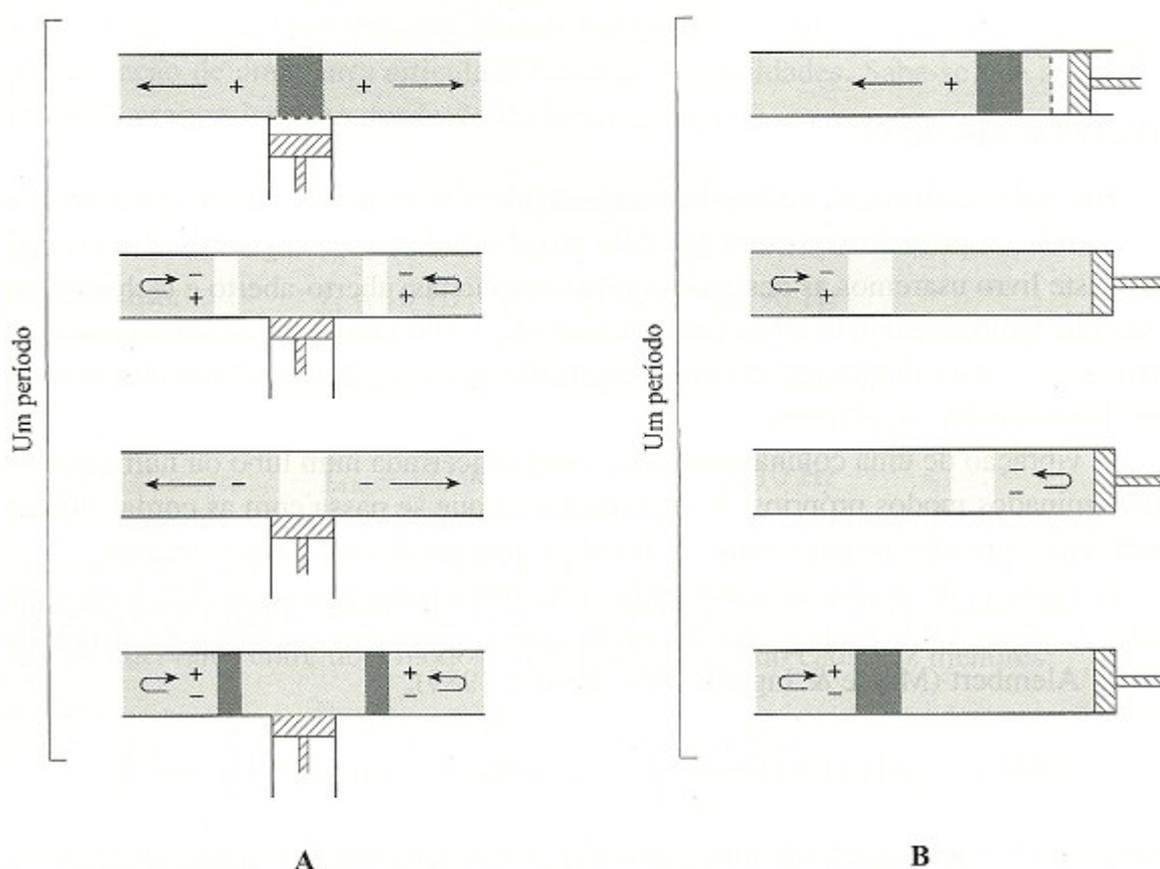


Figura 2.7 – Dinâmica nos tubos aberto-aberto e aberto-fechado: a propagação de um impulso num tubo permite observar qual o percurso efetuado até se completar um ciclo. A - Num tubo aberto-aberto o período é correspondente ao tempo do percurso $2l$ (duas vezes o comprimento l); B - Num tubo fechado-aberto, o período é o tempo que o impulso leva para percorrer $4l$.¹¹

Para um tubo aberto-fechado a compressão $f_1(x,t)$ gerada inicialmente percorre todo o tubo uma vez até ser refletida na extremidade aberta como uma expansão, gerando a onda $f_2(x,t)$. Entretanto, a reflexão na extremidade fechada do tubo dá lugar a uma onda do mesmo tipo que a incidente, logo também de

¹¹ Retirado de Henrique (2002), p.152.

rarefação, isto é, devido à condição de deslocamento nulo das partículas no extremo fechado. De fato, a onda de expansão incidente desloca as partículas na direção oposta à parede e a onda de expansão refletida desloca as partículas na direção contrária, ou seja, de volta à parede. Logo, quando as duas ondas têm a mesma amplitude na parede elas se cancelam exatamente neste ponto. Esta reflexão percorre o tubo no sentido inverso até atingir a extremidade inicial aberta, onde uma nova reflexão dá lugar a uma onda de compressão. Assim, em um tubo aberto-fechado, a onda percorre quatro vezes o tubo em um ciclo (Figura 2.7-B).

No caso de haver uma força excitadora que envia uma série de ondas para o interior do tubo, assim como um instrumentista ao soprar uma flauta, as ondas estacionárias que se formarão no tubo são semelhantes às que se formam nas cordas, com a consideração de que nos tubos seja mais difícil visualizá-las porque se tratam de ondas acústicas longitudinais. Além disso, devemos considerar que a pressão e a velocidade das partículas do ar, sendo que entre esses dois parâmetros há um defasamento de 90° , nos pontos em que a pressão é máxima, a velocidade não se altera, e que nos pontos em que a velocidade é máxima, a pressão não sofre variação em relação à pressão atmosférica (Figuras 2.8 e 2.9). Na Figura 2.8 um ciclo vibratório está dividido em quatro fases correspondentes aos instantes: $t=0$, $T/4$, $T/2$ e $3T/4$, onde T é o período.

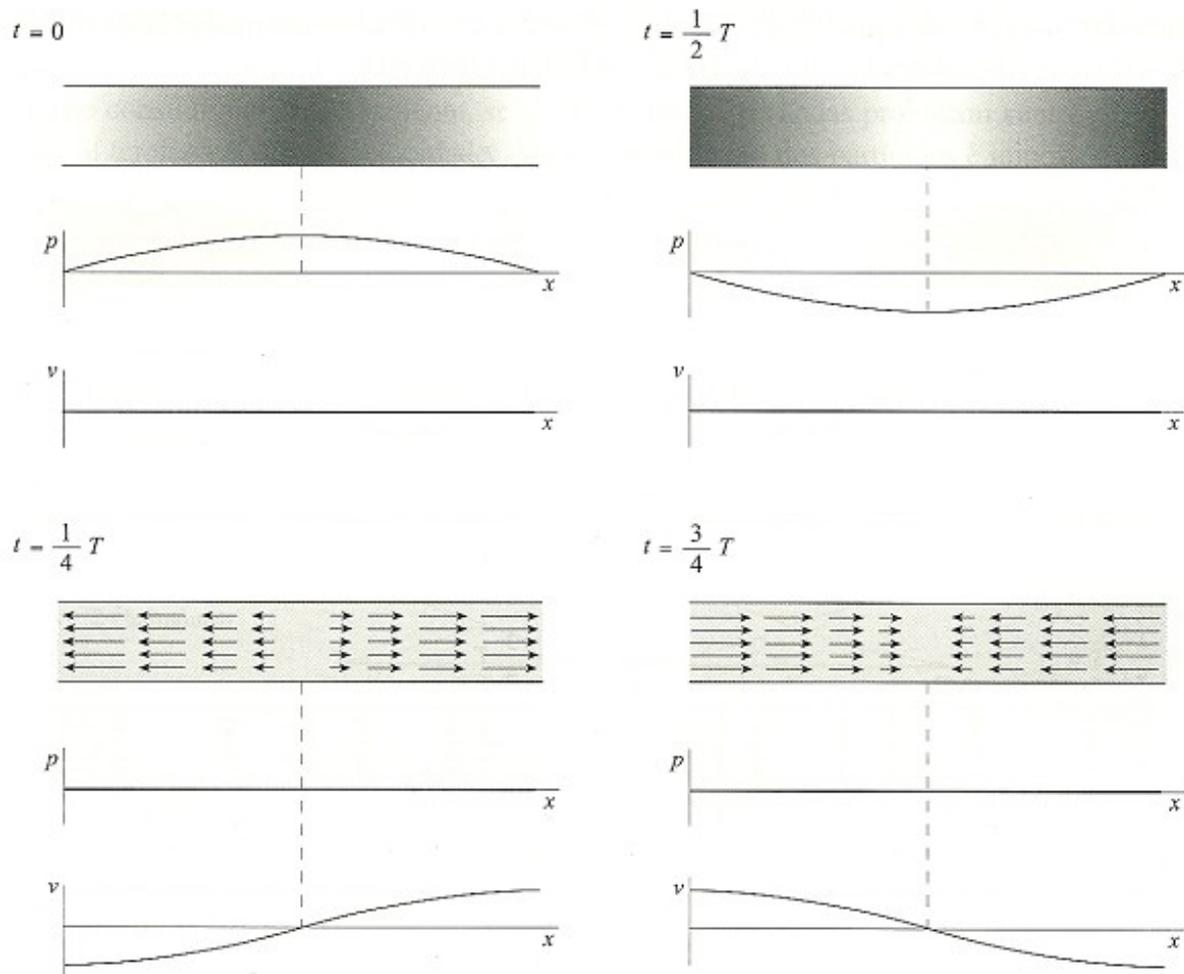


Figura 2.8 - Fases da oscilação de uma onda estacionária num tubo: note que todas as representações (pressão p e velocidade v) são funções da posição x ao longo do tubo. Representam portanto a variação dessa grandeza no ponto do tubo considerado.¹²

Em cada figura temos a representação da pressão e a velocidade das partículas de ar nos tubos, sendo que as setas indicam a velocidade das partículas de ar no instante considerado. Nas extremidades abertas, o encontro das ondas incidente e refletida em oposição de fase provoca uma interferência destrutiva, originando um *nó* de pressão, ou seja, uma zona do tubo em que não há variação de pressão. Nas extremidades fechadas a onda refletida tem a mesma fase da onda incidente, provocando uma interferência construtiva ou um *antinó* de pressão, ou seja, uma zona do tubo em que há a máxima flutuação de pressão.

¹² Retirado de Henrique (2002), p.153

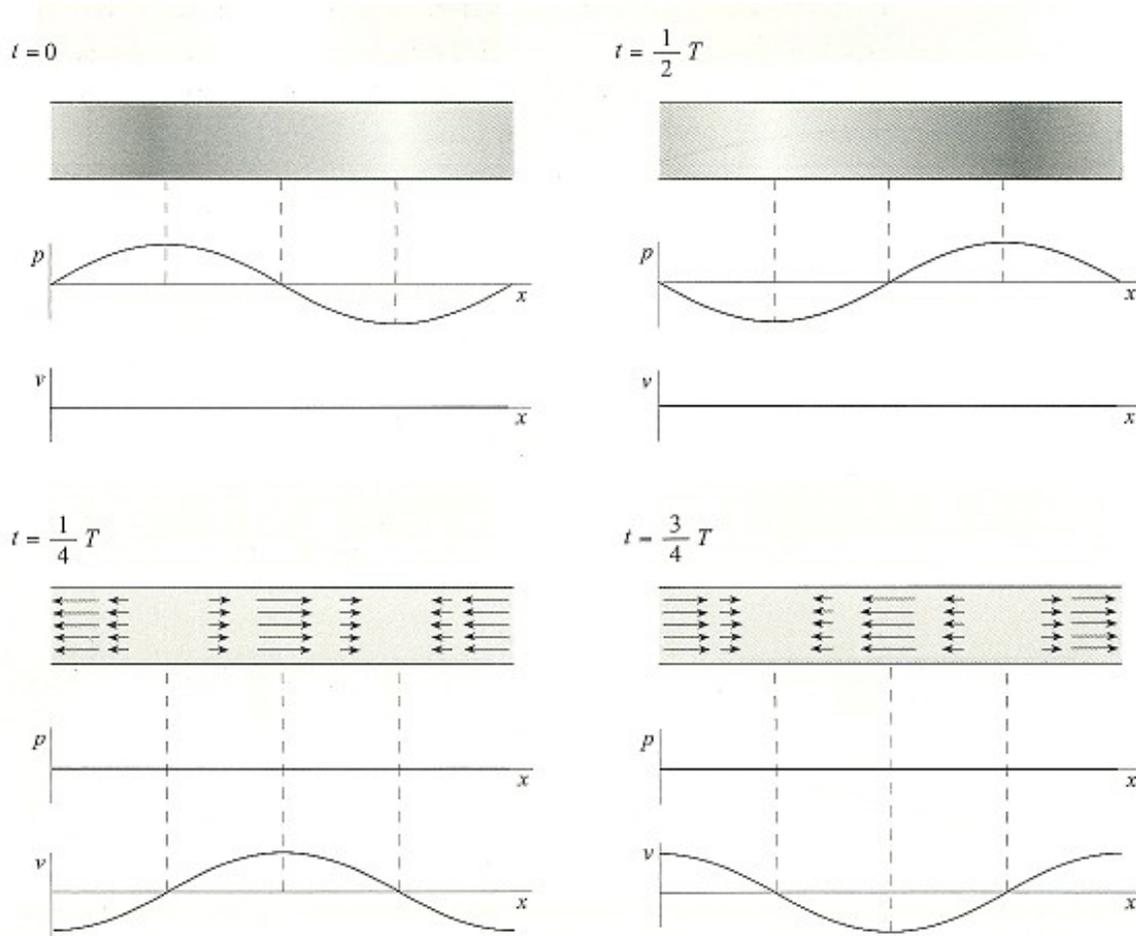


Figura 2.9 - Oscilação da onda estacionária correspondente ao segundo modo acústico num tubo.¹³

Como afirmado por Henrique (2002)¹⁴, “Considera-se um nodo [ou nó] de velocidade uma zona em que praticamente não há deslocamento do ar; os ventres [ou antinós] de velocidade são zonas que alternam com os nodos [nós], e onde o ar se movimenta com maior velocidade. Nota-se que, se há nodos [nós] de pressão nas extremidades abertas, aí teremos ventres de velocidade, já que o movimento das partículas não é minimamente constrangido. Inversamente, se as extremidades fechadas provocam ventres [antinós] de pressão, aí teremos nodos [nós] de velocidade, já que o movimento das partículas é impossível.”. Observando a Figura 2.9 podemos notar a formação de outros sistemas de ondas estacionárias no segundo modo acústico.

Os valores entre os quais oscila a velocidade das partículas costuma ser representada por duas linhas em representações gráficas das ondas estacionárias

¹³ Retirado de Henrique (2002), p.154.

¹⁴ Retirado de Henrique (2002), p.155.

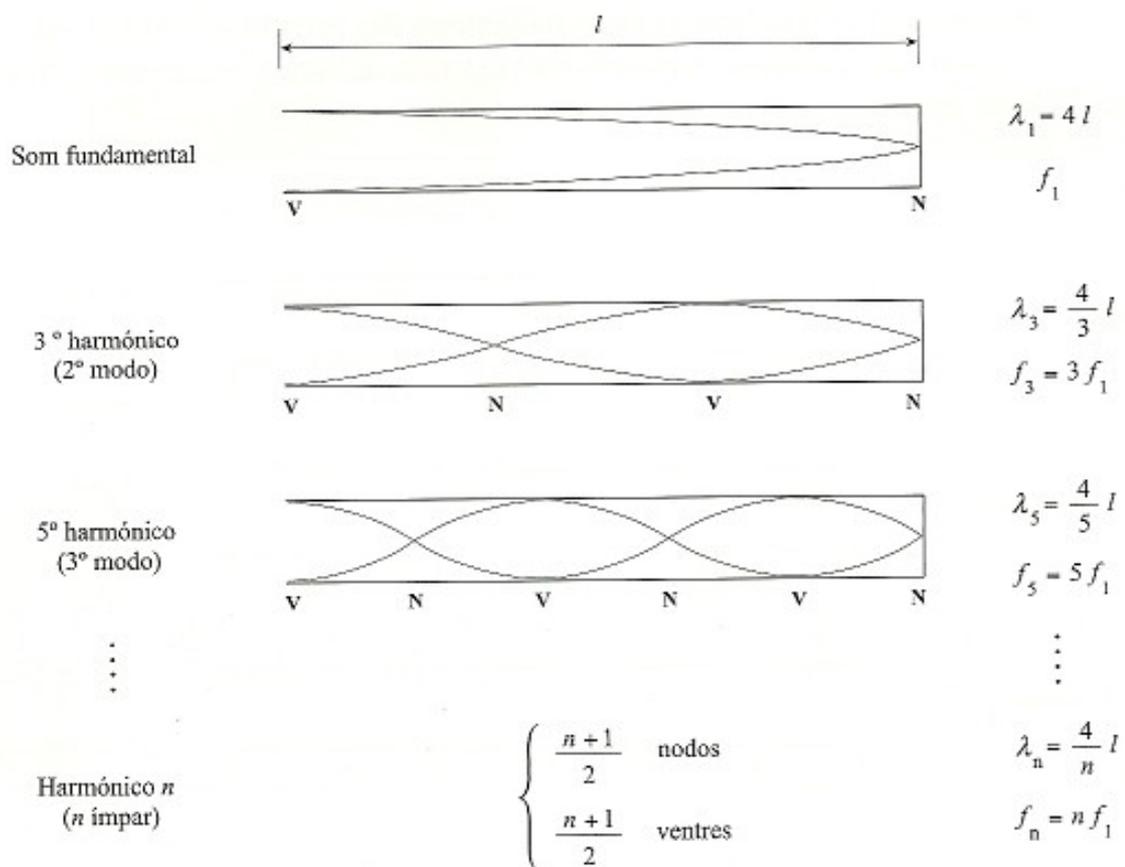


Figura 2.11 - Configuração das ondas estacionárias correspondentes aos três primeiros modos de um tubo aberto-fechados: som fundamental, terceiro e quinto harmônicos (representação da velocidade das partículas).¹⁶

Consideremos uma onda cujo comprimento λ venha a corresponder à distância em que a onda venha a se propagar durante um período de oscilação T . Então podemos escrever

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2.18)$$

onde c é a velocidade do som (m/s) em um gás (ver abaixo), λ é o comprimento de onda (m) e ν é a frequência (Hz).

No caso de um tubo aberto-aberto o comprimento de onda da frequência do primeiro modo é dado por

¹⁶ Retirado de Henrique (2002), p.156.

$$\lambda = 2l \quad (2.19)$$

Então, para encontrarmos a frequência mais baixa v_1 que corresponda a uma onda estacionária, substituímos a equação (2.19) na equação (2.18) obtendo

$$v_{1,a} = \frac{c}{2l} \quad (2.20)$$

que pode ser escrita na forma mais geral

$$v_{n,a} = n \frac{c}{2l}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.21)$$

para o cálculo da frequência de um determinado harmônico em um tubo aberto-aberto.

Repetindo o mesmo raciocínio para o caso de um tubo aberto-fechado onde

$$\lambda = 4l \quad (2.22)$$

e

$$v_{1,f} = \frac{c}{4l} \quad (2.23)$$

obtemos a seguinte relação

$$v_{n,f} = (2n - 1) \frac{c}{4l}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.24)$$

Nota-se que para o caso de tubos cilíndricos abertos-fechados, os modos acústicos contém apenas harmônicos ímpares, devido à assimetria das condições aos limites, que inviabilizam a formação de harmônicos pares. Assim, o tubo nunca fica dividido em um número par de partes.

As equações (2.21) e (2.24) permitem-nos calcular a frequência fundamental do som e seus respectivos harmônicos de um tubo aberto-aberto ou aberto-fechado a partir de seu comprimento l (em metros: m) e da velocidade de propagação do som c (em metros por segundo: m/s) em termos das propriedades de um gás que é dada por

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad \text{ou} \quad c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (2.25)$$

em que $\gamma = C_p/C_v$, R é constante universal dos gases ($J \text{ mol}^{-1} K^{-1}$), T é a temperatura absoluta (K), M é a massa molecular ($kg \text{ mol}^{-1}$), ρ é a massa volumétrica ($kg \text{ m}^{-3}$) e P é a pressão (Pa).

Assim, para o caso do ar seco a $0^\circ C$: $\gamma = 1,4$; $R = 8,314 J \text{ mol}^{-1} K^{-1}$; $M = 2,88 \times 10^{-2} kg \text{ mol}^{-1}$; $T = 273,15 K$, temos

$$c = \sqrt{\frac{1,4 \times 8,31 \times 273,15}{2,88 \times 10^{-2}}} = 332,1 m/s \quad (2.26)$$

Uma vez que os valores de γ , R e M são fixos para o ar, podemos escrever a equação (2.25) apenas em função da temperatura, ou seja,

$$c = 20,1 \sqrt{T} \quad (2.27)$$

Como a velocidade de propagação do som no ar aumenta aproximadamente $0,6 m/s$ a cada grau centígrado, logo podemos entender como a variação da temperatura tem uma grande importância na afinação de instrumentos de sopros.

Substituindo a equação (2.27) na equação (2.21) temos

$$v_{n,a} = n \frac{20,1 \sqrt{T}}{2l}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.28)$$

Assim, conclui-se que as frequências sonoras e seus respectivos harmônicos também aumentam com a temperatura do ar, ao passo que, isso também é bem

conhecido nos instrumentos de sopro pelos músicos e instrumentistas.

Além disso, de acordo com Fuks (1993) a variação da afinação não depende apenas da temperatura ambiente, mas também da composição de vapor de água e dióxido de carbono no ar exalado pelo instrumentista ao soprar seu instrumento. Para isso, ele mediu a variação contínua das concentrações de oxigênio e dióxido de carbono durante a execução musical de notas e frases longas de clarinetistas e oboístas, verificando que a composição do dióxido de carbono aumenta de 0,03 para 8,5 % em notas muito longas, enquanto que a composição de oxigênio baixa de 21 para 12 %, ou seja, que o aumento de dióxido de carbono tende a baixar a afinação, enquanto que a diminuição de oxigênio e o aumento da umidade tendem a subi-lo. Assim, tanto na flauta quanto na clarineta e oboé, os músicos procuram minimizar esse efeito através de ajustes na embocadura e na pressão do sopro.

2.5 Sons Musicais

De acordo com Med (1996)¹⁷, “Música é a arte de combinar os sons simultâneos e sucessivamente, com ordem, equilíbrio e proporção dentro do tempo”, sendo que, ele afirma que a música pode ser constituída, principalmente, das seguintes partes:

- **Melodia:** conjunto de sons dispostos em *ordem sucessiva* (concepção horizontal da música);
- **Harmonia:** conjunto de sons dispostos em *ordem simultânea* (concepção vertical da música);
- **Contraponto:** conjunto de melodias dispostas em ordem simultânea (concepção ao mesmo tempo horizontal e vertical da música);
- **Ritmo:** ordem e proporção em que estão dispostos os sons que constituem a melodia e a harmonia.

Nos tópicos anteriores foi abordado brevemente a natureza do som e como ele é originado a partir das ondas sonoras. Ao vibrar um corpo elástico, ele movimenta o ar na forma de ondas sonoras que se propagam em todas as direções até chegar aos nossos ouvidos. Desta forma, o som é uma sensação codificada pelo cérebro a partir de impulsos nervosos que são criados pela estimulação do aparelho

17 p.11.

auditivo pelas ondas sonoras.

A característica que distingue um *som musical* (ou *vibração regular*), com sons de altura definida, de um *ruído* (ou *vibração irregular*), com sons de altura indefinida, é a sua *periodicidade*. Por isso, um som musical não precisa, necessariamente, corresponder a uma onda harmônica (sinusoidal), mas tão somente que seja periódico.

As principais características do som, ou mesmo, as qualidades que distinguimos em um som musical, pelas sensações subjetivas que ele pode proporcionar, são: duração, intensidade, altura e timbre.

A *duração* é a “extensão” do som, ou seja, por quanto tempo ele é emitido por uma fonte sonora. A alternância de sons musicais (notas musicais) de forma regular dentro de um determinado tempo determina o que chamamos de *ritmo*.

2.5.1 Intensidade Sonora

A *intensidade* está relacionada com a *amplitude* da onda sonora (Figura 2.12), tal que, para uma onda harmônica, a intensidade é definida como sendo a energia média transmitida através de uma secção, por unidade de tempo e área. Observe que o som é uma quantidade tri-dimensional, logo devemos considerar a área quando analisamos a transmissão de energia, ao passo que, o que nos interessa é a quantidade de energia transmitida por unidade de tempo e não a energia total transferida, isto é, o número em joules por segundo (watts) que se propagam através de uma área.

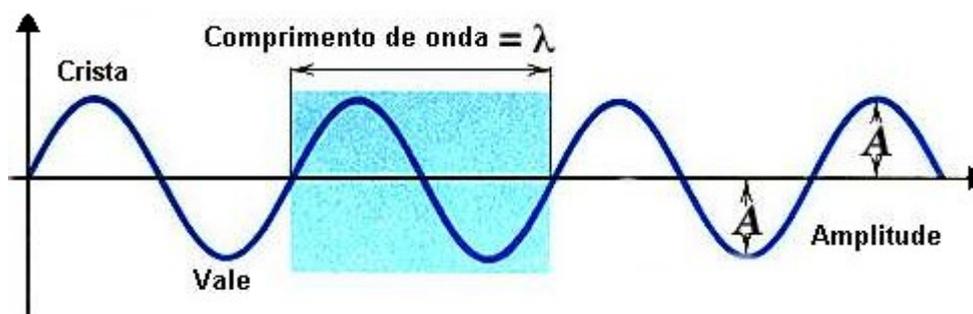


Figura 2.12 - Representação visual da Amplitude e do Comprimento de onda em um gráfico de Intensidade x Tempo.

Na prática, costuma-se utilizar o *nível de intensidade sonora* no lugar da intensidade, sendo esse medido em uma escala logarítmica de modo que incrementos iguais na escala correspondem a fatores iguais de aumento de intensidade. Isso é devido ao grande alcance das intensidades audíveis que cobrem muitas ordens de grandeza, desde $I_0 \approx 10^{-12} \text{ W/m}^2$ até $I_m \approx 1 \text{ W/m}^2$ (watts por metro quadrado). Além disso, Nussenzweig (2002) afirma que de acordo com Weber e Frechner, há uma razão ou lei empírica no qual a “sensação” produzida por um determinado estímulo é proporcional ao logaritmo da “excitação”.

Tomando I_0 (limiar de audibilidade: limite em que um som pode ser ouvido, ou mesmo, percebido) e I_m (limiar de dor: limite onde o som começa a danificar o sistema auditivo) como valores de referência, o nível de intensidade é definido como

$$\alpha = 10 \log_{10}(I_m/I_0) \quad (2.29)$$

onde a unidade utilizada para nível de intensidade é o *bel*¹⁸, tal que dois sons diferem de 1 bel quando a intensidade de um é 10 vezes maior do que o outro (por isso o fator de 10 aparece na equação acima), sendo que, na prática, usa-se a unidade *decibel* ou simplesmente *db* (que é igual à 0,1 bel) pelo fato do nível de intensidade abranger valores muito extensos. Alguns valores típicos de nível sonoro podem ser visualizados na Figura 2.13.

¹⁸ Em homenagem à Alexander Graham Bell.

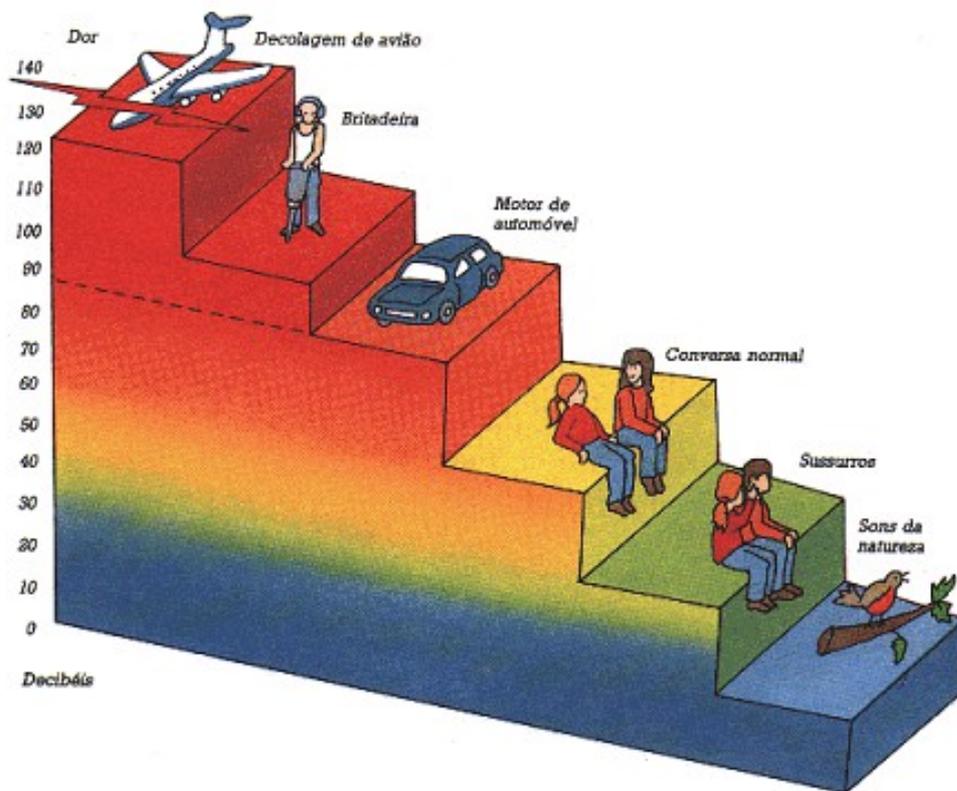


Figura 2.13 – Intensidade sonora de alguns sons do cotidiano.

2.5.2 Alturas e Intervalos

A *altura* de um som musical corresponde à sensação que nos permite distinguir os sons entre mais graves e mais agudos, tal que, a característica física de uma onda sonora que está diretamente associada à altura é a frequência, ou seja, quanto maior é a frequência, mais agudo (mais “alto”) é o som e, quanto menor a frequência, mais grave (mais “baixo”) é o som (Figura 2.14).

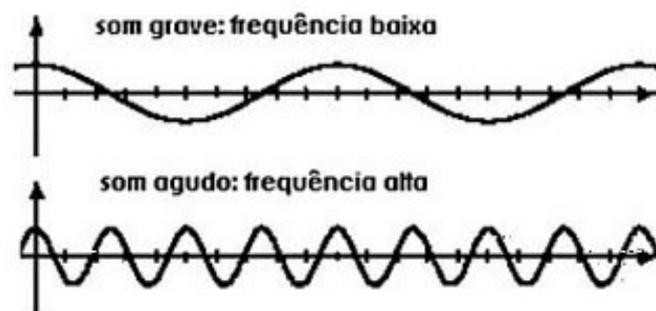


Figura 2.14 - Representação visual de duas ondas com alturas (frequências) diferentes em um gráfico de Intensidade x Tempo.

Quando um som musical apresenta uma frequência bem determinada, nós o classificamos como sendo uma nota musical, de acordo com convenções estabelecidas durante a história, ou seja, para a frequência de 440 Hz é associada a nota lá₄ (ou A4¹⁹), para a frequência de 130 Hz associa-se a nota dó₃ (ou C3), etc. Assim, em notação musical (sistema de escrita musical), utiliza-se uma série de símbolos para representar a duração e intensidade sonora, enquanto que a frequência de uma nota musical, simbolicamente representada, é estabelecida de acordo com o seu posicionamento vertical na pauta²⁰ musical (Figura 2.15).

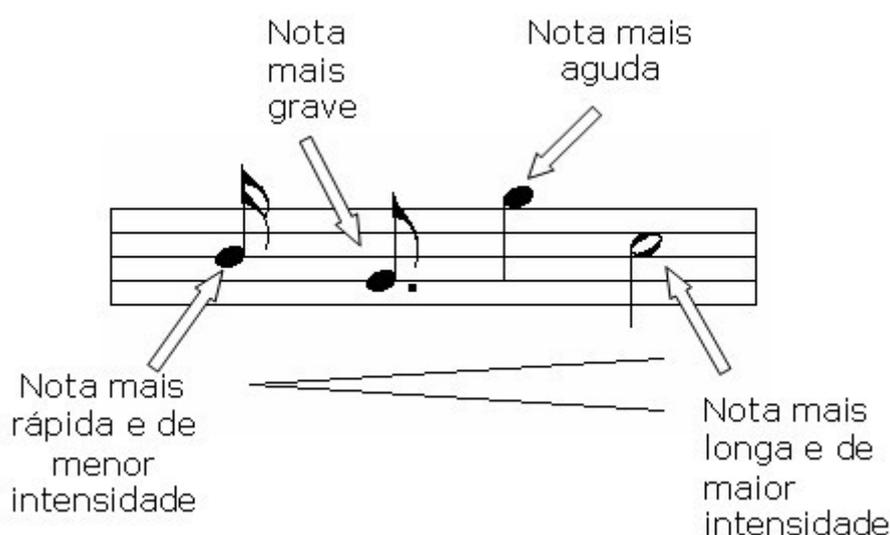


Figura 2.15 - Representação visual de notas musicais (sons de frequência bem determinada) com durações e intensidades diferentes em uma pauta musical, que pode ser considerado como sendo um gráfico de Frequência x Tempo.

19 Nesta notação temos: A = lá, B = si, C = dó, D = ré, E = mi, F = fá, G = sol. Os números que seguem as letras indicam em que 8ª (oitava) está localizado a nota. Utilizaremos também a notação dó₃ = C3. Observando a Figura 2.13, por exemplo, podemos identificar os limites de uma oitava com as notas dó₄ = C4 = 261,63 Hz e dó₅ = C5 = 523,25 Hz.

20 Pauta é o sistema de linhas utilizado na escrita musical, ou mesmo, notação musical. Ela é composta de cinco linhas e quatro espaços (entre as linhas), onde cada linha e cada espaço contam como notas, ou seja, de uma linha para um espaço conta-se uma nota e vice-versa. De baixo para cima temos uma sequência ascendente (dó – ré, por exemplo) e de cima para baixo temos uma sequência descendente (ré – dó, por exemplo).

Segue abaixo a frequência de algumas notas musicais:

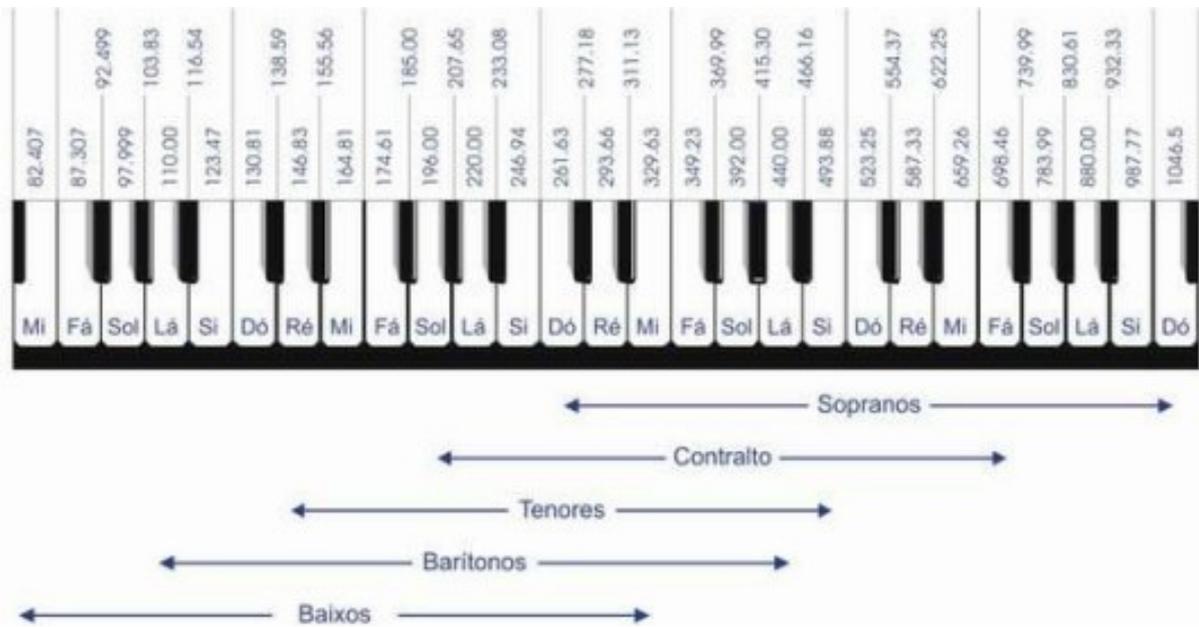


Figura 2.16 – Localização das notas musicais com suas respectivas frequências no piano²¹. Abaixo estão ilustrados as extensões sonoras para os tipos de voz típicos na música ocidental.

Observe que dois sons musicais, como por exemplo as notas lá₄ de frequência $f_{A_4} = 440 \text{ Hz}$ e lá₅ de frequência $f_{A_5} = 880 \text{ Hz}$, podem ser percebidos como sendo a “mesma” nota musical em alturas (frequências) diferentes. Neste caso, por convenção musical, quando $f_{A_5} = 2 f_{A_4}$ dizemos que isso é um *intervalo* de 8ª (*oitava*). Musicalmente, o intervalo entre duas notas corresponde a uma “distância sonora”, sendo que, esse mesmo intervalo costuma ser classificado contando-se as notas existentes entre os dois extremos. Como exemplo, o intervalo dó₄-mi₄ é um intervalo de 3ª (terça) e o intervalo sol₄-ré₅ é um intervalo de 5ª (quinta), e assim sucessivamente.

²¹ O piano utiliza um sistema de afinação temperado que será visto adiante.

Tabela 2.1 – Intervalos musicais mais utilizados na música ocidental.

Nome dos Intervalos	Distâncias [tons]	Exemplos
Tônica	0	Uníssono
Segunda menor	$\frac{1}{2}$	Dó para Réb
Segunda maior	1	Dó para Ré
Terça menor	$1 + \frac{1}{2}$	Dó para Míbb
Terça maior	2	Dó para Mí
Quarta justa	$2 + \frac{1}{2}$	Dó para Fá
Quarta aumentada ou Quinta [$\frac{1}{2}$] diminuta	3	Dó para Fá#
Quinta justa	$3 + \frac{1}{2}$	Dó para Sol
Quinta aumentada ou Sexta menor	4	Dó para Sol#
Sexta maior	$4 + \frac{1}{2}$	Dó para Lá
Sétima menor	5	Dó para Síbb
Sétima maior	$5 + \frac{1}{2}$	Dó para Sí
Oitava	6	Dó para Dó

2.5.3 Sons Harmônicos e a Séria Harmônica

Além disso, geralmente, um som musical não se constitui de apenas uma nota, pois juntamente com o som principal soam notas musicais secundárias que tendem a ser bem fracas, ou mesmo, imperceptíveis. Ou seja, quando tocamos uma corda em um violão, por exemplo, a corda vibrante gera um *som fundamental* e diversos outros *sons harmônicos*, pois enquanto a corda vibra por inteiro, simultaneamente, ela também vibra como se estivesse dividida em duas metades (separadas por um nó), produzindo um som musical uma 8ª (oitava) acima da nota original para cada metade da corda. Como uma reação em cadeia, o fenômeno segue dividindo a corda em “infinitas” metades a partir de cada nova metade. Com isso, além da vibração da corda por inteiro e das duas metades, ela também vibra, simultaneamente, dividindo-se em terços, em quartos, em quintos, etc, ou seja, produzindo as vibrações secundárias ou, como já citado, seus respectivos sons harmônicos. O mesmo acontece quando soprarmos uma flauta, onde os sons

musicais são produzidos pela vibração do ar no interior do tubo (Figura 2.17).

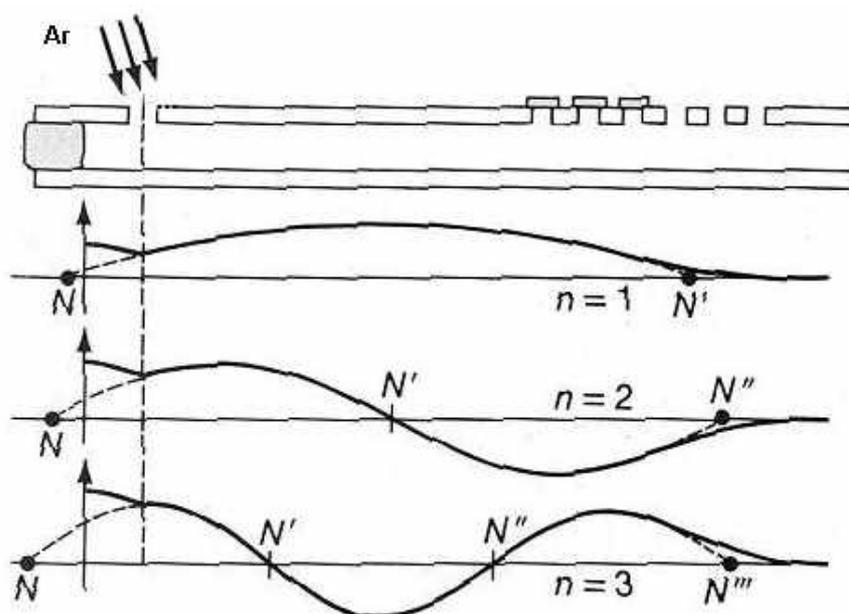


Figura 2.17 - Sons harmônicos (ondas sonoras) produzidos no interior de uma flauta transversal.

Assim, neste caso, por exemplo, se ouvirmos predominantemente a nota dó₃ (ou C₃), estaremos ouvindo levemente, de forma quase imperceptível, seus respectivos harmônicos: mí₃ (ou E₃), sol₃ (ou G₃), sí₃b (ou B₃b), etc; tal que, cada harmônico seguinte é menos perceptível do que seu harmônico anterior e assim sucessivamente. Logo, quando ouvimos uma nota musical estamos, na verdade, ouvindo uma combinação de vários sons musicais que imaginamos ser uma única nota musical pela forte predominância do som fundamental, ou seja, além do tom fundamental, também estamos ouvindo uma superposição de *tons harmônicos* que geram naturalmente *acordes*²² com várias notas de escalas sucessivas que tendem a diminuir sua intensidade rapidamente. Pessoas que possuem grande sensibilidade auditiva e/ou musical podem facilmente identificar um som fundamental e seus respectivos harmônicos ao tocarmos uma nota em um instrumento musical, ao passo que, pessoas que detêm um *ouvido absoluto*²³ podem realizar essa tarefa sem nenhuma dificuldade.

Partindo de uma determinada frequência ν de um som/nota fundamental, o

²² Acorde é um conjunto de notas tocadas no mesmo instante.

²³ Capacidade fictícia que uma pessoa tem de identificar qualquer nota musical acusticamente apresentada ou produzir qualquer nota musical sem a necessidade de uma referência, de acordo com um sistema musical estabelecido.

segundo harmônico tem uma frequência 2ν , o terceiro harmônico 3ν , e assim sucessivamente, ao passo que, tais harmônicos são conhecidos como *intervalos naturais* ou *puros*, enquanto que a razão entre as frequências de dois harmônicos quaisquer é chamado de *intervalo acústico*. Por exemplo, o intervalo acústico entre o segundo e o terceiro harmônicos é igual a $i_a = \nu_3/\nu_2 = 3\nu/2\nu = 3/2$. A essa sequência de sons harmônicos acompanhado de um som fundamental nós chamamos de *série harmônica*, onde toda nota musical gera uma série harmônica proporcionalmente idêntica, formando assim, a *escala natural* ou escala de sons naturais. Assim, para obtermos a sequência de intervalos, observe que, por exemplo, entre o primeiro e o segundo harmônico existe o intervalo $2/1$ que forma uma 8ª (oitava), entre o segundo e o terceiro existe o intervalo $3/2$ que forma uma 5ª (quinta), entre o terceiro e o quarto harmônicos existe o intervalo $4/3$ que forma uma 4ª (quarta), e assim sucessivamente. Assim, utilizando a nota dó com frequência ν_1 como referência, segue abaixo a tabela com os intervalos naturais ν_n/ν_1 entre a nota dó e as demais notas da *escala diatônica maior natural* e os intervalos ν_n/ν_{n-1} entre duas notas consecutivas:

Tabela 2.2 – Proporções entre intervalos sonoros.

Nota	dó	ré	mí	fá	sol	lá	sí	dó
Intervalo	-	2ª M	3ª M	4ª j	5ª j	6ª M	7ª M	8ª j
ν_n/ν_1	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2
ν_n/ν_{n-1}		9/8	10/9	16/15	9/8	10/9	9/8	16/15

Na escala natural também há o intervalo 3ª m (terça menor) com $\nu_n/\nu_1 = 6/5$.

A execução de três notas ao mesmo tempo, como por exemplo, as notas dó-mi-sol, é conhecido como *acorde* e, neste caso, pelo fato das respectivas frequências terem a proporção 4:5:6 entre si, tal acorde é definido como um *acorde perfeito maior* (ou mesmo, dó maior), que soa e passa uma sensação particularmente harmoniosa, assim como os acordes fá-lá-dó e sol-sí-ré. Essa sensação provavelmente é devido à grande *consonância* gerada pelas muitas coincidências²⁴ entre todos os harmônicos das notas utilizadas no acorde. Entretanto, quando dois sons possuem frequências muito próximas mas não

²⁴ Não-dissonância.

coincidentes, isso dá origem ao fenômeno conhecido como *batimento*²⁵, que pode ser intensificado à medida que o intervalo entre os sons aumenta, produzindo, assim, uma sensação áspera e desagradável em nosso ouvido, ao passo que, batimentos de alta frequência são praticamente imperceptíveis. Como sons dissonantes têm batimentos entre si e seus respectivos harmônicos, isso acaba gerando uma sensação desagradável ao ouvirmos um som dissonante.

De acordo com Luís L. Henrique (*Acústica Musical*, página 932),

“Os intervalos naturais não apresentam batimentos de primeira ordem e estão também relacionados com o conceito de consonância da chamada *teoria de Helmholtz*²⁶. Os intervalos mais consonantes correspondem às relações de frequência mais simples: 8ª (2/1); 5ª (3/2); 4ª (4/3). À medida que os números dos harmônicos crescem, diminui o número de parciais cujas frequências coincidem, crescendo também os batimentos de segunda, terceira e ordens superiores, entre os harmônicos (Burns & Ward, 1982) [BURNS, E. M. WARD, W. D. (1982), “Intervals, Scales, and Tuning” in DEUTSCH, Diana (ed.), *The Psychology of Music*, London, Academic Press.]”

Na série harmônica constatamos que há um grande espaçamento, ou mesmo, intervalos maiores entre os primeiros harmônicos e que, à medida que vamos “subindo” pela série, os espaçamentos entre os intervalos vão diminuindo, ou seja, os intervalos entre as notas vão se tornando cada vez menores. Isso é “devido a natureza logarítmica do fenômeno das frequências quando representado de modo linear, como é o caso da notação tradicional de alturas” Lazzarini (1998)²⁷. Desta forma, dizemos que “a percepção se dá logaritmicamente quando é baseada na razão entre dois valores, como neste caso das frequências onde as relações entre as notas (intervalares) são percebidas como razões entre frequências”, Lazzarini (1998)²⁸. Além disso, a série harmônica, na prática, “não tem limite”, onde podemos observar até por volta do 15ª harmônico, cujos intervalos da série são menores que semitons.

25 Um batimento pode ser percebido como uma falha no som.

26 Ver seu grande tratado [REFERÊNCIA, Helmholtz, “Sensações de Tom” / “On the Sensations of Tone”, 1875]

27 Lazzarini (1998), p.28.

28 Lazzarini (1998), p.28.

2.5.4 Escala Natural e Temperada

Na prática, o sistema de intervalos da escala natural não é reproduzido nas teclas de um piano, por exemplo, pois tal escala apresenta certos “problemas” na hora de combinar os sons de diversos instrumentos musicais que estejam afinados na escala natural, pois cada instrumento possui seus harmônicos naturais que não coincidem, necessariamente, com o de outros instrumentos musicais. Além disso, devido à natureza logarítmica da escala natural, ela também apresenta problemas no momento em que se deseja *transpor*²⁹ uma melodia para uma altura ou tom diferente, ou seja, devido a desigualdade dos intervalos na escala natural à medida em que se aumentam a ordem dos harmônicos, caso queiramos transpor uma melodia que tenha como *tônica*³⁰, por exemplo, a nota sol e queiramos escrevê-la no lugar da nota dó, o análogo da nota ré seria $3/2 \times 9/8 = 27/16$ no lugar de $5/3 =$ lá, o que daria uma nova nota lá* com uma relação de frequências $27/16 \div 5/3 = 81/80 = 9/8 \div 10/9$ para a nota lá.

No caso em que uma nota qualquer da escala esteja definida como tônica, para permitir transposições que não soem em falso, isto é, em que não haja a sensação de que “há algo errado”, seria necessário introduzir um grande número de notas intermediárias na escala, tornando impraticável a utilização da afinação natural em um instrumento de teclado fixo como o piano. Para resolver esse problema, devemos utilizar um sistema de afinação baseada em uma escala que chamamos de *escala temperada*, cujos intervalos de 8ª (oitava) são divididos em 12 partes rigorosamente iguais, sendo que cada uma dessas partes nós chamamos de semitom (ou meio-tom) temperado. Assim, o semitom temperado corresponde a $\sqrt[12]{2} = 1,059463094$, ou seja, com uma variação de 6% em relação ao valor do intervalo da frequência natural. A diferença entre outros intervalos naturais e temperados podem ser vistas na Tabela 2.3. Com isso, podemos calcular qualquer intervalo temperado a partir do número de semitons nele contidos, ou seja, por exemplo, como numa 2ª M (segunda maior) há 2 semitons, logo o valor do intervalo da frequência é igual à $1,059463094^2 \approx 1,122$. A afinação temperada é atualmente o principal padrão de afinação utilizado na música ocidental, sendo adotado no século

29 Reescrever uma melodia em outro tom musical.

30 Nota fundamental que determina o centro de todos os movimentos da melodia.

XVIII com o apoio de Johann Sebastian Bach ao publicar em 1722 o livro “O Cravo Bem Temperado” contendo prelúdios e fugas escritos nos 24 tons maiores e menores. Com isso, Bach demonstrou o enorme potencial musical que o temperamento musical poderia proporcionar.

Tabela 2.3 - Comparação do tamanho dos intervalos naturais e temperados.

	dó	ré	mi	fá	sol	lá	si	dó
Intervalo Natural	1	9/8 (1,125)	5/4 (1,250)	4/3 (1,333)	3/2 (1,500)	5/3 (1,667)	15/8 (1,875)	2
Intervalo Temperado	1	1,122	1,260	1,335	1,498	1,682	1,888	2,000

Com isso, segue abaixo a série harmônica para a nota dó escrita na pauta musical com os devidos valores das frequências dos harmônicos tanto para a afinação natural quanto para a afinação temperada:

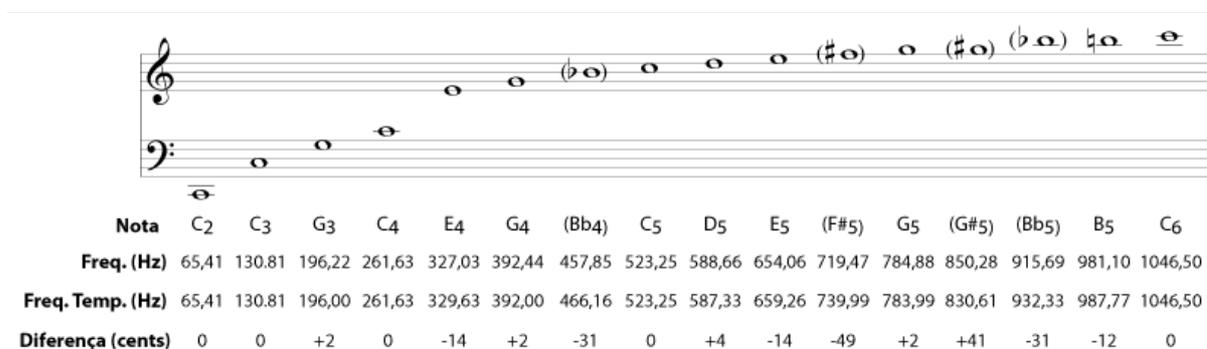


Figura 2.18 – Série Harmônica escrita na pauta musical, começando pela clave³¹ de Fá e “subindo” pela clave de Sol.

2.5.5 A Unidade Cents (¢)

Observando a série harmônica na Figura 2.18, notamos a diferença entre as frequências das notas em *cents*. A unidade cents é utilizada para quantificar intervalos e comparar pequenas diferenças entre afinações, sendo definido como a

³¹ Clave é um símbolo que costuma ser escrito no início das pautas musicais com o propósito de determinar o sistema de notas a ser utilizado. No caso, a clave de Sol (na pauta de cima da Figura 2.15) determina que a nota sol está localizada na segunda linha de baixo para cima na pauta, enquanto que a clave de Fá (na pauta de baixo da Figura 2.15) determina que a nota fá está localizada na segunda linha de cima para baixo na pauta.

centésima parte do semitom temperado ou a partir da divisão do intervalo de 8ª (oitava) em 1200 partes iguais, ou seja,

$$1\phi = \sqrt[100]{1,059463094} = \sqrt[1200]{2} = 1,00057779 \quad (2.30)$$

Assim, sendo i_a o intervalo acústico entre dois sons e i_c o número de cent (ϕ) desse intervalo

$$i_a = \sqrt[1200]{2^{i_c}} = 2^{\frac{i_c}{1200}} \quad (2.31)$$

Aplicando logaritmo em ambos os lados obtemos

$$i_c = 1200 \frac{\log(i_a)}{\log(2)} \approx 3986 \log(i_a) \quad (2.32)$$

Com isso, calculamos facilmente um intervalo acústico i_a em cent (ϕ) e definimos as diferenças de tamanho entre diversos sistemas de afinação relativas ao temperamento igual.

Tabela 2.4 - Tabela da escala cromática temperada em cent (ϕ)

Nota	dó	dó#	ré	mib	mi	fá	fá#	sol	láb	lá	síb	si	dó
cent (ϕ)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200

2.5.6 O Timbre e o Espectro de um Som

Com tantos sons e harmônicos imaginamos a enorme quantidade de possibilidades sonoras existentes. Vimos que um som pode ser caracterizado pela sua duração, pela sua intensidade e pela sua altura, mas isso ainda não é o suficiente para a sua compreensão, pois a estrutura do som é de uma natureza muito mais complexa. Por exemplo, mesmo que uma flauta e um piano toquem uma mesma nota musical de forma idêntica em relação ao som fundamental, o som que

percebemos de cada instrumento soa diferente, tal que, sabemos distinguir o som de uma flauta e de um piano mesmo que não estejamos vendo-os. Da mesma forma, associamos o som da voz de uma pessoa à mesma pessoa, pois cada pessoa possui uma característica específica em sua própria voz que depende de diversos fatores. Assim, percebemos que dois sons musicais que possuam a mesma intensidade e altura ainda podem ser diferentes. Logo, para distinguir os diversos sons produzidos tanto por instrumentos musicais quanto por outras fontes sonoras, nós utilizamos uma qualidade auditiva que chamamos de *timbre*, ou *cor sonora*, sendo esse um atributo muito importante da acústica musical.

O timbre seria como uma “impressão digital” de um som e, pela sua grande complexidade em ser quantificado, ele acaba sendo uma característica muito subjetiva do som, sendo menos “esclarecido” fisicamente que as sensações de altura e intensidade, pois mesmo que o ouvido reconheça uma mesma nota de duas ondas sonoras com o mesmo período e frequência (fundamental), os perfis das ondas podem ser muito distintos.

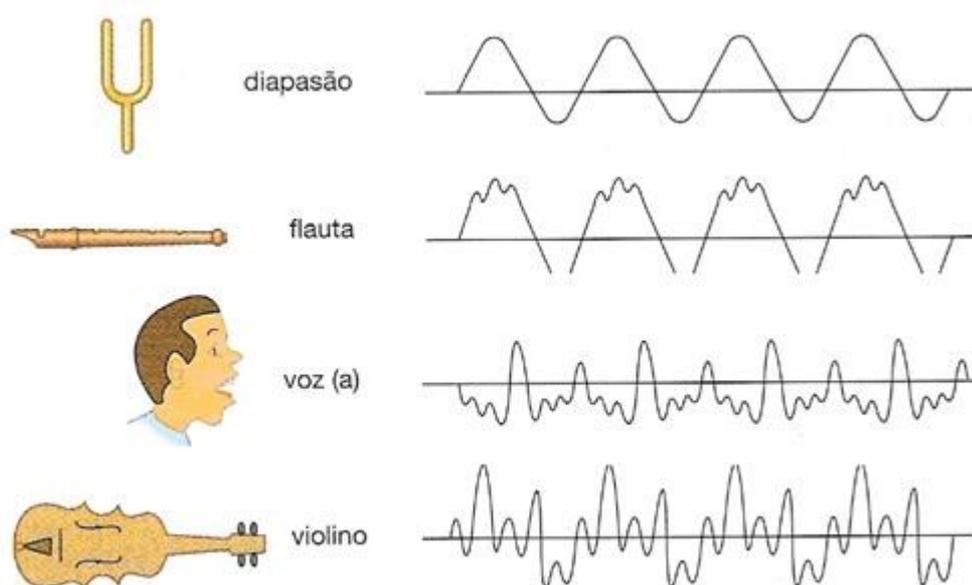


Figura 2.19 - Ondas sonoras de mesma frequência e diferentes timbres produzidas por diversas fontes.³²

³² Retirado de Panzera & Moura (2009).

De acordo com Henrique (2002)³³,

O timbre resulta da correlação subjetiva de todas as propriedades do som que não influenciam diretamente a altura e a sensação de intensidade, tais como: envolvente temporal, distribuição de energia espectral, grau de inarmonicidade dos parciais e frequência (Houtsma et al., 1987) (alguns destes aspectos são ilustrados pelos autores através de exemplos sonoros).”, tal que, “O transitório de ataque, que corresponde aos primeiros instantes representados na envolvente temporal, é fundamental para a caracterização do timbre de um instrumento.”

Helmholtz (1998) caracteriza os sons como sendo uma forma de onda arbitrária fechada em um envelope (ou envoltório) de amplitude constituída de três partes: o tempo de crescimento ou ataque (início), o período estável (meio) e o tempo de queda (fim). O ataque é o tempo em que a amplitude (intensidade) de um som leva para sair de zero e chegar até o seu valor de pico. O período estável é onde a amplitude é idealmente constante (o som propriamente dito) e o tempo de queda é o momento posterior ao período estável em que o som vai a zero. Assim, o envelope de amplitude é a maneira em que a amplitude de um som varia no tempo, sendo assim, uma característica muito importante para a caracterização de diferentes sons e, conseqüentemente, seu timbre.

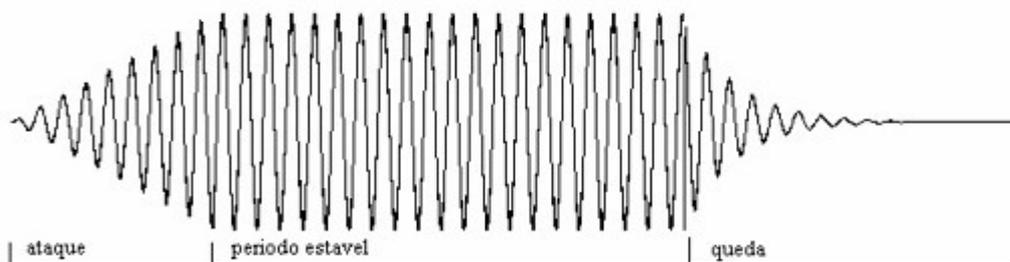


Figura 2.20 – Períodos e/ou etapas de uma onda.³⁴

Helmholtz descobriu que os sons que possuem a sensação definida de altura, ou seja, que possuam um tom ou nota definida, são ondas periódicas. Além disso, ele utilizou a teoria de Fourier (ver tópico adiante) para descrever como a forma de

33 p.871.

34 Lazzarini (1998), p. 31.

uma onda se relaciona com o seu respectivo timbre, ou seja, como qualquer onda periódica pode ser decomposta em um conjunto único de componentes senoidais (e vice-versa), a partir da *série de Fourier* nós podemos representar uma determinada onda associada a um som musical como sendo a combinação da componente associada ao som fundamental de frequência ν_1 com suas respectivas componentes associadas aos sons harmônicos $\nu_n = n \nu_1$, com $(n=2,3, \dots)$, onde cada componente senoidal será caracterizada por três parâmetros: frequência, amplitude e fase relativa à componente fundamental (as relações de fase têm um efeito menor na percepção do timbre). Assim, o timbre de um som seria a somatória do seu som fundamental com o seus respectivos harmônicos. Helmholtz também concluiu que o *espectro de onda*, uma representação gráfica da relação entre a amplitude e a frequência das componentes senoidais de uma onda sonora³⁵, tem uma correlação muito simples com o timbre de um som. Entretanto, de acordo com Faria (1997)³⁶, “O espectro e o timbre são conceitos relacionados, mas não equivalentes, Roads (1996). O espectro refere-se às propriedades físicas (a distribuição da energia em função da frequência) dos sons musicais. As ferramentas computacionais de análise baseadas no espectro tradicional encontram limites em tarefas de alto nível em musicologia, como análise de estilos, percepção e identificação de características em interpretações musicais.”

35 Até então, havíamos visto apenas a representação gráfica da variação da amplitude de pressão proporcionada pelo movimento das moléculas de um certo ponto do espaço em um certo espaço de tempo. Essa representação é chamada *domínio temporal* ou *do tempo*.

36 p.50.

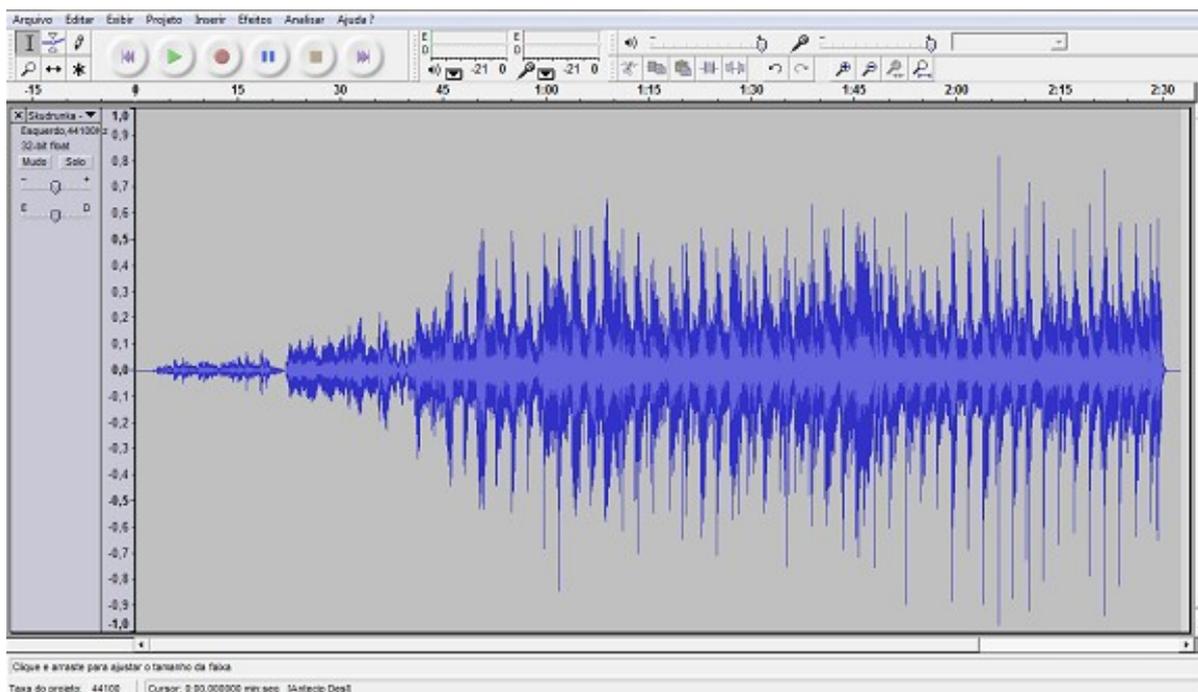


Figura 2.21 – Representação do espectro de um arquivo de áudio a partir do programa de computador Audacity 1.2.6.

Entre os músicos, os aspectos do timbre têm uma conotação muito mais qualitativa e subjetiva, ao ponto de ser tornar um problema no momento em que faz-se necessário descrever uma obra ou escrever uma partitura. Para resolver tais questões, são utilizadas expressões associadas à sensações, na maioria táteis ou visuais, como sons brilhantes, escuros, aveludados, metálicos, quentes, doces, etc.

Pela teoria de Helmholtz, “a descrição qualitativa de um som brilhante correlaciona-se com espectros que possuem muita energia nas frequências altas, ou seja componentes agudas com amplitudes bem significativas. Sons com harmônicos pares faltando são auditivamente relacionados com aqueles do clarinete. A maioria dos sons percussivos têm espectros que não são harmônicos (ou seja fora das relações de números inteiros), como por exemplo, os sinos, que possuem um espectro altamente inarmônico. Alguns instrumentos possuem harmônicos levemente 'desafinados', o que contribui para a riqueza de certos timbres, como o piano”, Lazzarini (1998)³⁷.

37 p.32.

2.6 A Flauta

A flauta, assim como os instrumentos de percussão, é um dos instrumentos mais antigos no qual tem-se conhecimento. Pertencente à família dos instrumentos de *sopro*, a flauta é tradicionalmente associada à *família das madeiras*³⁸ (que inclui oboé, clarineta e fagote), devido ao material em que eram construídas no passado, ao passo que, hoje em dia há flautas de diversos tipos de materiais como: metais, madeiras, plásticos, fibra de carbono, etc.



Foto 2.1 – Diversos tipos de flautas.

Seu formato mais comum é de um tubo, podendo ser *cônico* ou *cilíndrico*, com uma série de orifícios no decorrer de sua extensão com o propósito de controlar a *variação do comprimento acústico efetivo* do tubo a partir do fechamento ou abertura de cada orifício com os dedos ou através de *chaves* acopladas ao instrumento, tal que, o arranjo, ou mesmo, o posicionamento dos dedos sobre os furos são chamados de *posições* ou *dedilhados*.

Como a flauta comporta-se como um tubo aberto-aberto vibrante, ao variar seu comprimento acústico efetivo varia-se, também, o comprimento da coluna de ar vibrante no interior do tubo e, conseqüentemente, seus modos de vibração, obtendo assim, uma seqüência de tons e semitons com sua respectiva série harmônica. Sons produzidos por tubos de embocadura direta, como na flauta, tendem a produzir

³⁸ Apesar da maioria das flautas utilizadas hoje serem de metal ou de plástico, sua classificação como sendo da família das madeiras ainda se mantém por questões de tradição. Antes dos século 20 a maioria das flautas de concerto eram feitas de madeira.

pouquíssimos harmônicos, proporcionando assim, sons doces e suaves³⁹. Uma característica marcante da flauta, assim como a maioria dos instrumentos de sopro⁴⁰, é a sua impossibilidade de produzir acordes, isto é, emitir mais de uma nota musical simultaneamente, gerando assim, uma combinação de vários sons musicais fundamentais.

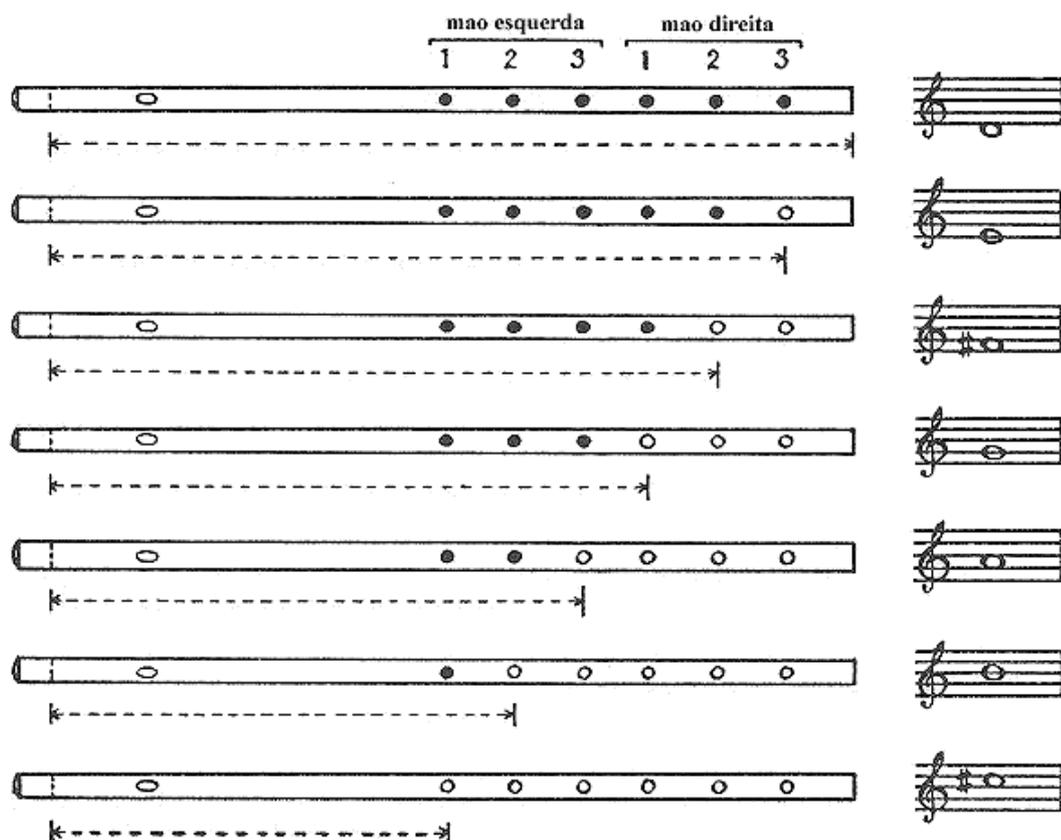


Figura 2.22 - Flauta básica: dedilhado e respectivos tons produzidos. A flauta representada está afinada a partir da nota ré.⁴¹

As flautas, sendo instrumentos com embocadura de aresta, contam com um mecanismo simples de produção do som, que consiste em incidir um jato de ar contra uma aresta, isto é, “o som resulta do acoplamento entre um jato hidrodinamicamente instável e um campo acústico ressonante que se cria num tubo” , Verge (1995) - ver Figura 2.23. Ou seja, “O músico injeta no instrumento um jato de ar constante, e a instabilidade dos vórtices torna esse jato instável originando a

39A classificação dos sons como sensações é algo comum entre os músicos, como já discutido no tópicos “Sons Musicais”.

40 Uma exceção bem conhecida, neste caso, fica por conta do instrumento musical chamado *escaleta*, que combina características dos instrumentos de sopro com o sistema de teclas do piano.

41 Retirado de Faria (1997), p.53.

oscilação do ar no bisel ou na aresta da embocadura.”, Henrique (2002)⁴². Logo o sistema se torna auto-excitado à medida que a excitação se torna oscilatória como uma resposta do tubo. Apesar da geometria da embocadura envolvida ser muito simples, durante a estimulação do tubo são gerados diversos fenômenos físicos complexos como: não-linearidade associadas à formação de vórtices e à instabilidade do jato de ar. Além disso, “O início do transitório de ataque é um período fundamental do ponto de vista da percepção sonora (Verge et al., 1994).”, Henrique (2002)⁴³.

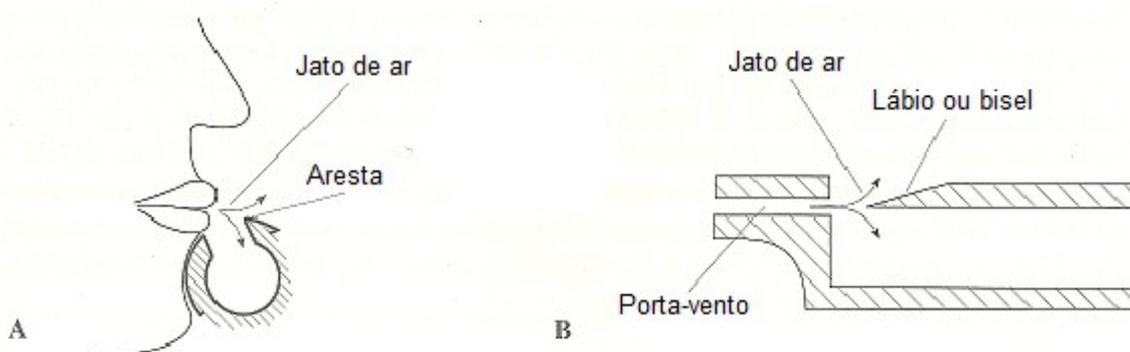


Figura 2.23 - Tipos de embocadura de aresta. A - Na flauta transversal o músico direciona o jato de ar para uma aresta do orifício da embocadura; B - Na flauta doce (ou de bisel) e nos tubos flautados de órgão, o jato de ar passa no porta-vento e incide contra o lábio.⁴⁴

Os modelos mais conhecidos e comumente encontrados hoje em dia na música ocidental são a flauta doce (ou flauta de bisel) e a flauta transversal, sendo que, seus princípios de produção de som são os mais utilizados pela imensa maioria das flautas existentes. Tanto a flauta doce como a flauta transversal são constituídas de três partes: cabeça, corpo e pé – Figura 2.24 e Foto 2.2 respectivamente.

42 p.536.

43 p.538.

44 Retirado de Henrique (2002), p.536.

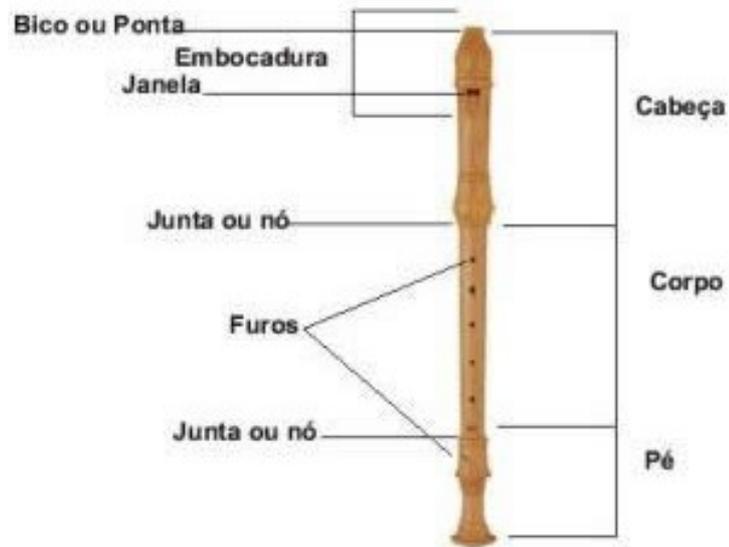


Figura 2.24 – Elementos da flauta doce.



Foto 2.2 – Flauta transversal desmontada. Da esquerda para a direita: bocal ou cabeça da flauta, corpo da flauta e pé da flauta.

2.6.1 A Flauta Doce

A flauta doce, ilustrada na Foto 2.3, sendo um dos instrumentos mais populares na Europa durante a Idade Média, consiste em um tubo cônico aberto em ambas as extremidades (tubo aberto-aberto) com sete orifícios para os dedos e um orifício (na parte “de baixo”) para o dedo polegar com o propósito de alternar o som produzido entre as notas (sons) fundamentais e suas respectivas oitavas (sons

harmônicos - mais agudos), sendo que, a *tessitura*⁴⁵ normal da flauta doce abrange duas oitavas de extensão normal (registro). Ela é o instrumento mais desenvolvido entre a antiga família das flautas de tubo interno, flautas com uma janela (caminho do ar - “windway”) fixa formada por uma peça de madeira chamada de bloco.



Foto 2.3 – Flauta doce contralto montada.

Na Foto 2.4 podemos observar que há flautas doces de diversos tipos de tamanho. As mais comuns são afinadas em dó (tipos: soprano e tenor) ou fá (tipos: sopranino e contralto)⁴⁶. Neste trabalho, estaremos utilizando a cabeça de uma flauta doce do tipo contralto da marca Yamaha (modelo YRA-27) para a realização de nossas experiências.



Foto 2.4 – Modelos e tipos de flauta doce diferentes fabricados pela Yamaha. Classificação (por ordem de tamanho, da esquerda para a direita): sopranino, soprano, alto (ou contralto), tenor e baixo.

⁴⁵ Extensão das notas musicais possíveis em um instrumento musical, isto é, a nota mais baixa (de menor frequência) e a nota mais alta (de maior frequência) que pode ser executada.

⁴⁶ Isso significa que a sua nota mais grave é um dó ou um fá e que elas seguem a estrutura de intervalos da *escala maior* de acordo com a sua nota mais grave.

Ao contrário da flauta transversal, na flauta doce não é necessário o uso de qualquer tipo de técnica para a produção de som, pois sendo semelhante a um apito, basta que o músico simplesmente fixe seus lábios no bocal e sopre suavemente, o que também impede o uso de diversas técnicas⁴⁷ utilizadas pela flexibilidade de *embocadura*⁴⁸ existente na flauta transversal.

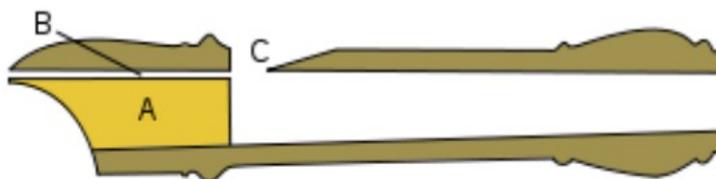


Figura 2.25 – Geometria acústica do bocal de flauta doce.

Em tal sistema, de acordo com a Figura 2.25, no bocal do instrumento o sopro do/a instrumentista é comprimido em um fluxo de ar linear que passa por um pequeno duto (B), chamado "windway" (caminho do ar), localizado sobre um "bloco" de plástico ou madeira (A). Ao sair do "windway", o fluxo de ar é dirigido contra uma aresta (C), também conhecido como "labium" (lábio) ou "ramp" (rampa), o que faz com que a coluna de ar dentro do tubo ressoe com a frequência desejada, de acordo com o comprimento da coluna de ar estabelecida pela digitação (ou posição) dos dedos utilizada na flauta, Bolton (2009).

2.6.2 A Flauta Transversal

A flauta transversal, ou flauta de Boehm⁴⁹, consiste em um tubo cilíndrico aberto em ambas as extremidades (tubo aberto-aberto) com, tipicamente, 16 orifícios que são abertos ou fechados com o uso de chaves ("tampas" de vedação articuladas por pequenas alavancas com molas). Os valores mais comuns de comprimento e diâmetro interno do tubo costumam ser 67 cm e 19 mm

47 "O controle da entonação na flauta é manejado na embocadura pelos lábios e pela regularidade do fluxo de sopro. Existem amplas possibilidades de se impor efeitos especiais e modulações simplesmente alterando-se a pressão do sopro, a disposição dos lábios sobre o bocal, o formato da abertura labial e o ângulo do sopro em direção à fenda do bucal." Faria (1997), p.54.

48 "A embocadura refere-se à formação dos lábios e músculos vizinhos, de forma a produzir um tom em instrumentos de sopro. A disposição dos lábios, maxilar, queixo e garganta é extremamente importante na formação de uma embocadura correta para guiar o sopro para a flauta transversal." Faria (1997), p.54

49 Para mais detalhes em relação à acústica da flauta de Boehm, ver Coltman (1979)

respectivamente.



Foto 2.5 – Flauta transversal montada.

A tessitura normal da flauta transversal (soprano) abrange três oitavas (ou regiões: grave, média e aguda) de extensão normal (registro), indo do $dó_4$ (dó central no piano – 262 Hz) até o $dó_6$ (2096 Hz), sendo que alguns\mas flautistas experientes podem chegar até o $dó_7$ (4192 Hz). Os sons de $dó_4$ até $dó\#_5$ são obtidos como sons fundamentais, enquanto que os sons harmônicos (mais agudos), são obtidos através da conveniente modificação da configuração dos lábios e pressão do sopro, diferentemente da flauta doce, onde a execução dos sons harmônicos (à partir da segunda oitava) são controlados, principalmente, pelo dedo polegar no orifício localizado na parte de “baixo” da flauta.

Sendo um instrumento de embocadura direta, onde os lábios do executante dirigem uma corrente de ar diretamente sobre a aresta formada na borda do orifício localizado na cabeça da flauta, a flauta transversal permite o uso de diversos efeitos a partir de técnicas utilizando o manejo da embocadura. Devido a essa característica de grande “subjetividade musical” imposta pela embocadura, o som da flauta transversal é determinante de acordo com o músico que a utiliza. Logo, tal característica é indesejada quanto à avaliação de como o material pode interferir de forma significativa no som de uma flauta transversal a partir da análise do som produzido por diversos músicos que utilizam uma mesma flauta. Para eliminar tal problema, uma possibilidade é o uso de um soprador acoplado a um trato vocal artificial, como visto no trabalho de Coelho (2008), onde poder-se-ia eliminar qualquer tipo de influência humana.

2.7 Influência do Material da Flauta

2.7.1 Estudos Anteriores

Historicamente, Mersenne⁵⁰ é o primeiro autor a fazer referência, no século XVII, aos diferentes materiais utilizados na fabricação de flautas e a observar alguma influência dos materiais no timbre do instrumento. Nos últimos 40 anos, foram publicados uma série de artigos científicos abordando o tema, não somente para a flauta, mas também para vários outros instrumentos musicais

As primeiras pesquisas realizadas com o propósito de analisar as vibrações de instrumentos de sopro, em especial, foram publicadas em 1964 e conduzidas por John Backus da University of Southern California, Backus (1964), tal que, as pesquisas foram iniciadas em torno do clarinete, mas logo o trabalho foi estendido à outros instrumentos de sopro. Backus observou que a magnitude das vibrações das flautas foram menores do que nos instrumentos de palheta, sendo que, quatro flautas foram utilizadas em seus experimentos: (1) Espessura: 0,012" (0,3 mm); Material: liga semelhante às utilizadas em moedas de prata; (2) Espessura: 0.014" (0,36 mm); Material: ouro; (3) Espessura: 0,020" (0,51 mm); Material: idem ao (1); (4) Uma flauta contralto de prata. A magnitude das vibrações foram medidas em vários locais diferentes de cada instrumento, ao passo que, cada local foi medido utilizando-se vários *pitchs*⁵¹ diferentes (as medidas do som foram realizadas à 3" ou 76,2 mm de distância do orifício da embocadura da flauta). Em seguida, comparando esses valores com o nível sonoro (intensidade) produzido pelos instrumentos a uma distância de 1 ft (91,44 cm), Backus determinou que qualquer som irradiado devido à influência das vibrações dos instrumentos musicais foi irrelevante no som quando comparado ao som normal produzido pelo próprio instrumento. Ele também pesquisou a possibilidade das vibrações dos instrumentos afetarem as ressonâncias da coluna de ar em si, mas este teste foi realizado apenas em clarinetes. Assim, Backus concluiu que "A vibração das paredes de um instrumento de sopro não afeta seu tom normal nem a radiação do som ou sua estrutura harmônica".

Alguns anos mais tarde, John W. Coltman de Pittsburgh realizou algumas

50 Marin Mersenne (1588-1648) – matemático, teórico musical, padre, teólogo e filósofo francês. Escreveu os livros, *Harmonie universelle*, em 1636; e *Harmonicorum*, em 1648.

51 Pitch é o maior atributo auditivo utilizado para a identificação e classificação de tons musicais, onde a duração, a intensidade e o timbre também são considerados.

pesquisas com um foco mais direcionado à influência dos materiais em si, publicando seus primeiros resultados em 1971, Coltman (1971). Para a realização de suas experiências Coltman construiu três flautas, cada uma contendo um bocal de plástico próprio, porém idêntico (mesmas geometrias acústicas), com tubos sem chaves (orifícios) e com as seguintes características: (1) Espessura: 0,36 mm; Material: prata; (2) Espessura 1,53 mm; Material: cobre; (3) 4,1 mm; Material: madeira “grenadilla” (granadilha). Com isso, Coltman realizou um teste de audição: ele tocou uma frase musical três vezes por trás de uma tela e solicitou aos participantes que identificassem qual frase musical havia sido tocada para cada flauta diferente. Além disso, como forma de tornar a experiência mais imparcial, Coltman adaptou as três flautas em um aparelho giratório de tal forma que o executante e o público pudessem ver apenas os bocais idênticos de plástico e, portanto, não identificar qual instrumento estaria sendo tocado no momento. Os flautistas convidados tocaram as três flautas “invisíveis” e indicaram sua preferência pessoal para cada flauta. O aparelho foi girado de forma aleatória e as participantes então foram convidados a identificar sua seleção original, isto é, sua ordem de preferência anterior. Ao final, análises estatísticas concluíram que a taxa de acerto para ambos os ensaios diferiram apenas ligeiramente de acordo com os resultados esperados pelo método de adivinhação aleatória⁵².

Joan Lynn White, atualmente professor de flauta e oboé em Appalachian State University, também abordou a influência do material no som em sua tese de doutorado pela University of North Carolina-Greensboro em 1980, White (1980). Cinco flautas foram construídas pelo mesmo fabricante com as seguintes características idênticas: comprimento, diâmetro, espessura da parede, orifício da embocadura e orifícios de tom. O tipo de material (e seu peso subsequente) dos tubos foi a única variável restante em todo o conjunto de flautas, tal que, os materiais utilizados foram: paládio, ouro branco, ouro 14K e duas de prata esterlina. Dois flautistas profissionais tocaram todas as cinco flautas dentro de uma câmara anecoica (à prova de ecos acústicos), onde foram convidados a tocar a nota sol em cada um dos três registros da flauta (lembrando que a flauta transversal contém três oitavas ou regiões sonoras) em dois níveis dinâmicos. Para a gravação e a análise do áudio foram utilizados dois microfones de condensador na câmara anecoica

52 Mais discussões sobre os resultados em Coltman(1973)

conectados a um analisador de espectro em uma sala adjacente. White determinou que o conteúdo harmônico do som diferiu apenas entre os flautistas.

Em 1990, uma equipe na Índia observou os padrões de vibração de algumas flautas utilizando uma técnica de holografia convencional para calcular o tempo médio entre os interferogramas, Kumar (1990). Os instrumentos utilizados foram flautas indianas feitas de bambu com oito orifícios cada. As flautas foram tocadas (estimuladas) por uma “fita de ar” através de um bocal feito de vidro e borracha que eram levemente apertados em suas extremidades. Foram coletados diversos dados referentes aos padrões de vibração referentes aos diferentes dedilhados (posições dos dedos nos orifícios) utilizados nas flautas, assim como suas frequências e pressões de sopro. Entretanto, nenhum dado foi interpretado.

Em 1998, Alessandro Cocchi e Lamberto Tronchin apresentaram alguns resultados durante uma exposição da Acoustical Society of America, Cocchi & Tronchin (1998). Seus estudos analisaram respostas de impulso no domínio do tempo e da frequência utilizando um microfone posicionado dentro da flauta. Apenas dois instrumentos foram utilizados: um da marca Bundy com uma liga de níquel-prata-cobre e outra de prata da marca Muramatsu. As análises identificaram que a flauta da marca Bundy continha mais “reverberação”, enquanto que a flauta da marca Muramatsu continha componentes de frequência mais alta. Nenhuma mudança foi observada para diferentes posições do microfone. Os autores identificaram uma “notável diferença entre as duas flautas [na] qualidade do som”, mas não realizaram comentários ou análises sobre as possíveis causas de tal diferença sonora.

Em 1999, Clare M. Hurtgen, em seu trabalho de conclusão de curso pela Duke University desenvolveu alguns métodos que foram adotados neste trabalho, como o uso do bocal de flauta doce estimulado por um soprador artificial. Seu intuito inicial era realizar estudos em torno da influência do material no som da flauta, mas por uma série de dificuldades em encontrar tubos com as mesmas espessuras e diâmetros internos (o que também aconteceu neste trabalho), ela acabou estudando a vibração de tubos do mesmo material e de mesmas dimensões, mas com quantidades diferentes de furos laterais. A amplitude e a fase das componentes harmônicas do sinal de vibração do corpo (tubos) foram medidos com um equipamento de gravação stereo. Os resultados demonstraram a existência de

padrões complexos de vibração nas proximidades dos furos laterais da parede dos tubos nas frequências que correspondem à harmônicos significativos da coluna de ar. Além disso, foi constatado que a parede dos tubos expandiam de forma não-uniforme, ou mesmo, de forma "elíptica" devido à assimetria dos furos laterais.

Em 2001, Renate Linortner, em sua dissertação de mestrado pela Universidade de Música e Performance Artística de Viena (Universität für Musik und Darstellende Kunst Wien), realizou um estudo com a percepção sonora de 110 (cento e dez - !) flautistas utilizando 7 (sete) flautas de materiais diferentes. Curiosamente, o preço dos instrumentos utilizados variavam entre 3.000 e 73.000 euros (!). Cada flauta foi tocada por cada flautista sem que eles soubessem qual instrumento estava sendo testado. As análises sonoras apontaram diferenças mensuráveis, mas não perceptíveis (menos que 0,5 dB) na intensidade sonora e na “cor do som” (timbre) dentre os tons executados.

Em 2010, Shari Simpson de Almeida apresentou uma dissertação de mestrado à Faculdade de Música da UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais) sob o tema “A Influência da Rolha de Cortiça e do Stopper de Nylon na Qualidade Sonora da Flauta Transversal: A Percepção de um Grupo de Flautistas”, onde ela buscou verificar a percepção de 23 flautistas que comparavam o som produzido pela flauta transversal utilizando-se dois bocais distintos, um com uma rolha de cortiça e outro com um modelo de vedação feito de nylon (chamado de stopper)⁵³, fabricado em São Paulo, pelo luthier Luiz Carlos Tudrey. Cada flautista executou cinco trechos musicais e respondeu a um questionário com 22 perguntas referentes aos trechos tocados, onde em 84% das perguntas realizadas, os flautistas perceberam diferenças sonoras no som produzido com a utilização do stopper e da rolha. “Apesar desse alto índice de percepção de diferenças, a preferência pelo uso do stopper foi apenas 4% maior do que a preferência pela rolha. Além dessa análise geral dos dados, foram feitos gráficos e cálculos de porcentagem específicos, referentes a cada um dos trechos musicais e a cada resposta obtida por meio dos questionários.”, Almeida (2010)⁵⁴. Também foram realizados diversos *espectrogramas*⁵⁵ para comparação sonora dos áudios gravados. Com isso,

⁵³ Tanto a *rolha de cortiça* como o *stopper* são pequenas peças utilizadas na extremidade próxima à embocadura da flauta transversal com o propósito de vedar a passagem de ar em tal extremidade.

⁵⁴ p. 6.

⁵⁵ O programa utilizado para a realização de tais espectrogramas é o mesmo utilizado neste trabalho. Ver adiante.

“Constatou-se, no entanto, que não é possível definir um padrão de ocorrência e intensidade de harmônicos da rolha ou do stopper, e que as diferenças observadas nos espectrogramas são mais significativas de flautista para flautista, do que de rolha para stopper.”, Almeida (2010)⁵⁶.

2.7.2 Materiais e Acústica

O material mais utilizados na construção da flauta doce costumam ser o plástico para os modelos mais simples, como as flautas doce encontradas em escolas para o ensino de música, e a madeira para os modelos profissionais.

Na flauta transversal são utilizadas diversos tipos de ligas metálicas polidas contendo, principalmente níquel, cobre e zinco para os modelos mais simples e prata, platina e ouro para os modelos profissionais, sendo que, é muito comum encontrar flautas feitas de prata maciça, ou seja, “como a prata pura não tem dureza suficiente para ser usada na construção do instrumento, utiliza-se habitualmente uma prata de 900 em 1000 partes, em que as restantes 100 partes são à base de cobre, composição semelhante à das moedas de prata (Fletcher & Rossing, 1998)”, Henrique (2002)⁵⁷.

Além disso, até a metade do século XIX as flautas transversais eram tipicamente de madeira ou bambu (por isso as flautas são associadas à família das madeiras entre os instrumentos musicais), ao passo que, a madeira utilizada na construção de flautas, tanto doces quanto transversais, costumam passar por um processo de tratamento. Há vários métodos de tratamento da madeira para se evitar o efeito da porosidade do material, dentre eles, impregnar a madeira de parafina injetada à alta pressão⁵⁸, Henrique (2002)⁵⁹.

No caso da flauta transversal, muitos flautistas profissionais tendem a utilizar flautas construídas utilizando materiais mais caros com a ideia de que tais materiais proporcionam uma melhor sonoridade e potência de som, mesmo que “a maioria dos

56 Iden. 54.

57 p.535.

58 Luthiers de flautas de bambu costumam realizar o corte do bambu durante a lua crescente, sob a afirmação de que a seiva do arbusto esteja “em alta”, diminuindo assim, a porosidade do material. Além disso, podem deixar os bambus mergulhados em água corrente (se parada, deve-se trocar a água todos os dias) por dias ou semanas ou, inclusive, mergulhá-los em óleo fervente com o objetivo de deixar o bambu mais rígido e/ou diminuir sua porosidade.

59 p.535, rodapé n. 5.

investigadores afirma [afirmem] que o material utilizado tem apenas uma influência secundária na qualidade sonora (Widholm *et al.*, 2001).” Henrique (2002)⁶⁰, sendo que, “a diferença de qualidade que os músicos constatam, depende muito mais de aspectos de fabrico [fabricação] do que do material em si (Coltman, 1971; Fletcher & Rossing, 1998)”, Henrique (2002)⁶¹. Com isso, pelo fato de muitos\as flautistas não terem condições de adquirir uma flauta inteiramente feita com metais nobres como prata, ouro ou platina, muitos\as tem optado por utilizar apenas um bocal (cabeça da flauta) de melhor qualidade, no quesito material e mão de obra utilizada, no corpo de uma flauta mais econômica pelo fato da cabeça da flauta ser a parte mais crítica na definição do som do instrumento.

De acordo com Faria (1997)⁶²,

“Existem flautas construídas da mais variada gama de materiais, incluindo prata, ouro, platina, madeiras, e até vidros e materiais cerâmicos. A extensão da influência do material sobre a qualidade do timbre é um campo ainda inconclusivo, embora na prática, por exemplo, hajam suficientes indicativos de que bocais de prata ou platina produzem tons mais claros e límpidos. Por outro lado, o artífice, o projeto, a perícia na manufatura e o acabamento, estes indubitavelmente são preponderantes sobre a qualidade final do timbre do instrumento.”

Enquanto que Vasconcelos (2002)⁶³ afirma,

“Sabemos que o timbre de um instrumento depende, de alguma forma, do material com o qual é construído. O som caminha com velocidade muito maior nas paredes do material de que é construído o instrumento do que no ar. Por este motivo, alguns harmônicos de frequências muito elevadas são excitados mais facilmente num instrumento cujas paredes são de prata. Nestas condições, o instrumento terá um som mais brilhante.”

60 p.536.

61 p.536.

62 p.52, rodapé n. 29.

63 p.93.

Em relação ao tubo em si, notamos que a espessura dos tubos de metal utilizados na construção das flautas tendem a ser muito mais finas do que as espessuras dos tubos de madeira, sendo que a parede do tubo utilizado deve ser suficientemente rígida para desconsiderarmos os efeitos de sua vibração (Fletcher & Rossing, 1998), ao passo que, a vibração mecânica do tubo torna-se desprezível para tubos não muito grandes (Miklós & Angster, 2000). Além disso, estudos indicam que os efeitos de viscosidade e condução de calor no tubo (tanto de metal quanto de madeira) influenciam muito mais em sua atenuação sonora do que o tipo do material utilizado. Assim, o que podemos observar hoje é que “A escolha dos materiais para a construção do instrumento de sopro não é feita por critérios acústicos [,] mas sim pela facilidade de fabricação, estabilidade, manuseamento e aparência estética, (Fletcher & Rossing, 1998).” Henrique (2002)⁶⁴.

No entanto, existem muitas controvérsias de como o material pode influenciar de forma significativa no som da flauta, sendo esse um tema que ainda está em ampla discussão, ao ponto de se tornar um grande dilema entre músicos e cientistas atualmente. Entretanto, um argumento amplamente utilizado é de que a influência do material faz muito menos diferença na qualidade do som do que diferentes flautistas tocando uma mesma flauta, Linortner (2001), ou seja, como dito por Verne Q. Powell, um importante luthier de flautas, “As far as tone is concerned, I contend that 90 percent of it is the man behind the flute”, *Woodwind World* (1974)⁶⁵.

2.8 Análise e Processamento de Sinais⁶⁶

Vivemos em um mundo repleto de símbolos e formas que ganham um certo sentido para cada análise ou interpretação. Assim como os sinais sonoros que são captados pelos nossos ouvidos são devidamente interpretados pelo nosso cérebro, a partir de nossos conceitos formados em torno do significado do som, os sinais eletromagnéticos são amplamente utilizados pelos aparelhos de telecomunicações para a troca e transmissão de informações. Ou seja, um sinal pode conter e/ou

64 p.535.

65 v.13, n. 3.

66 “Os termos análise de sinais, tratamento de sinais e processamento de sinais são usados muitas vezes indistintamente, como sinônimos. No entanto é mais lógico que se faça uma distinção entre a *análise de sinais*, que apenas conduz à extração da informação neles contida sem os modificar, e do *tratamento* ou *processamento de sinais*, designações que englobam um conjunto de intervenções que os modificam por razões técnicas ou estéticas.” Henrique (2002), p.268.

fornecer uma certa informação a partir de uma devida análise ou interpretação.

Nas últimas décadas os computadores tem se tornado cada vez mais presentes em nosso cotidiano, tornando-se uma peça essencial em certos tipos de trabalho, na execução de tarefas e no controle artificial de diversos processos e segmentos, tal que, na música não poderia ser diferente. Com o considerável aumento do poder de processamento dos computadores, o processo de síntese, processamento e análise de sons, que costumam ser capturados por microfones e transformados em sinais digitais, tem sido uma realidade cada vez mais frequente, ao passo que, gravadores, sintetizadores e ambientes multimídia digitais tem influenciado cada vez mais artistas em busca de novas sonoridades inéditas que seriam praticamente impossíveis por meios naturais⁶⁷. Além disso, diversas ferramentas digitais tem sido desenvolvidas a partir de princípios matemáticos já bem estabelecidos, ou em amplo desenvolvimento, para a análise e processamento de sinais de origem sonora com o propósito de analisar seu comportamento, sua estrutura, sua dinâmica, etc em busca de explicações para diversos fenômenos acústicos.

2.8.1 Representação Espectral

Dentro dos métodos teóricos e experimentais de análises de sons existem basicamente duas formas de representação do som, sendo que, a mais básica consiste em traçar o gráfico da variação da amplitude da onda em função do tempo. Assim, no *domínio temporal* obtemos uma *representação temporal*, onde podemos observar o comportamento de uma onda sonora oscilando em relação ao tempo, sua amplitude (intensidade), seu período e, conseqüentemente, sua frequência a partir do intervalo de tempo mínimo entre dois picos idênticos (Figura 2.26).

⁶⁷ Para se ter uma breve descrição à respeito da influência tecnológica na música e suas respectivas novidades, ver Faria (1997), p. 1-5.

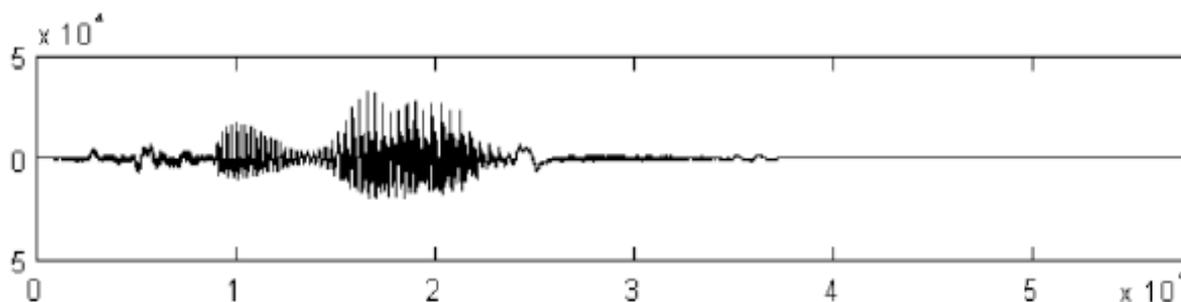


Figura 2.26 - Representação temporal (domínio temporal): amplitude (intensidade) x tempo.

Quando é desejável observar várias frequências ao mesmo tempo, além de verificar a relação existentes entre os parciais contidos no sinal, ou seja, como em nosso caso onde desejamos observar a frequência do som fundamental e de seus respectivos harmônicos, utiliza-se a *representação espectral* (Figura 2.27), ou *espectro do sinal*, definida no *domínio frequencial*.

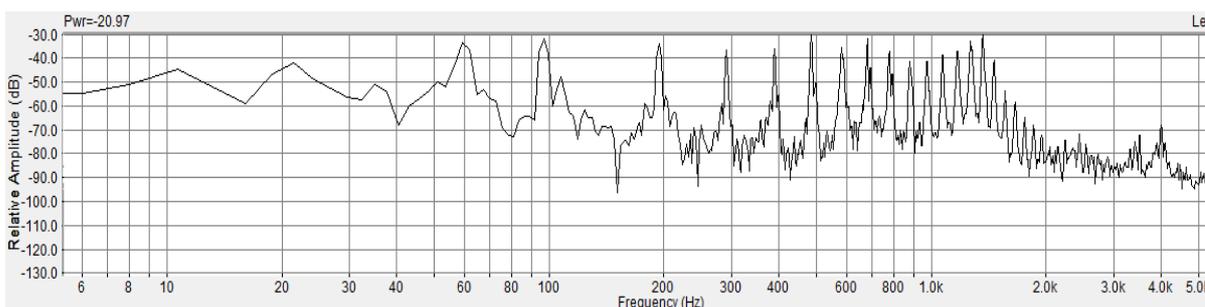


Figura 2.27 - Representação espectral (domínio frequencial): amplitude (intensidade) x frequência.⁶⁸

Além disso, também há uma representação espectral conhecida como *espectrograma* (Figura 2.28) que ilustra como a densidade espectral (intensidade das frequências exibidas) de um sinal varia de acordo com o tempo, de forma que todas as frequências captadas no sinal possam ser visualizadas com suas respectivas intensidades. É comum que a indicação de intensidade de cada frequência seja dada por cores.

⁶⁸ Criado pelo programa SpectraPLUS 5.0 utilizado neste trabalho. Ver adiante.

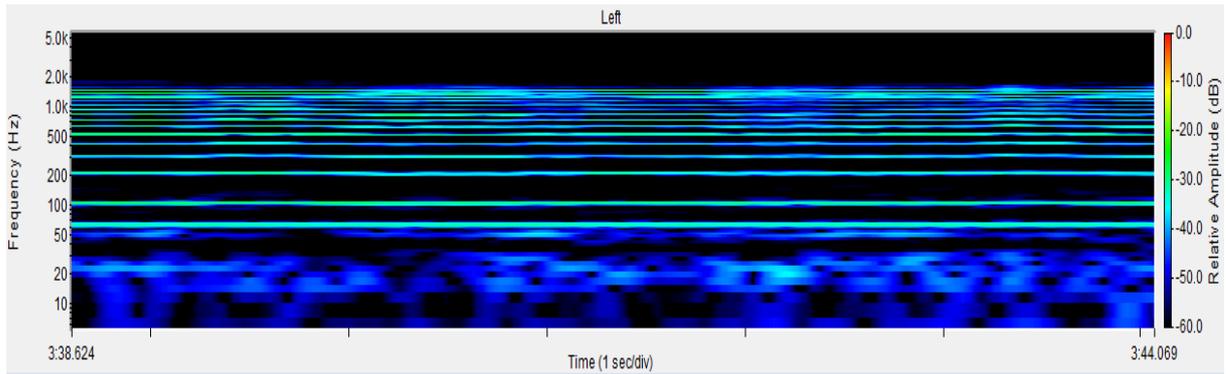


Figura 2.28 - Representação visual de um Espectrograma: frequência x tempo. Neste caso, a intensidade de cada frequência é crescente da cor azul para o vermelho.⁶⁹

Ilustrando brevemente o modelo espectral de sinal, vamos considerar um sinal definido por uma função no domínio temporal (dependente do tempo)

$$f(t) = a \cos(2\pi\omega_0 t + \Phi) \quad (2.33)$$

onde a é a sua *amplitude*, ω_0 é a sua *frequência* e Φ seu *ângulo de fase*. A frequência nos fornece o valor da variação (realização de ω_0 ciclos completos) do sinal por unidade de comprimento, podendo ser observado na Figura 2.29:

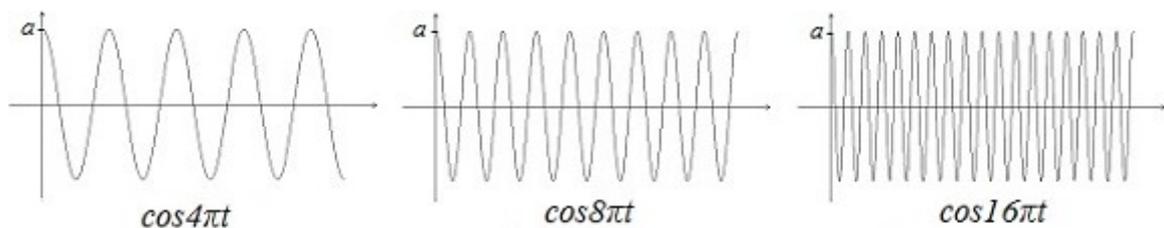


Figura 2.29 - Sinais com frequências 2, 4 e 8.⁷⁰

Para caracterizar um sinal através de suas componentes de frequência, associamos cada frequência presente no sinal à sua amplitude e ao ângulo de fase correspondente. Desta forma, sendo a equação (2.33), com $\Phi=0$, um sinal constituído por uma única componente de frequência ω_0 , Figura 2.30 (a), sua representação funcional usando frequências é dada pela função

⁶⁹ Iden. 64.

⁷⁰ Gráficos plotados pelo programa WinPlot disponível em <http://math.exeter.edu/rparris/winplot.html>

$$g(s) = \begin{cases} a, & s = \omega_0 \\ 0, & s \neq \omega_0 \end{cases} \quad (2.34)$$

cuja representação gráfica é representada na Figura 2.30 (b). Agora, sabemos que a função cosseno pode ser escrita na forma

$$\cos(t) = \frac{1}{2}(e^{it} + e^{-it}) \quad (2.35)$$

Substituindo (2.35) em (2.33) com $\Phi = 0$ temos

$$f(t) = \frac{a}{2}(e^{2\pi i \omega_0 t} + e^{2\pi i (-\omega_0)t}) \quad (2.36)$$

Com isso, a partir desta representação observamos duas componentes de frequência simétricas, ω_0 e $-\omega_0$, ambas com amplitude $a/2$. Logo, a representação gráfica do modelo de frequências $g(s)$ é dada pela Figura 2.30(c).

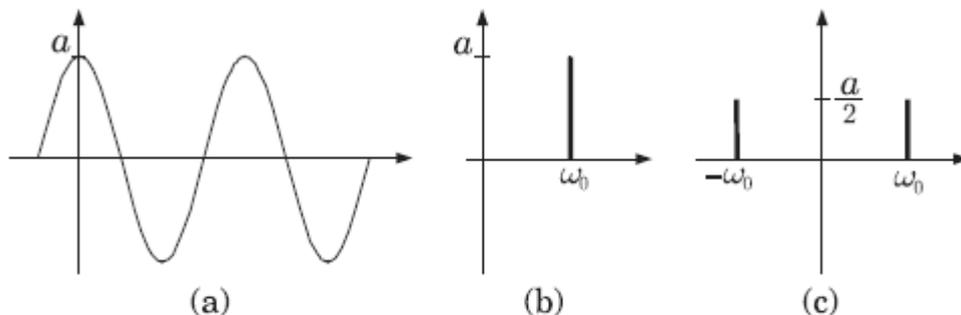


Figura 2.30 - Sinal periódico e seus modelos de frequência.⁷¹

Assim, a representação utilizando o modelo funcional de frequências pode ser generalizada com o propósito de se obter uma representação no espaço de frequências, onde é realizado a passagem do domínio temporal para o domínio espectral, para qualquer sinal periódico utilizando o *teorema de Fourier*, que permite passar uma função f que dependa do tempo para uma nova função F que dependa da frequência, sendo que a representação espectral só se aplica a sinais estacionários.

⁷¹ Carvalho et al. (2009), p.25.

2.8.2 Teorema de Fourier

Pelo teorema de Fourier, uma função $f(t)$ pode ser representada por uma série conhecida como série de Fourier, do tipo

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \text{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \quad (2.37)$$

onde os coeficientes da série são dados por

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (2.38)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt \quad (2.39)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \text{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt \quad (2.40)$$

tal que a frequência de cada termo é igual a

$$\frac{2\pi n}{T} = \omega_n \quad (2.41)$$

Uma forma mais compacta da série é dada por Kreyszig (1993)

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \text{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T} + \phi_n\right) \quad (2.42)$$

onde notamos claramente uma soma de componentes harmônicos, além da forma exponencial complexa

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{i2\pi n \omega_0 t} \quad (2.43)$$

tal que

$$C_n = \frac{\omega_0}{2} \int_{-\omega_0}^{\omega_0} f(t) e^{i2\pi n \omega_0 t} dt \quad (2.44)$$

onde ω_0 é a frequência fundamental do sinal, definida por $\omega_0 = 1/T$.

A equação (2.43) nos mostra, por exemplo, que um sinal periódico contém todas as frequências múltiplas de sua frequência fundamental ω_0 , e apenas essas frequências, isto é, $\omega_0, 2\omega_0, 3\omega_0, \dots$. Assim, o modelo de frequências do sinal pode então ser definido por uma função que associa cada múltiplo $n\omega_0$, onde $n \in \mathbb{Z}$, da frequência fundamental a uma amplitude C_n .

2.8.3 Transformada de Fourier

Para a análise de sinais periódicos, o uso da *série de Fourier* é suficiente. Por outro lado, para a análise de sinais não-periódicos, onde o sinal pode conter frequências arbitrárias, ou seja, pode haver um “continuum” de frequências, é utilizado a *transformada de Fourier*:

$$g(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-2\pi i s t} dt \equiv F[f(t)] \quad (2.45)$$

Enquanto a série de Fourier é uma soma infinita de termos afastados uns dos outros de um intervalo finito de frequências, a transformada de Fourier é o limite que tende a série de Fourier quando os termos estão infinitamente próximos.

Verificamos que a transformada de Fourier define um operador linear entre dois espaços de sinais, um no domínio temporal e outro no domínio frequencial, cumprindo o seu papel de detectar frequências no sinal s . Sendo $e^{-2\pi i s t}$ um sinal periódico com frequência s , para cada $s \in \mathbb{R}$ a modulação $f(t) e^{-2\pi i s t}$ resalta regiões da reta onde a frequência do sinal f entra em ressonância com as frequências do núcleo $e^{-2\pi i s t}$. Assim, a integral (2.45) é uma medida da “densidade” da frequência s no sinal f em todo o seu domínio. Logo, o valor de $g(s)$ indica a

ocorrência da frequência s no sinal f , mas não fornece informações sobre a localização de tal frequência no domínio do sinal (domínio temporal), Carvalho et al. (2009)⁷².

A transformada de Fourier é reversível, isto é, a partir da função espectral $g(s)$ é possível retornar à função temporal $f(t)$ através da *transformada inversa de Fourier*:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(s) e^{-2\pi i s t} ds \equiv F^{-1}[g(s)] \quad (2.46)$$

Essa expressão é simétrica em relação à transformada de Fourier, sendo também uma extensão às funções espectrais contínuas representada pela equação (2.42).

Observando a integral (2.46) notamos que o sinal f é uma soma infinita de sinais com frequência s , $s \in \mathbb{R}$, e amplitude $g(s)$. Desta forma, um sinal pode ser caracterizado tanto pelo seu modelo espacial f como pelo seu modelo de frequências g , também chamado de modelo espectral, sendo que utilizamos a transformada de Fourier e sua inversa para realizar as devidas conversões entre os dois modelos. Portanto, o modelo espacial pode nos fornecer informações em relação à variação do sinal no domínio do espaço, enquanto que o modelo espectral pode nos fornecer informações sobre a variação do sinal no domínio da frequência, ao passo que, o modelo espacial costuma ser utilizado para síntese, enquanto que o modelo espectral costuma ser mais utilizado para a análise de sinais, Carvalho et al. (2009)⁷³.

Considerando os aspectos computacionais, como não é possível analisar uma amostra de duração infinita, quando se pretende calcular o conteúdo espectral de um sinal, seja periódico ou não, o algoritmo que calcula a transformada de Fourier admite implicitamente que o período do sinal é igual à duração da amostra, pois para passar do domínio temporal para o frequencial é subentendido que além do tempo de aquisição (gravação), o sinal se repete de forma idêntica à amostra tratada. Para sinais periódicos, isso não invalida o fato de que no tempo de aquisição existam n períodos do sinal, enquanto que para sinais não periódicos, o algoritmo considera o

72 p.27.

73 p.27.

signal como sendo periódico, com período igual ao tempo de aquisição, sendo que, a resolução frequencial do espectro calculado numericamente é dada por $\Delta f = 1/T_{\text{aquisição}}$, Henrique (2002)⁷⁴.

2.8.4 Transformada de Fourier Discreta

Como os computadores trabalham essencialmente com valores discretos, abordamos brevemente a *transformada de Fourier discreta* para o caso de seqüências finitas, onde o sinal f tem suporte compacto no intervalo $[0, N]$. Este caso é conhecido como *transformada de Fourier finita*.

Dada uma seqüência $(f_0, f_1, \dots, f_{N-1})$, a transformada discreta $g(j)$ dessa seqüência é definida por

$$g(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) e^{-\frac{2\pi i k j}{N}}, \quad j = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.47)$$

e a transformada inversa $F_d^{-1}[F(j)]$ é a seqüência $f(k)$ definida por

$$f(k) = \sum_{j=0}^{N-1} g(j) e^{\frac{2\pi i k j}{N}}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.48)$$

Ao contrário do desenvolvimento da transformada de Fourier contínua, a matemática envolvida no desenvolvimento da teoria da transformada discreta se reduz à aritmética dos números reais e complexos.

Como a seqüência F_j é periódica de período N , temos que $F_{k+N} = F(k)$, logo a transformada de Fourier de um sinal discreto replica o espectro do sinal original. À partir da periodicidade de F_k e da existência da transformada inversa, podemos afirmar que a seqüência $f(k)$, $k = 0, \dots, N-1$, é uma seqüência finita de uma seqüência infinita de período N , definida pela equação (2.48). Isso não significa que a seqüência $g(j)$ original deva ser periódica para calcularmos a transformada discreta, sendo que, na realidade, essa seqüência é finita com N elementos. Assim, ao usarmos a equação (2.48) para reobter o sinal discreto $f(k)$ obtemos na realidade uma extensão periódica desse sinal, Carvalho et al. (2009)⁷⁵.

⁷⁴ p.263.

⁷⁵ p.48.

Portanto, para se calcular a transformada de Fourier $g=F(f)$ do sinal f a partir de sua sequência de amostras $f(k)$, deve-se supor que o sinal f tenha suporte contido no intervalo $[0,T]$, com $T>0$. Usando um reticulado uniforme Δt com frequência de amostragem $1/\Delta t$, de acordo com o limite de Nyquist, e tomando N amostras de modo que $N \Delta t \geq 2T$, pode-se mostrar que

$$F(j)=N \Delta t g(k) \quad (2.49)$$

onde a equação acima relaciona a transformada de Fourier discreta (no segundo membro) das amostras do sinal com a amostragem $F(j)$ da transformada de Fourier do sinal f . Isto fornece um método para se calcular a transformada de Fourier (contínua) de um sinal conforme ilustrado no diagrama abaixo:

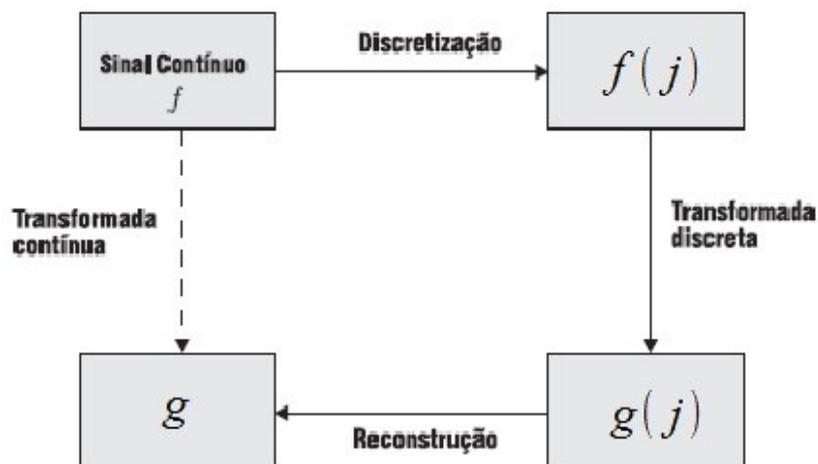


Figura 2.31 - Processo de conversão da transformada de Fourier usando a transformada discreta.⁷⁶

Ou seja:

- Discretizar o sinal f ;
- Aplicar a transformada de Fourier discreta;
- Obter a discretização da transformada de Fourier usando a equação (2.49);
- Reconstruir o sinal discreto $F(j)$ para se obter a transformada contínua $F(f)$.

⁷⁶ Carvalho et al. (2009), p.49.

Como o cálculo da transformada de Fourier discreta diretamente a partir da equação (2.47) é bastante caro computacionalmente, outros algoritmos que utilizam uma combinatoria eficiente dos diversos índices que determinam o cálculo da transformada são largamente utilizados. Tais algoritmos são genericamente conhecidos como *transformada rápida de Fourier* (“Fast Fourier Transform”) e foram inicialmente desenvolvidos por Cooley & Tukey (1965). No princípio, o método de Cooley & Tukey aplicava-se a sinais temporais com um número N de pontos, que é potência de dois. Mediante uma tal restrição é possível reduzir o tempo de cálculo da transformada de Fourier de um número de base $T_{\text{cálculo}} \propto N^2$ para $T_{\text{cálculo}} \propto N \log_2 N$, possibilitando, por exemplo, esperar um segundo para se obter um espectro, ao invés de 17 minutos, caso fosse utilizado uma transformada de Fourier convencional, Henrique (2002)⁷⁷.

77 p.264.

3 METODOLOGIA

“Com organização e tempo, acha-se o segredo de fazer tudo e bem feito.”

Pitágoras

3.1 Princípios e Critérios

A maioria das experiências anteriores envolvendo o estudo da influência do material utilizado na construção de instrumentos musicais foram conduzidas sob uma variedade de métodos onde foram identificados alguns problemas recorrentes.

Instrumentos musicais “reais”⁷⁸ costumam ser objetos muito sofisticados com uma infinidade de características próprias que podem influenciar diretamente no seu respectivo som, agregando assim, diversas variáveis e parâmetros ao processo. No caso das flautas, há diversos tipos de fabricantes e modelos existentes, onde cada instrumento apresenta diferenças de material e dimensões (espessura do tubo, geometria acústica, diâmetro dos furos, rugosidade da parede do tubo, etc) consideráveis, sem contar com as características próprias que cada instrumento pode apresentar de acordo com o seu processo de construção utilizado por cada luthier.

O uso de instrumentistas em experiências de acústica diminui consideravelmente a reprodutibilidade dos resultados obtidos, pois cada instrumentista possui características intrínsecas próprias, como o nível técnico na execução do instrumento, consistência, estilo, expressividade, etc. No caso da flauta transversal, a influência do instrumentista no som produzido é ainda maior por causa da embocadura necessária para se tocar o instrumento, ou seja, a embocadura é algo muito pessoal, pois envolve a forma e a tensão dos músculos dos lábios, a posição da língua e da mandíbula, etc. Portanto, reproduzir exatamente um som produzido por um flautista em uma mesma flauta é uma tarefa extremamente difícil, mesmo para flautistas profissionais, devido aos diversos fatores envolvendo, principalmente, a embocadura.

Quando o conteúdo dos dados coletados são obtidos através de análises primariamente qualitativas, como a amostragem realizada a partir de questionários

⁷⁸ “Reais” pelo fato de terem sido construídos visando serem instrumentos musicais e não meras peças para a realização de experimentos científicos.

respondidos por pessoas que foram imbuídas da tarefa de identificar características sonoras diferentes no experimento realizado, isso torna a experiência muito subjetiva, sendo necessário, assim, fazer uso de considerável esforço estatístico que dificilmente poderá ser reproduzido em uma experiência similar, ou mesmo, idêntica.

Por isso, com o propósito de reduzir (quanto possível) o número de parâmetros e variáveis existentes no processo, optou-se por utilizar uma quantidade mínima possível de instrumentistas na execução do som das flautas e, para uma análise mais robusta, utilizar um soprador artificial acoplado em uma das experiências. Além disso, na busca pela simplicidade, facilidade e redução de parâmetros, optou-se em utilizar bocais de flautas, para a devida estimulação sonora, acoplados a tubos de materiais diferentes, lisos (polidos interna e externamente), sem furos laterais e feitos sob medida e precisão, para a realização dos experimentos.

3.2 Definição do Arranjo Experimental

Como um dos objetivos deste trabalho é verificar se há ou não uma influência significativa no som produzido por flautas de mesmas dimensões e de materiais diferentes, além de realizar um estudo acústico de tubos estimulados pelo som gerado por um bocal de flauta doce e outro de flauta transversal a partir da caracterização de seus respectivos harmônicos sonoros, organizou-se o seguinte arranjo experimental:

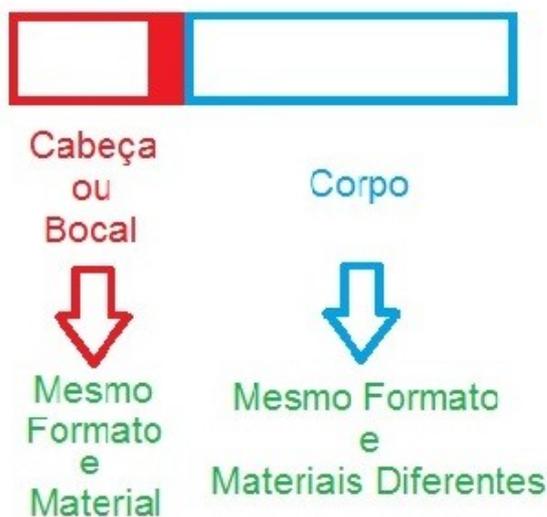


Figura 3.1 – Arranjo experimental das flautas.

Com o objetivo de reduzir os parâmetros a serem considerados, restringiu-se o estudo à apenas tubos de metal.

Desta forma, pretende-se comparar vários sons, em diversos tons iguais, produzidos por uma flauta de bocal fixo e corpo permutável entre tubos de mesmas dimensões e de materiais diferentes. Assim, por exemplo, pode-se gravar o som da flauta em um tom específico utilizando-se um tubo de um certo tipo de material e em seguida realizar o mesmo procedimento para um tubo de mesma dimensão e de material diferente, sob semelhantes condições climáticas, e comparar ambos os sons com o uso de algum programa de computador projetado para a gravação e análises de sinais sonoros.

Como cada som é praticamente uma mistura complexa de diversos sons, para identificar tal diferença, decidiu-se caracterizar o som produzido por cada flauta a partir da análise e identificação dos principais harmônicos produzidos por cada som emitido por cada tubo, tal que, definiu-se a captação de três sons específicos para cada tubo. Desta forma, com a identificação e caracterização dos principais harmônicos produzidos em cada tom executado por cada flauta, espera-se verificar se existe uma diferença significativa entre os sons produzidos pelas mesmas.

Para isso, preparou-se uma estrutura para a captura do áudio produzido por cada flauta utilizando-se um microfone ligado a um computador.

3.3 Equipamentos e Materiais Utilizados

3.3.1 Tubos

Apesar do arranjo experimental parecer ser algo muito simples de ser montado, verificou-se que encontrar tubos com as mesmas dimensões e de materiais diferentes no mercado é algo realmente muito difícil, ainda mais quando busca-se por tubos que possuam dimensões semelhantes aos tubos utilizados em flautas produzidas industrialmente em larga escala, como é o caso das flautas doce e transversal. A mesma dificuldade foi encontrada e comentada por Clare M. Hurtgen em seu trabalho “Body Vibrational Spectra of Metal Flute Models”, Hurtgen (1999).

Após realizar diversas buscas por tubos disponíveis no mercado e contatar diversos fornecedores, verificou-se que os tubos mais facilmente encontrados com

medidas mais próximas aos tubos utilizados em flautas transversais são constituídos dos seguintes tipos de materiais: alumínio, cobre, latão, aço inox, aço carbono e aço galvanizado, sendo que, o índice de precisão utilizado na fabricação de tubos com fins industriais é muito baixo, inviabilizando assim, uma comparação sonora precisa.

Neste caso, faz-se necessário o uso de tubos feito sob medida e com alto índice de precisão, podendo ser encontrado em empresas especializadas. Assim, após apresentação da proposta deste trabalho a algumas empresas, seis tubos de três tipos de materiais diferentes foram minuciosamente preparados e gentilmente cedidos pela empresa *Novatref Trefilados de Precisão Ltda* para a realização deste trabalho.

Os tubos foram produzidos utilizando o *processo de trefilação* descrito pelo próprio Sr. Nelson José Aissum, proprietário da empresa:

“No processo de trefilação, parte-se de um tubo com diâmetro maior que é puxado a frio passando por uma ferramenta de calibração, que chamamos de fieira, e assim vai se diminuindo o diâmetro e a parede do tubo. A máquina para esse processo é chamada de banco de trefila e a cada passada chamamos de passe de trefila. Esse processo pode ser repetido várias vezes, dependendo da medida final do tubo.”⁷⁹

⁷⁹ Descrever com mais detalhes o *processo de trefilação* fugiria do escopo deste trabalho.

Segue abaixo as características e dimensões dos tubos:

Tabela 3.1 – Características e dimensões dos tubos utilizados nos experimentos.

ID ⁸⁰	Material	Espessura [± 0,05 mm]	Diâmetro Interno E ⁸¹ [± 0,05 mm]	Diâmetro Interno P ⁸² [± 0,05 mm]	Comprimento [± 0,5 mm]	Peso ⁸³ [± 0,001 g]
A	Alumínio	0,40	18,90	18,85	600	38,197
B	Alumínio		18,95	18,95		38,233
A	Cobre		18,95	19,00		125,995
B	Cobre		18,85	18,90		125,513
A	Latão		18,95	18,95		119,715
B	Latão		18,90	18,95		119,474

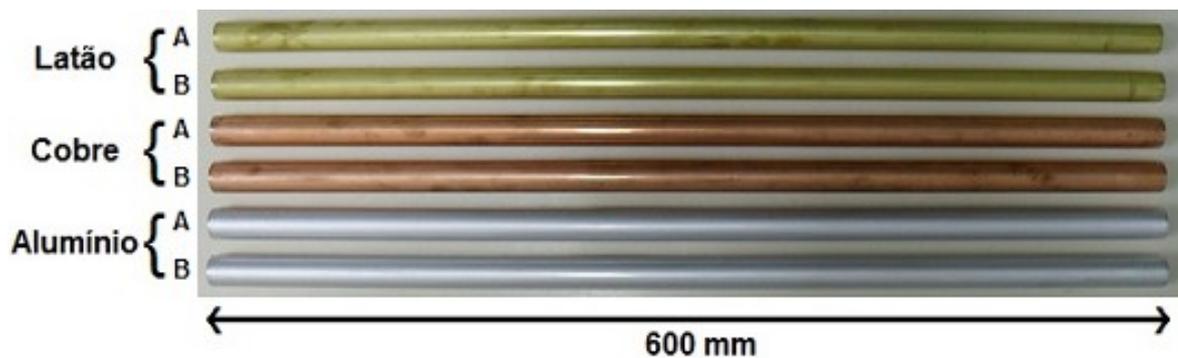


Foto 3.1 – Tubos utilizados nos experimentos.

Cada tubo do mesmo material foi devidamente identificado com um ponto para o tubo A e dois pontos para o tubo B.



Foto 3.2 – Detalhe de identificação do par de tubos de cobre.

80 Identificação.

81 Encaixe: extremidade em que o tubo era encaixado aos bocais.

82 Ponta: extremidade oposta à extremidade de encaixe.

83 Gravidade local: $9,79 \pm 0,01 \text{ m/s}^2$

3.3.2 Bocais

Um mini bocal de flauta transversal foi especialmente produzido e fornecido por Leonardo Fuks, professor adjunto do departamento de musicologia e educação musical da UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro), para a realização deste trabalho. De acordo com Fuks, a cabeça ou bocal da flauta transversal foi confeccionada a partir da cabeça de flauta Goosman, modelo Butterfly <http://www.butterflyheadjoints.com>, sendo que ela é um laminado de resina epoxídica com fibra de carbono em três camadas: (1) interna em configuração de manta quadriculada; (2) média com fio longo espiralado em torno do eixo da peça; (3) externa com fibras de aproximadamente 10 mm distribuídas pela superfície. O diâmetro interno do bocal é cilíndrico. Seguem mais informações abaixo:

Tabela 3.2 – Dimensões do bocal da flauta transversal.

Espessura [± 0,05 mm]	Diâmetro Interno [± 0,05 mm]	Embocadura Horizontal [± 0,05 mm]	Embocadura Vertical [± 0,05 mm]	Comprimento Interno [± 0,05 mm]
0,50	18,74	11,59	10,80	53,05

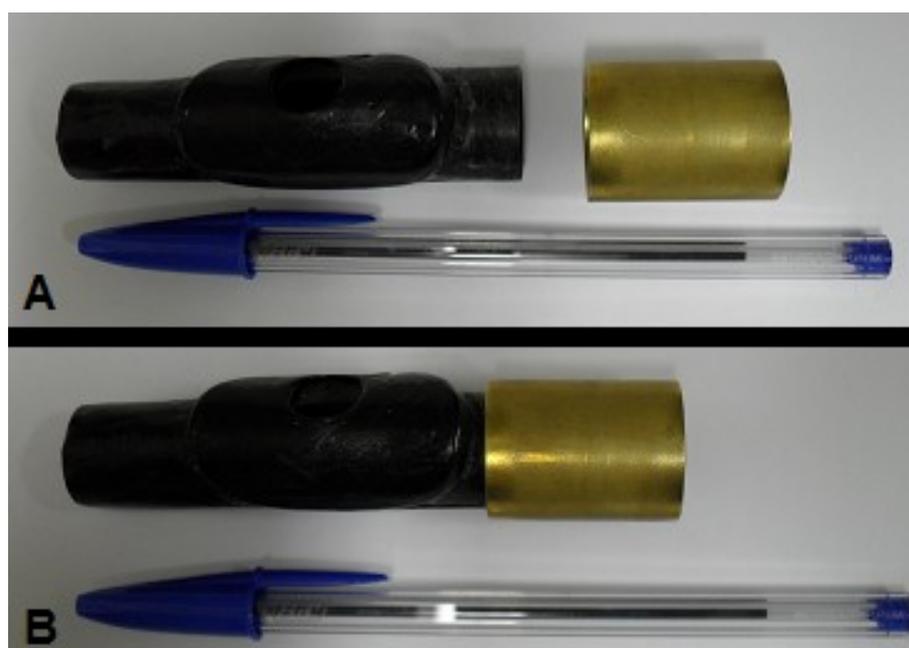


Foto 3.3 – Bocal da flauta transversal e adaptador: A – Desacoplados; B – Acoplados.

Para os estudos envolvendo a flauta doce, utilizou-se um bocal de uma flauta doce contralto de plástico da marca Yamaha, modelo YRA-28G, por ela possuir um diâmetro interno mais próximo ao da flauta transversal. Deve ser lembrando que o interior do bocal da flauta doce é cônico. Segue abaixo as dimensões do bocal da flauta doce contralto:

Tabela 3.3 – Dimensões do bocal da flauta doce.

Diâmetro Interno Maior [± 0,05 mm]	Diâmetro Interno no Ponto de Encaixe [± 0,05 mm]	Comprimento de Encaixe [± 0,05 mm]	Comprimento Interno [± 0,05 mm]
18,55	23,68	25,42	124,32



Foto 3.4 – Bocal da flauta doce contralto (sem o adaptador) acoplado à entrada do soprador artificial.

Como o diâmetro interno no ponto de encaixe do bocal da flauta doce é maior do que os tubos obtidos para a realização deste trabalho, a empresa *Novatref Trefilados de Precisão Ltda* também forneceu um adaptador (“bucha”) para possibilitar a conexão dos tubos no bocal da flauta doce contralto. Além disso, o adaptador também foi utilizado para acoplar os tubos ao bocal da flauta transversal. Segue abaixo as características e dimensões do adaptador:

Tabela 3.4 – Dimensões do adaptador.

Material	Espessura [± 0,05 mm]	Comprimento [± 0,05 mm]	Diâmetro Interno [± 0,05 mm]
Latão	2,03	31,77	19,8



Foto 3.5 – Bocal da flauta doce contralto junto com o adaptador

Para fixar melhor o acoplamento entre os tubos e o adaptador, e entre os bocais e o adaptador, foi enrolado um pouco de fita veda rosca da marca Tigre em torno da ponta de uma das extremidades dos tubos e do bocal da flauta transversal.

3.3.3 Soprador Artificial

Para a realização de uma dentre as três experiências deste trabalho, construiu-se um soprador artificial acoplado ao bocal da flauta doce e alimentado pelo fluxo de ar proveniente de um cilindro de gás.

Optou-se por esta experiência pelo fato do bocal da flauta doce não ter qualquer tipo de complicação ou ambiguidade devido ao seu sistema de “embocadura artificial”, possibilitando assim, tocar o instrumento com a simples passagem de um fluxo de gás⁸⁴. Como não é necessário saber e/ou utilizar qualquer tipo de técnica para se tocar uma flauta doce, além dela ser um instrumento que gera tons (notas) fundamentais muito bem definidos (estimulando a sensibilidade musical de quem a toca), ela é largamente utilizada no processo de musicalização⁸⁵.

⁸⁴ Ar, no caso do instrumento ser tocado por alguma pessoa.

⁸⁵ A musicalização é a iniciação musical propriamente dita, composta basicamente de teoria musical e prática de instrumento, sendo muitas vezes direcionado às crianças e às pessoas que nunca tiveram contato com algum tipo de instrumento musical.

O soprador constitui-se de:

- Acoplador: um tubo de plástico que possibilita o acoplamento da mangueira de silicone ao bocal da flauta doce. Utilizou-se duas presilhas de metal para a fixação das mangueiras e dos anéis de plástico, feitos com outras mangueiras do mesmo material e de diâmetros diferentes, necessários para a adaptação e fixação das mangueiras;
- Mangueira de silicone: conecta o fluxo de gás entre o acoplador e o cilindro de gás;
- Cilindro de gás: fornece o fluxo de gás. O cilindro de gás conta com um regulador de pressão que controla a intensidade do fluxo de ar que sai do cilindro na escala de [l/min] (litros por minuto). Há um outro indicador (manômetro) que exibe a quantidade de gás existente dentro do cilindro. O gás utilizado nesta experiência foi *Nitrogênio White Martins 4.6* com 99.9% de pureza;
- Suporte de laboratório: para sustentar a montagem. Duas presilhas de plástico foram utilizadas para fixar o acoplador ao suporte de laboratório.

O bocal da flauta doce foi fixado ao soprador artificial de modo que os tubos acoplados ao bocal pudessem vibrar livremente, ao passo que, posicionou-se toda a flauta na direção vertical com o propósito de eliminar qualquer efeito de torque devido à ação da gravidade no conjunto, similarmente ao trabalho apresentado por Hurtgen (1999), onde concluiu-se que a vibração de tubos uniformes ou com apenas um orifício de tom são independentes de orientação azimutal.

Segue abaixo uma foto do soprador artificial pronto para uso:



Foto 3.6 – Montagem do soprador artificial acoplado ao bocal da flauta doce.



Foto 3.7 – Cilindro de gás utilizado: *Nitrogênio White Martins 4.6*. O controlador utilizado é de um cilindro de gás Argônio por ser compatível ao controlador de gás Nitrogênio.

3.3.4 Programa para Análise e Processamento de Sinais

Com o propósito de caracterizar o som produzido por cada flauta a partir da análise e identificação dos principais harmônicos produzidos por cada som emitido por cada tubo, utilizou-se o programa SpectraPLUS 5.0⁸⁶, fornecido pela Pioneer Hill Software tanto para a gravação do sinal quanto para a realização das análises e tratamentos iniciais dos sinais.

O programa basicamente captura um sinal de áudio digitalizado, proveniente de um microfone conectado à placa de som do computador e o converte do domínio temporal para o domínio da frequência por meio de algoritmos matemáticos conhecidos genericamente como *transformada rápida de Fourier* (FFT - Fast Fourier Transform). Com isso, pode-se visualizar diversas informações ao mesmo tempo, como por exemplo, o *espectrograma* e o *espectro* do sinal com a relação entre as frequências e as suas respectivas intensidades, como pode ser visto na figura abaixo:

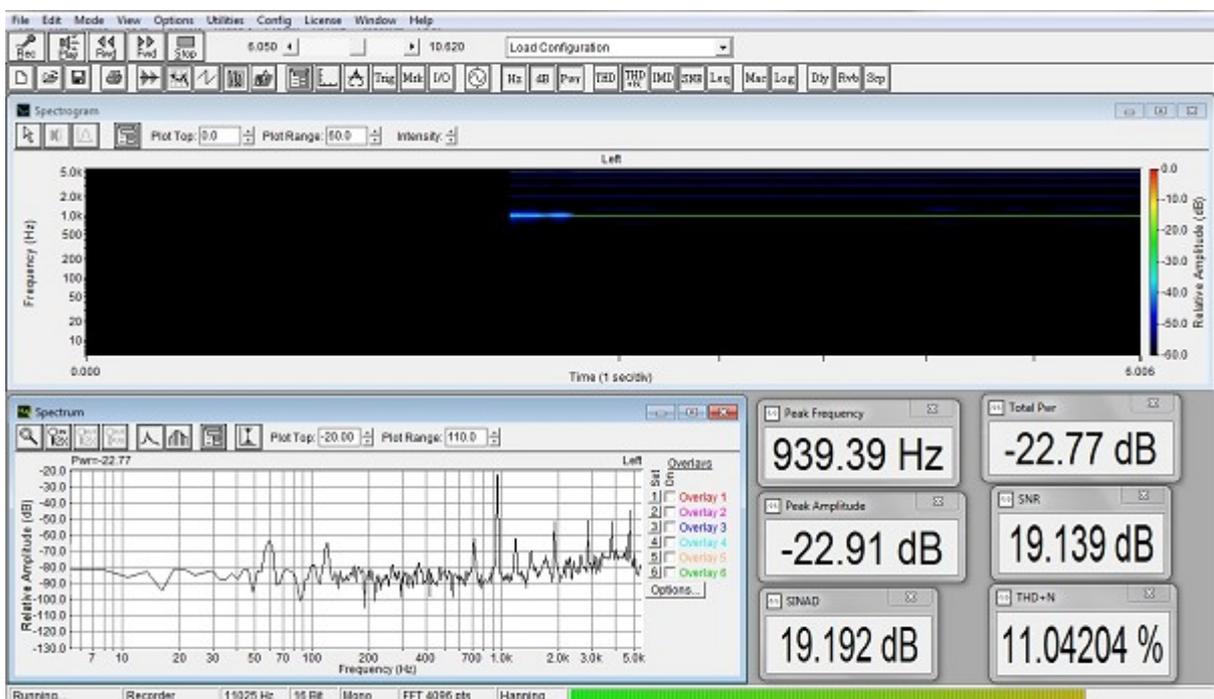


Figura 3.2 – Tela do programa SpectraPLUS 5.0 em funcionamento.

⁸⁶ O programa e uma licença gratuita de experimentação válida por 30 dias pode ser obtida pelo site da empresa <http://www.spectraplus.com>

O programa SpectraPLUS possui três modos de funcionamento:

- “Real Time” (Tempo Real): onde os dados são exibidos em tempo real SEM a possibilidade de gravação dos dados.
- “Recorder” (Gravador): onde os dados são exibidos em tempo real COM a possibilidade de gravação dos dados e reprodução de arquivos de áudio armazenados no computador;
- “Post Process” (Processo Rápido): onde um arquivo selecionado pode ser “tocado” quase que instantaneamente do início ao fim com o propósito de se realizar cálculos matemáticos, aplicar filtros, analisar e/ou registrar valores específicos contidos em vários pontos de cada áudio tocado;

No programa existe uma função chamada “Peak Hold” (Manutenção dos Picos) que torna possível a identificação dos valores de intensidade (dB) máximos de todas as frequências registradas em cada arquivo de áudio, ao passo que, vários arquivos de áudio já armazenados no computador podem ser rapidamente analisados a partir do modo “Post Process” (Processo Rápido). Tal procedimento foi largamente utilizada na fase de tratamento das amostras deste trabalho.

Recentemente, Almeida (2010)⁸⁷ apresentou um estudo sobre “A Influência da Rolha de Cortiça e do Stopper de Nylon na Qualidade Sonora da Flauta Transversal”, utilizando extensivamente o SpectraPLUS como ferramenta de análise. De acordo com Simpson, Cogan (1998) afirma que “o uso de espectrogramas pode facilitar a análise musical, por permitir uma visão diferente da usual”, Almeida (2010)⁸⁸:

“telescopicamente, um espectrograma possibilita um retrato da macroestrutura de uma obra musical; [...] por outro lado, propicia uma rara e penetrante visão da micro-estrutura musical, dos harmônicos que abrangem a realidade sub-atômica da música”⁸⁹

87 Sob orientação de Maurício Freire Garcia, flautista profissional e professor do departamento de música da UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais)

88 p.58.

89 Cogan (1998), p.2.

O SpectraPLUS é um programa de análise espectral de baixo custo por ser compatível com placas de som comumente encontradas em computadores domésticos. Para as gravações e o tratamento dos dados foi utilizado um *Notebook Toshiba Satellite* modelo *L45-S7423* equipado com uma placa de som com os “chipsets” *Realtek ALC660 @ Intel 82801HBM ICH8M - High Definition Audio Controller*.

Para a captura do sinal foi utilizado um microfone da marca *G.P.A. U.S.A. Design* modelo *GM 570* com as seguintes especificações técnicas:

Tabela 3.5 - Especificações técnicas do Microfone utilizado nas experiências.

<p>Tipo: Dinâmico Peso: 180,72 g Impedância: 600 Ω ± 30% em 1 KHz Modelo: Hiper Cardioide Sensibilidade: 0°: -73 dB ± 3 dB (0 dB = 1 v/μbar em 1 KHz) Frequência de resposta: 50 Hz ~ 14 KHz</p>	<p>Características do Microfone Direcional Tipo: DM-27 AF 600 Ω Nível Máximo: -52,6 dB Alcance: 30 dB Frequência: 1000Hz Nível da Fonte: 0,1 Pa</p>
--	--



Foto 3.8 – Microfone utilizado para a captura dos sinais nas experiências.

Todos os áudios foram gravados utilizando o programa SpectraPLUS, sempre no mesmo canal e no formato Wave, mono, 11025 kHz, 16 bits e FFT 4096 pts por amostra.

3.3.5 Acessórios

Um termômetro digital infravermelho da marca *ICEL* modelo *TD-971* foi utilizado para checar a temperatura de cada tubo a cada medida com o propósito de controlar e minimizar qualquer variação de temperatura no sistema estudado. Seguem suas principais especificações técnicas:

Tabela 3.6 - Especificações técnicas do termômetro digital infravermelho utilizado nas experiências.

Para: -20 °C até 200 °C
Resolução: 0,1 °C
Exatidão: $\pm(1,5\% + 2^{\circ}\text{C})$
Tempo de resposta: 0,5 s
Potência do laser: menos que 1 mW



Foto 3.9 – Termômetro digital infravermelho utilizado para a captura dos sinais nas experiências.

Um par de luvas de lã foram utilizadas pelas pessoas que manuseavam diretamente as flautas para se evitar que a transferência de calor de suas mãos pudessem alterar de forma significativa a temperatura dos tubos a cada medida.



Foto 3.10 – Par de luvas de lã utilizadas.

O valor da umidade do ar também foi checado a cada medida realizada com um medidor de umidade e temperatura analógico da marca *SUNDO* em uma sala devidamente climatizada por um ar condicionado.



Foto 3.11 – Medidor de umidade e temperatura utilizado.

3.4 Teste-Piloto

Realizou-se um teste-piloto para checar se o soprador artificial desenvolvido para a flauta doce contralto funcionaria dentro das expectativas esperadas para este trabalho, dentre outras características a ser verificadas como:

- Se o fluxo de ar gerado por um cilindro de gás seria suficiente para tocar uma flauta doce;
- Qual a quantidade de tons possíveis que poderiam ser executados de acordo com o fluxo gerado por um cilindro de gás, com a desejável quantidade mínima de três tons (notas musicais);
- Como seria a qualidade de captação do sinal pelo microfone de acordo com a representação visual do sinal sonoro exibida pelo software SpectraPLUS 5.0;
- Verificar e se familiarizar com algumas funções disponíveis no programa SpectraPLUS 5.0 enquanto a flauta doce emitia uma nota definida;

Todas as características desejadas para a realização das experiências foram, assim, previamente checadas e confirmadas.

3.5 Descrição dos Experimentos

Neste trabalho foram realizadas três experiências utilizando-se um arranjo experimental semelhante.

A primeira experiência (*Experiência 1*) contou com a participação de Letir Silva de Souza, flautista profissional e professora efetiva de flauta doce da FAMES (Faculdade de Música do Espírito Santo). Nesta experiência o bocal de flauta doce foi acoplado a cada tubo em uso e tocado como um instrumento musical normal, ou seja, sem o acoplamento do soprador artificial. A flautista foi orientada a identificar e definir três notas musicais para a flauta utilizada: uma na região grave, uma na região média e outra na região aguda. Assim, para cada tubo, foi gravado um trecho

de áudio com o som da flauta para cada nota definida. Portanto, como haviam seis tubos e eram realizadas três medidas por tubo, logo eram realizadas dezoito medidas por experiência.

A segunda experiência (*Experiência 2*) contou com a participação de Nara Franca Rodrigues, flautista profissional e integrante da OFES (Orquestra Filarmônica do Espírito Santo) como flautista convidada. Os procedimentos adotados nesta experiência são praticamente os mesmos adotados na *Experiência 1*, com a diferença de que as notas definidas (tocadas) foram duas notas graves e uma nota média por tubo, sendo que, neste caso o bocal utilizado foi o de flauta transversal.

Por questões de praticidade, daqui em diante, referiremos à *Flautista Da Experiência 1* como *Flautista D* e à *Flautista Da Experiência 2* como *Flautista T*.

A *Experiência 3* (*Experiência 3*), tendo um caráter mais robusto, foi realizada utilizando o bocal de flauta doce acoplado ao soprador artificial, descrito anteriormente neste trabalho, com o objetivo de diminuir o número de parâmetros utilizados. Para a identificação e definição das três notas musicais a serem gravadas durante as medidas foi verificada a relação existente entre a variação do fluxo do gás em relação à nota tocada pela flauta. O valor do fluxo de gás é identificado por um medidor de fluxo existente no cilindro de gás. Notou-se que tal relação na “subida”, ou seja, quando se parte do fluxo igual a zero e aumenta-se o fluxo gradualmente é diferente da “descida”, quando se parte do fluxo igual a um valor máximo definido e diminui-se gradualmente o fluxo até o valor desejado. O valor máximo definido para o fluxo de gás foi de 20 l/min (litros por minuto) pelo fato da flauta já não apresentar variação de tom considerável acima deste valor, onde foi identificada excessiva turbulência. Assim, foram identificadas e definidas três relações desejáveis:

- i. nota na região grave com fluxo de gás igual a 2 l/min;
- ii. nota na região média com fluxo de gás igual a 4 l/min;
- iii. nota na região aguda com fluxo de gás igual a 18 l/min;

Para a realização de cada medida, o fluxo de gás foi elevado até o valor máximo definido, 20 l/min, e diminuído gradualmente até o valor desejado para a gravação do áudio em questão.

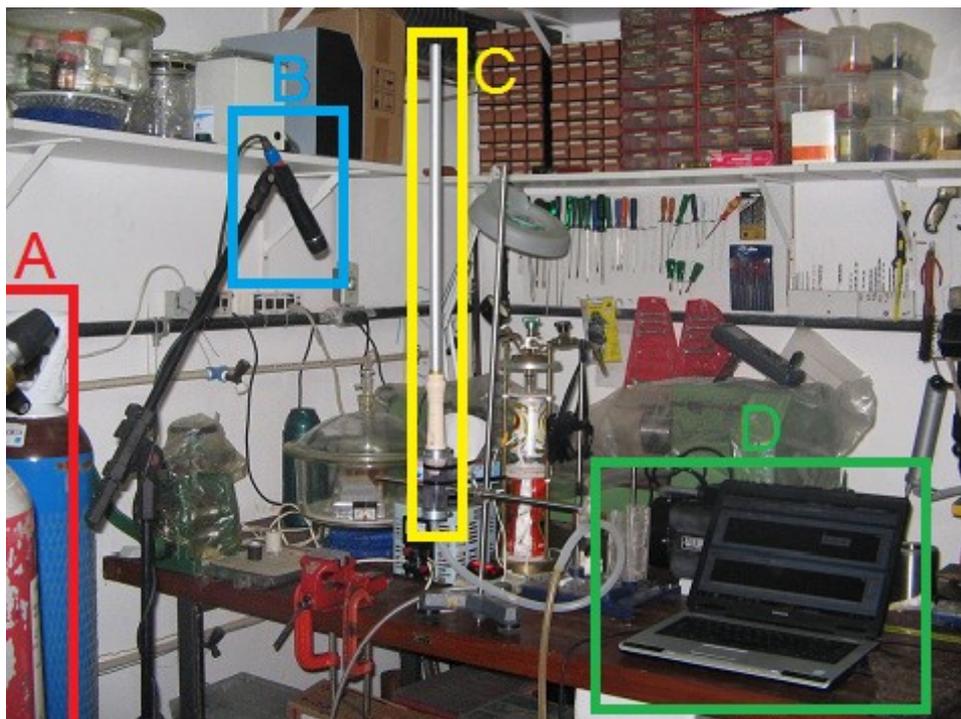


Foto 3.12 – Arranjo experimental da *Experiência 3* na sala onde foram realizadas todas as medidas: A – Cilindro de gás; B – Microfone; C – Tubo encaixado ao bocal de flauta doce acoplado ao soprador artificial; D – Computador com o programa SpectraPLUS ativo.

3.6 Condições Experimentais

Todas as experiências foram realizadas no PRES LAB (Laboratório de Altas Pressões), localizado no Prédio dos Laboratórios de Física e Química da UFES, em uma pequena sala com uma acústica razoável e com temperatura controlada por um ar condicionado, onde a temperatura da sala era mantida entre 21 e 22 °C.

Tanto a temperatura dos tubos quanto a umidade do ar eram constantemente monitoradas com o propósito de se realizar as gravações com baixas oscilações de temperatura e umidade do ar. No início de cada experiência foi realizado um procedimento de estabilização da temperatura da sala, onde todo o arranjo experimental foi mantido dentro da sala até que todos os tubos entrassem em equilíbrio térmico. Caso o tubo a ser utilizado estivesse com um valor de temperatura muito fora do valor esperado, o procedimento de estabilização da temperatura da sala e dos tubos era novamente realizado. O mesmo era feito caso o valor da umidade do ar apresentasse um valor muito fora do esperado, tal que, para se diminuir a umidade do ar de forma mais eficiente, a sala era mantida com o ar

condicionado configurado a 17 °C para, em seguida, ser configurado a 22 °C até a estabilização da temperatura da sala. Como as três experiências foram realizadas em três dias diferentes (em uma mesma semana) à noite, logo cada experiência contou com valores diferentes da umidade do ar de acordo com as condições climáticas externas do dia.

Durante a realização de todas as medidas os tubos foram manipulados sempre com o uso de luvas de lã para se evitar a transferência de temperatura do calor das mãos para cada tubo em uso.

Antes de se realizar cada medida, o ar condicionado era desligado para que seu ruído não interferisse na captação dos sinais sonoros. Segue abaixo o gráfico do ruído de fundo da amplitude relativa (dB) em relação à frequência, gerado a partir de 20 segundos de gravação do som da sala em silêncio, com a função “Peak Hold” (Manutenção dos Picos) do programa SpectraPLUS ativada, ou seja, nas condições em que foram tomadas todas as medidas deste trabalho:

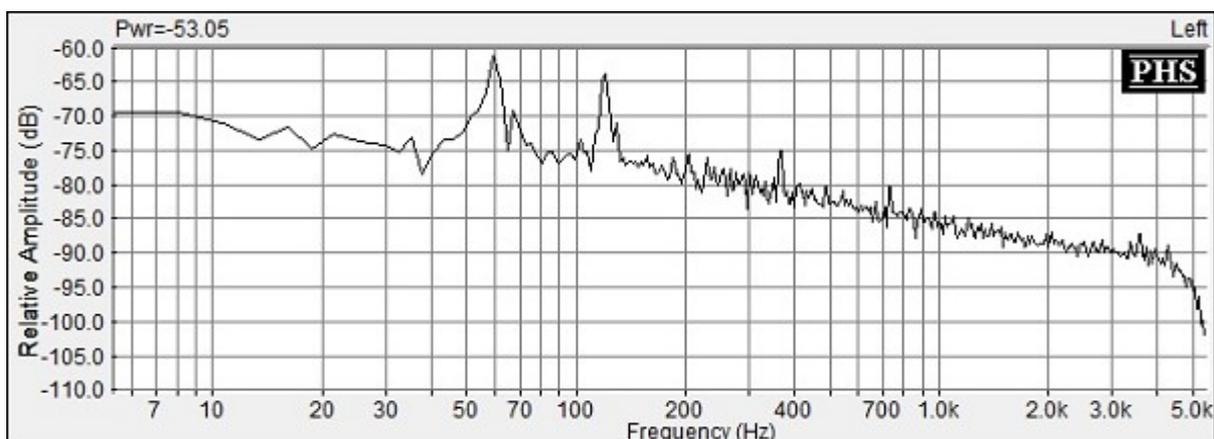


Figura 3.3 – Gráfico do ruído de fundo registrado na sala onde foram realizadas todas as medidas.

3.7 Obtenção dos Dados

Para todas as três experiências foi utilizado o mesmo conjunto de tubos e equipamentos de captação e gravação do sinal sonoro (áudio), tal que, foram captados e gravados três sinais sonoros por tubo em uso, sendo que cada experiência contou com um critério para a realização de suas respectivas medidas.

O padrão de posicionamento do microfone adotado para as três experiências foi semelhante ao utilizado por Almeida (2010) e Garcia (2000). No caso deste

trabalho, uma pequena barra metálica com cerca de 45 cm foi utilizada como referência para medir a distância entre o microfone e o bocal em uso, tal que, o microfone formava um ângulo de aproximadamente 45 graus em relação ao chão.⁹⁰



Foto 3.13 – Posicionamento do bocal acoplado ao soprador artificial em relação ao microfone. O ângulo de 45° e a distância de 45 cm entre o bocal e o microfone são valores aproximados.

⁹⁰ O posicionamento do microfone a um ângulo de 45 graus é uma boa escolha pelo fato das ondas sonoras tridimensionais propagarem-se esféricamente.



Foto 3.14 – Equipamento utilizado para a medição do ângulo entre o microfone e o bocal em uso em relação ao chão.

As três experiências foram realizadas seguindo a seguinte ordem de utilização dos tubos:

- (1) Tubo de Alumínio A
- (2) Tubo de Alumínio B
- (3) Tubo de Cobre A
- (4) Tubo de Cobre B
- (5) Tubo de Latão A
- (6) Tubo de Latão B

Nos três casos, seguiu-se os seguintes procedimentos para a obtenção dos dados:

- (a) Montagem do arranjo experimental e organização da sala;
- (b) Estabilização da temperatura da sala entre 21 e 22 °C e da umidade do ar próximo ao valor esperado (de acordo com o dia);
- (c) Checagem da temperatura do tubo a ser utilizado e da umidade do ar da sala. Se o valor de temperatura ou da umidade do ar estiver muito fora do valor esperado, realizar o passo (b) até que se atinja os valores desejados;

- (d) Acoplamento ao bocal em uso do tubo a ser analisado dentro da ordem estabelecida;
- (e) Realização do item (c);
- (f) Realização da primeira medida;
- (g) Realização do item (c);
- (h) Realização da segunda medida;
- (i) Realização do item (c);
- (j) Realização da terceira medida;
- (k) Repetição dos procedimentos à partir do item (d) com o próximo tubo.

Segue abaixo um fluxograma que ilustra o procedimento experimental realizado durante a obtenção dos dados:

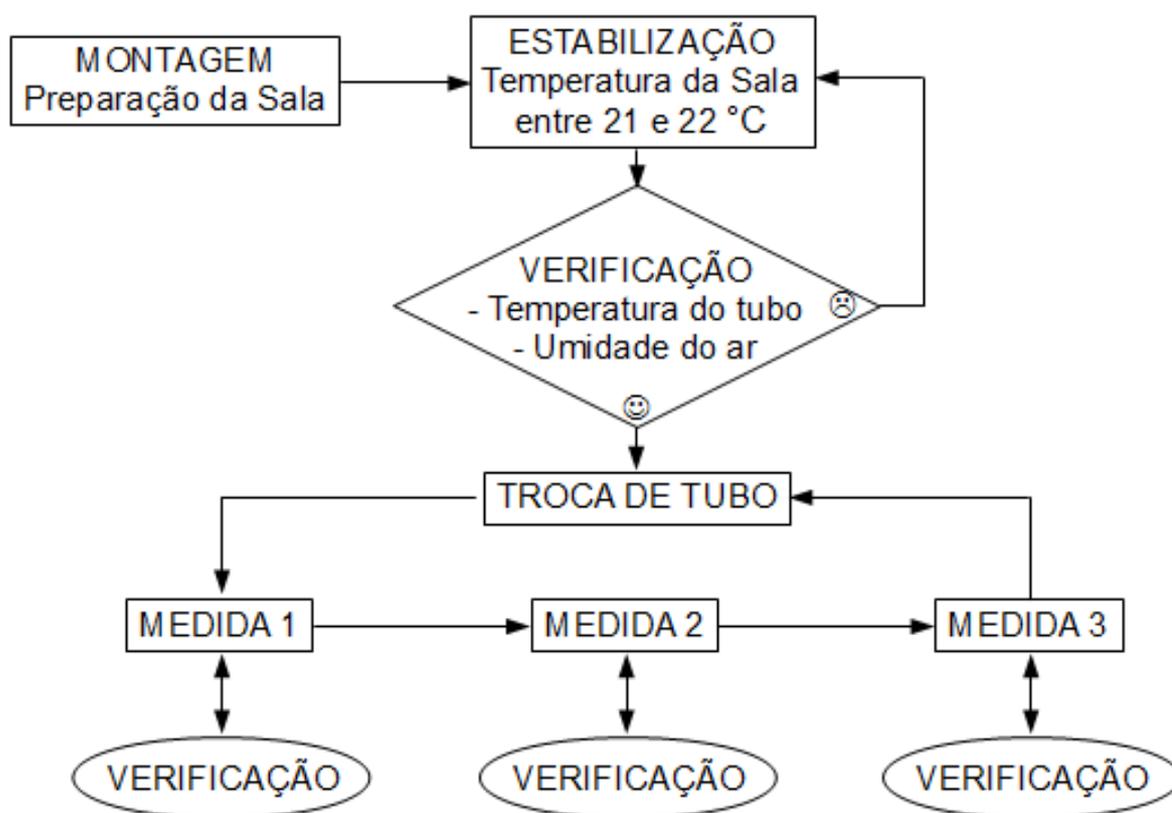


Figura 3.4 - Fluxograma do procedimento experimental utilizado na obtenção dos dados.

O tempo de gravação de cada medida para a *Experiência 1* e *2* variou de acordo com o tempo com que cada flautista conseguiu sustentar a nota tocada de forma confortável, mantendo assim, um tom regular, enquanto que, para a *Experiência 3* o tempo das gravações foi de 10 segundos aproximadamente.

3.8 Seleção dos Dados

Após a realização das experiências os dados obtidos foram brevemente analisados de acordo com os critérios expostos em 3.1 *Princípios e Critérios*. Desta forma, na busca pela eliminação de parâmetros e maior precisão nas análises, optou-se por trabalhar apenas com os dados referentes à *Experiência 3*: “flauta doce tocada pelo soprador artificial contendo Nitrogênio White Martins 4.6” e com fluxo de gás de $2 \pm 0,5$ litros/min devido aos seguintes motivos:

- A *Experiência 3* foi realizada com maior robustez e precisão nas medidas devido ao uso do Soprador Artificial, isto é, a qualidade dos dados obtidos é muito maior, pois as medidas apresentam muito mais estabilidade, sem as pequenas variações de frequência observadas nas medidas obtidas com as *Experiências 1 e 2*;
- Como tais medidas foram realizadas com um fluxo de gás de baixa intensidade, pode-se desconsiderar a influência de grandes efeitos de turbulência gerados no interior do tubo em uso, além dos dados obtidos aproximarem-se à situações mais próximas ao real, quando um flautista toca diretamente o instrumento.

Mesmo com a seleção dos dados dentro dos parâmetros apresentados, os dados das *Experiências 1 e 2* ainda foram considerados de forma qualitativa, assim como a opinião dos *Flautistas D e T*, mas com o cuidado de não sobrepor, ou mesmo influenciar de forma significativa, os resultados que viessem a ser obtidos de forma quantitativa.

3.9 Tratamento dos Dados

Após a obtenção dos dados, cada arquivo de áudio gerado por cada medida foi reproduzido pelo programa SpectraPLUS no modo “Post Process” (Processo Rápido) com a função “Peak Hold” (Manutenção do Picos) habilitada. Em seguida, para cada reprodução realizada, foi gerado um arquivo em texto puro (ascii), a partir

da função “Write to Text File...” (Gravar em Arquivo de Texto...), contendo o registro dos valores máximos de intensidade de todas as frequências presentes no sinal para cada áudio reproduzido. Vamos chamar esse procedimento inicial de *Primeiro Tratamento*. Como exemplo, segue abaixo as dez primeiras linhas do arquivo em texto puro do *ruído de fundo*, completamente visualizado no Gráfico 3.5.1, após passar pelo Primeiro Tratamento:

```

;Freq(Hz) Relative Amplitude (dB): Left
5.3833      -69.118683
8.0750      -69.071144
10.7666     -70.660324
13.4583     -73.155510
16.1499     -71.435364
18.8416     -74.593063
21.5332     -72.460777
24.2249     -73.207191
26.9165     -73.756096

```

Para a identificação dos principais harmônicos produzidos por cada som emitido por cada tubo, a partir dos valores máximos de intensidade de todas as frequências presentes no sinal para cada áudio reproduzido, foi utilizado o programa de computador Fityk 0.9.8 para a identificação dos picos de cada sinal.

O Fityk⁹¹ é um programa utilizado para ajustamento de curvas não-lineares genéricas e funções analíticas, especialmente em forma de picos, obtidas a partir de dados experimentais, ou seja, para separação e análise de picos não-lineares. Ele foi desenvolvido inicialmente para a análise de padrões de difração, mas pode ser facilmente utilizado por outros campos devido a sua grande flexibilidade: os parâmetros dos picos podem ser arbitrariamente ligados uns aos outros, por exemplo, a largura de um pico pode ser uma variável independente, pode ter a mesma largura de outro pico ou pode ser dada por uma equação comum a todos os picos. Além disso, dentre suas principais funções, ele oferece vários métodos de ajustamento não-linear, subtração do pano de fundo, calibração de dados, colocação fácil de picos e alteração dos parâmetros dos picos, automatização das tarefas mais comuns através de “scripts” (roteiros), etc. Por isso, ele é utilizado largamente em cristalografia, cromatografia, fotoluminescência, espectroscopia de fotoelétrons e, espectroscopia no infravermelho e Raman, para citar apenas algumas aplicações.

91 <http://fityk.nieto.pl>

Segue abaixo a tela do programa com os dados do tubo A de cobre:

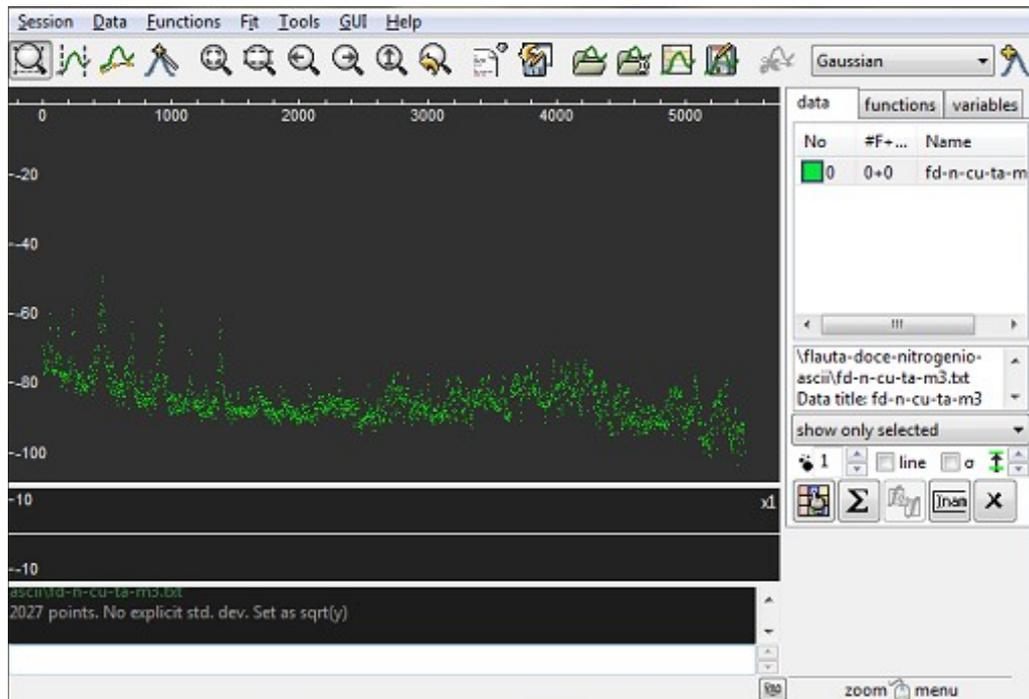


Figura 3.5 – Tela do programa Fityk 0.9.8.

4 RESULTADOS

“Pedras no caminho? Guardo todas, um dia vou construir um castelo...” - Fernando Pessoa

4.1 Dados Obtidos

Além dos dados da *Experiência 3*, segue abaixo, também, os dados das *Experiências 1 e 2*, mesmo que eles não tenham sido analisados de forma quantitativa.

4.1.1 Experiência 1

Tabela 4.1 - Dados Referentes à *Experiência 1*: Flauta Doce Tocada pelo *Flautista D*

Material	Tubo	Medida	Temperatura [± 2,3 °C]	Umidade do Ar [± 0,2 %]	Frequência Fundamental [Hz]
Alumínio	A	1	22,0	45,5	226,10
		2	21,8	45,5	457,58
		3	21,5	45,5	925,93
	B	1	21,8	48,5	226,10
		2	22,3	49,5	460,27
		3	22,3	49,5	925,93
Cobre	A	1	21,3	48,5	228,79
		2	22,3	47,5	457,58
		3	22,2	47,5	925,93
	B	1	22,5	48,5	228,79
		2	22,2	49,0	460,27
		3	21,8	50,0	928,62
Latão	A	1	22,3	47,5	228,79
		2	22,2	47,0	457,58
		3	22,3	47,0	925,93
	B	1	22,5	43,0	226,10
		2	22,3	44,0	457,58
		3	22,2	43,5	928,62

4.1.2 Experiência 2

Tabela 4.2 - Dados Referentes à Experiência 2: Flauta Transversal Tocada pelo Flautista T

Material	Tubo	Medida	Temperatura [± 2,3 °C]	Umidade do Ar [± 0,2 %]	Frequência Fundamental [Hz]
Alumínio	A	1	21,4	44,5	495,26
		2	21,3	44,5	497,96
		3	21,4	44,5	745,59
	B	1	20,9	43,5	495,26
		2	21,0	44,0	497,96
		3	21,2	44,5	745,59
Cobre	A	1	21,0	45,0	495,26
		2	20,9	45,0	497,96
		3	21,0	45,0	748,28
	B	1	20,9	45,5	497,96
		2	21,3	45,5	497,96
		3	21,2	45,5	748,28
Latão	A	1	20,8	43,0	495,26
		2	21,2	43,0	497,96
		3	21,4	43,5	748,28
	B	1	21,3	44,0	495,26
		2	21,3	44,0	497,96
		3	21,3	44,0	748,28

4.1.3 Experiência 3

Tabela 4.3 - Dados Referentes à Experiência 3: Flauta Doce Tocada pelo Soprador Artificial Contendo Nitrogênio White Martins 4.6 .

Material	Tubo	Medida	Temperatura [± 2,3 °C]	Umidade do Ar [± 0,2 %]	Fluxo do Gás [± 0,5 litros/min]	Frequência Fundamental [Hz]
Alumínio	A	1	21,3	56,5	18	939,39
		2	21,4	56,5	4	691,75
		3	21,1	56,5	2	460,27
	B	1	21,2	56,0	18	939,39
		2	21,1	56,0	4	691,75
		3	21,1	56,0	2	460,27
Cobre	A	1	21,3	55,5	18	939,39
		2	21,4	55,5	4	691,75
		3	21,4	55,5	2	460,27
	B	1	21,3	56,0	18	939,39
		2	21,1	56,0	4	691,75
		3	21,1	56,0	2	460,27
Latão	A	1	21,4	57,0	18	936,69
		2	21,1	57,0	4	691,75
		3	21,5	57,0	2	460,27
	B	1	21,1	56,0	18	939,39
		2	21,1	56,0	4	691,75
		3	21,2	56,0	2	460,27

4.2 Comparação dos Sons Harmônicos

Após o tratamento dos dados para a identificação do som fundamental e dos seus respectivos harmônicos para cada sinal analisado, foram construídos alguns gráficos para comparar as diferenças entre os sons harmônicos produzidos por cada tubo utilizado neste trabalho. Restringiu-se as diferenças analisadas entre os Tubos A e B.

4.2.1 Tubos A

Segue abaixo a representação gráfica e a tabela dos resultados obtidos com o tratamento dos sinais para a identificação dos picos dos sinais gerados pelos tubos A de alumínio, cobre e latão, respectivamente, na *Experiência 3*, com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min, a partir do programa Fityk:

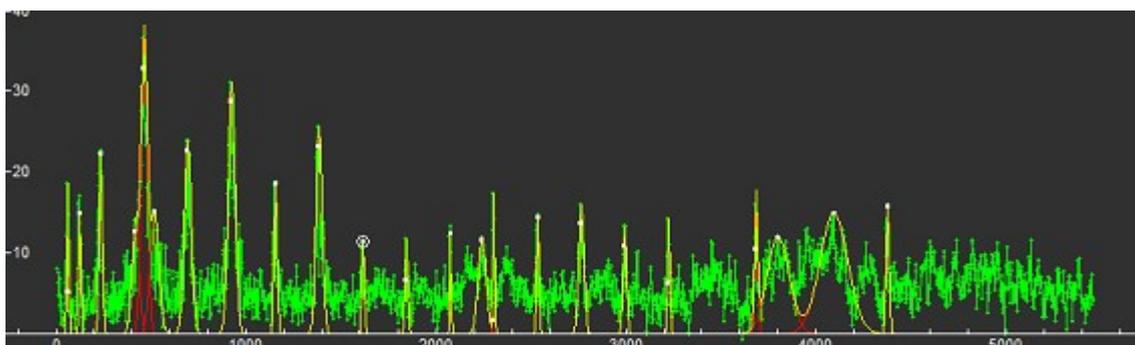


Figura 4.1 – Identificação dos picos do sinal gerado pelo tubo A de alumínio na *Experiência 3* com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min.

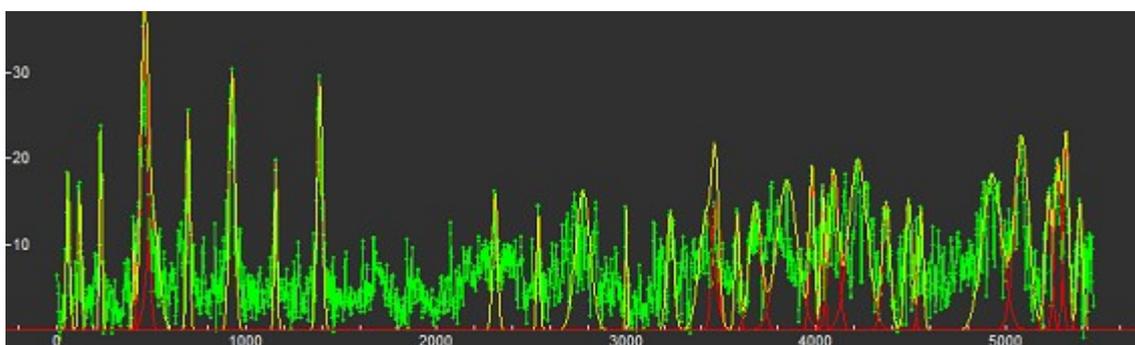


Figura 4.2 – Identificação dos picos do sinal gerado pelo tubo A de cobre na *Experiência 3* com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min.

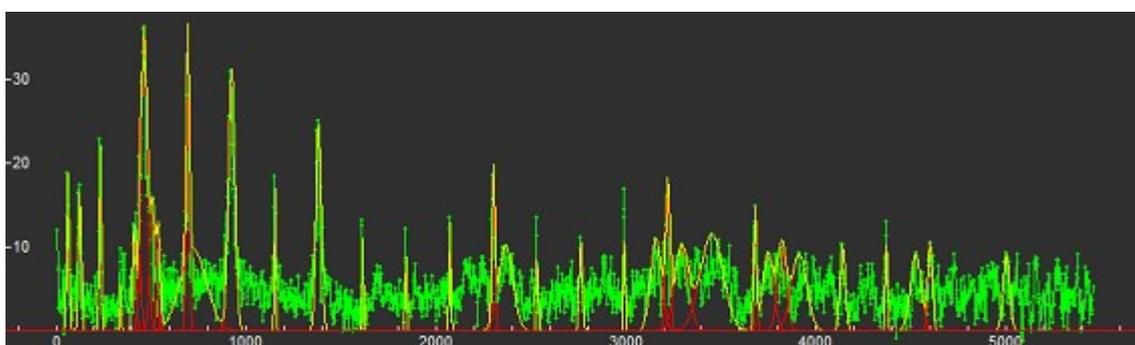
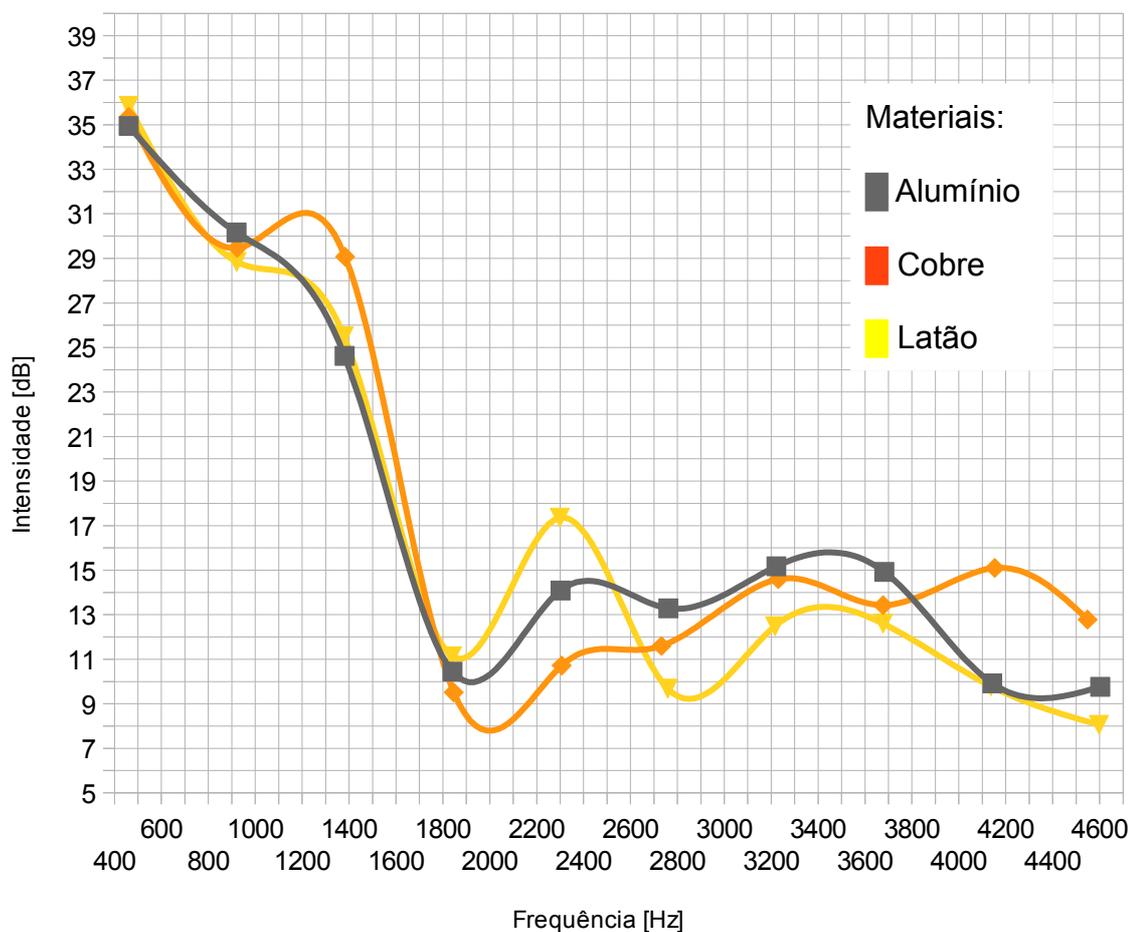


Figura 4.3 – Identificação dos picos do sinal gerado pelo tubo A de latão na *Experiência 3* com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min.

Tabela 4.4 – Identificação dos harmônicos dos sinais gerados pelos tubos A de alumínio, cobre e latão, respectivamente, na *Experiência 3*, com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min.

	Alumínio		Cobre		Latão	
	Frequência [Hz]	Intensidade [dB]	Frequência [Hz]	Intensidade [dB]	Frequência [Hz]	Intensidade [dB]
Fundamental	460,27	34,95	460,27	35,35	460,27	35,86
1° Harmônico	920,54	30,17	923,24	29,47	920,54	28,84
2° Harmônico	1380,82	24,62	1383,51	29,07	1378,12	25,51
3° Harmônico	1841,09	10,44	1846,47	9,52	1838,40	11,14
4° Harmônico	2301,36	14,09	2306,74	10,72	2298,67	17,36
5° Harmônico	2761,63	13,29	2732,03	11,59	2758,94	9,68
6° Harmônico	3221,91	15,17	3229,98	14,59	3216,52	12,49
7° Harmônico	3682,18	14,93	3676,79	13,43	3676,79	12,60
8° Harmônico	4142,45	9,92	4153,22	15,10	4137,07	9,79
9° Harmônico	4602,72	9,76	4548,89	12,78	4597,34	8,06

Gráfico 4.1 - Comparação dos harmônicos dos sinais gerados pelos tubos A de alumínio, cobre e latão, respectivamente, na *Experiência 3*, com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min.



4.2.2 Tubos B

Segue abaixo a representação gráfica e a tabela do resultado obtido com o tratamento dos sinais para a identificação dos picos dos sinais gerados pelos tubos B de alumínio, cobre e latão, respectivamente, na *Experiência 3*, com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min, a partir do programa Fityk::

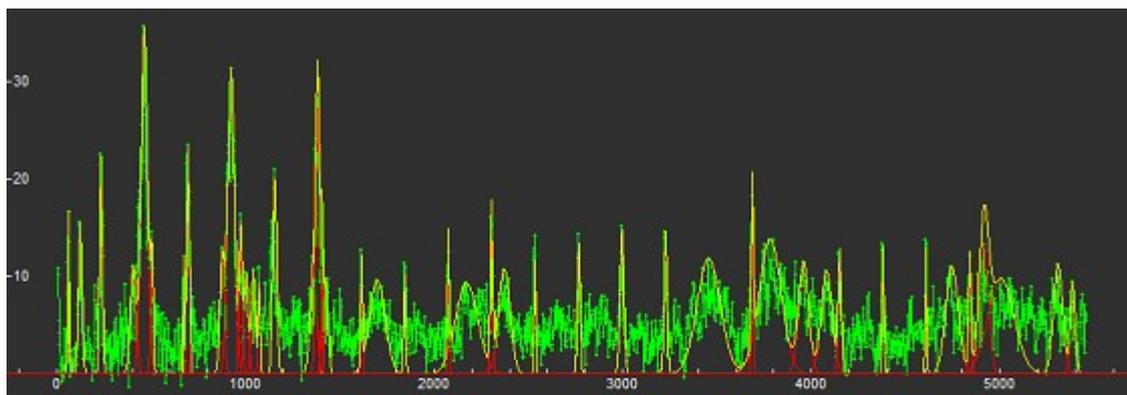


Figura 4.4 – Identificação dos picos do sinal gerado pelo tubo B de alumínio na *Experiência 3* com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min.

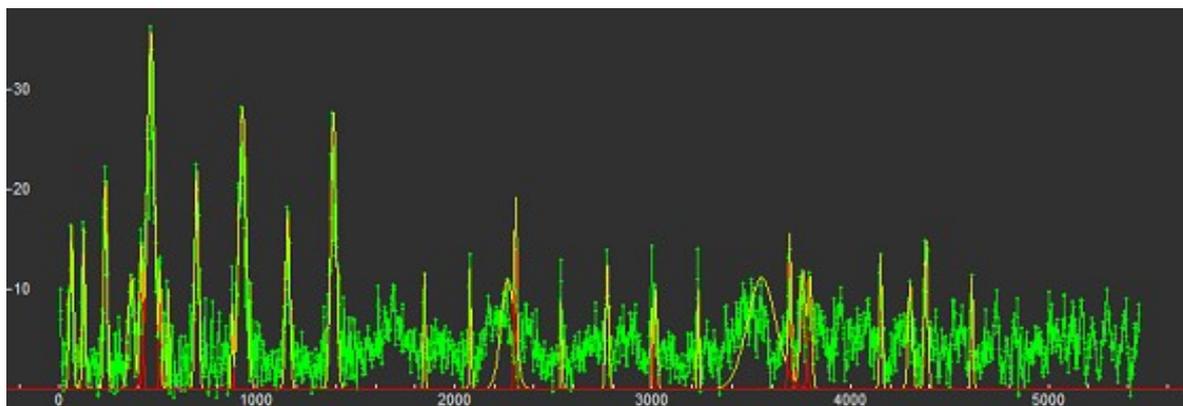


Figura 4.5 – Identificação dos picos do sinal gerado pelo tubo B de cobre na *Experiência 3* com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min.

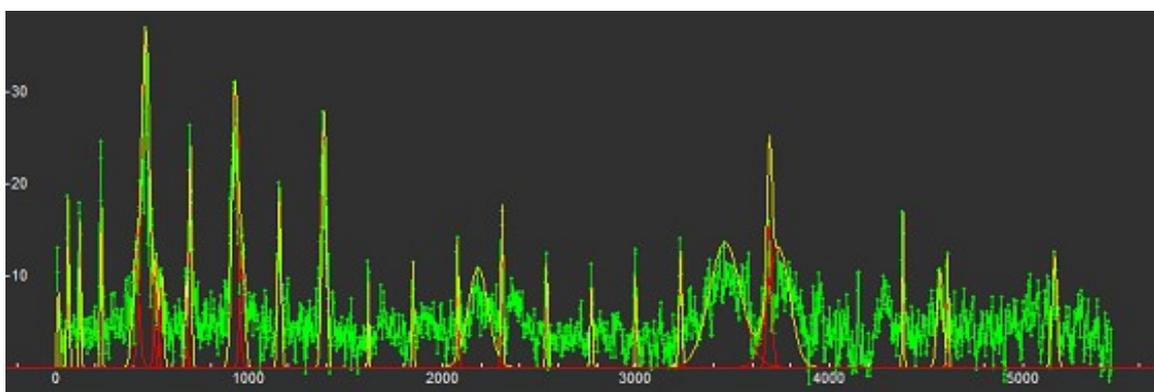
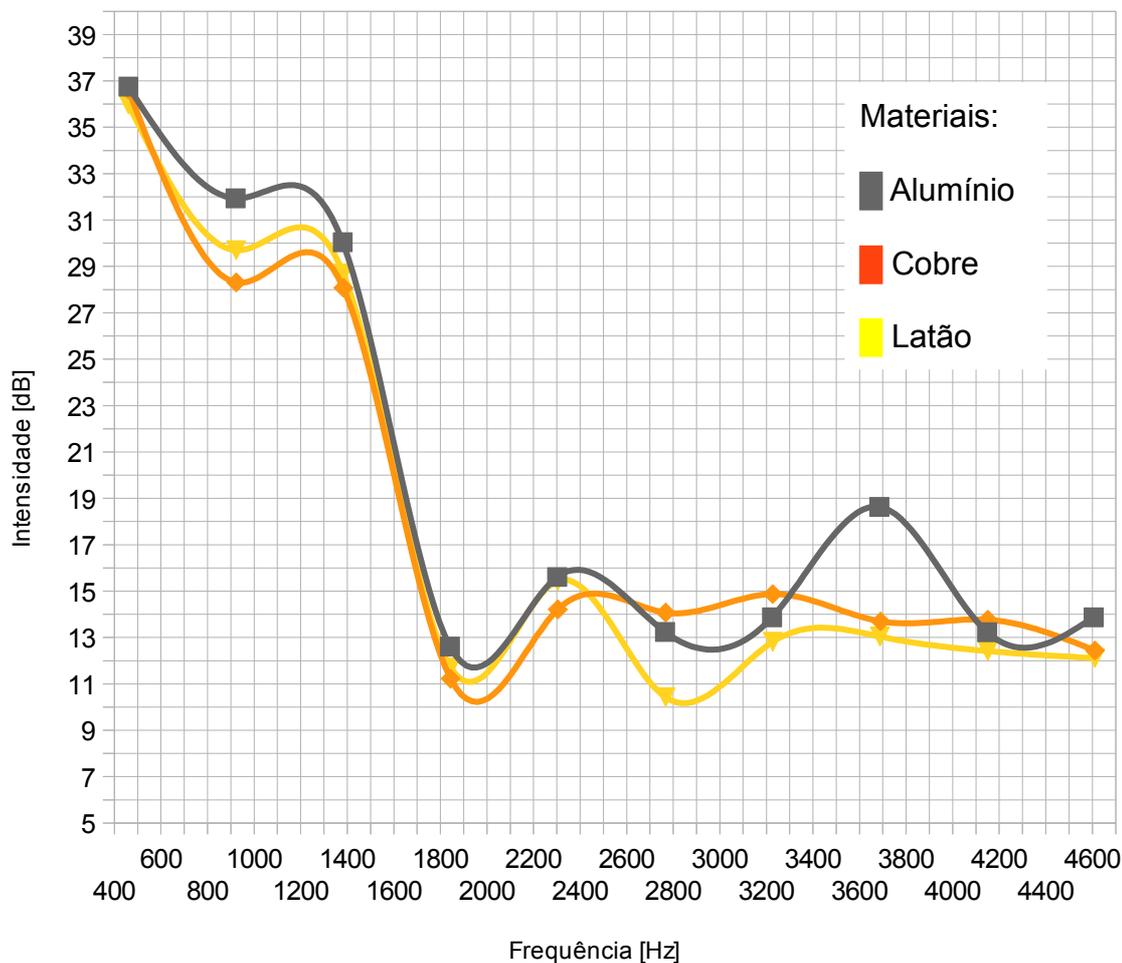


Figura 4.6 – Identificação dos picos do sinal gerado pelo tubo B de latão na *Experiência 3* com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min.

Tabela 4.5 – Identificação dos harmônicos dos sinais gerados pelos tubos B de alumínio, cobre e latão, respectivamente, na *Experiência 3*, com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min.

	Alumínio		Cobre		Latão	
	Frequência [Hz]	Intensidade [dB]	Frequência [Hz]	Intensidade [dB]	Frequência [Hz]	Intensidade [dB]
Fundamental	460,27	36,75	460,27	36,62	460,27	35,99
1° Harmônico	920,54	31,94	923,24	28,31	923,24	29,70
2° Harmônico	1380,82	30,04	1383,51	28,08	1383,51	28,70
3° Harmônico	1841,09	12,61	1843,78	11,22	1843,78	11,71
4° Harmônico	2301,36	15,61	2304,05	14,21	2304,05	15,45
5° Harmônico	2764,32	13,24	2767,02	14,07	2767,02	10,42
6° Harmônico	3224,60	13,87	3227,29	14,87	3227,29	12,82
7° Harmônico	3684,87	18,64	3690,25	13,69	3687,56	13,04
8° Harmônico	4147,83	13,23	4150,52	13,76	4150,52	12,41
9° Harmônico	4605,41	13,88	4610,80	12,44	4610,80	12,11

Gráfico 4.2 - Comparação dos harmônicos dos sinais gerados pelos tubos B de alumínio, cobre e latão, respectivamente, na *Experiência 3*, com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min.



4.3 Opinião dos Flautistas

Uma pequena consulta a respeito do som gerado por cada tubo utilizado foi feita após a realização de cada experiência com cada flautista para reunir algumas opiniões em relação a característica sonora produzida por cada tubo, tipo do som, dificuldade de se tocar o instrumento de acordo com cada tubo acoplado, etc.

De acordo com o *Flautista D*, que tocou a flauta doce, o som da flauta tornou-se menos *brilhante* no decorrer das medidas. Como já comentado anteriormente, os músicos possuem um linguajar em que associam tipos de som com características diferentes, ou seja, relacionam timbres diferentes, ou “cor do som”, à sensações. Como os tubos eram analisados na sequência: alumínio, cobre e latão, logo supomos que o *Flautista D* quis afirmar que o som gerado pelo tubo de alumínio é o mais *brilhante* entre os três materiais analisados e que o som produzido pelo tubo de cobre é mais *brilhante* do que o som produzido pelo tubo de latão. Além disso, o *Flautista D* afirmou que no decorrer das medidas também aumentou-se a dificuldade de se tocar a flauta⁹², ao ponto de ter que “soprar para dentro” e não articular⁹³ muito para conseguir tocar com mais facilidade, ao passo que, ele teve que mudar gradualmente a sílaba utilizada no ataque⁹⁴ de “tu” para “du” até “u” para conseguir sustentar bem o som da flauta. O *Flautista D* afirmou que não identificou (sentiu) diferença de som entre tubos de mesmo material.

O *Flautista T*, que tocou a flauta transversal, utilizou a vogal “a” para entoar a flauta em todas as medidas com o propósito de proporcionar um som mais *brilhante*. Assim, o tubo de alumínio foi identificado pelo *Flautista T* como sendo o tubo mais fácil de se tocar (“gasta-se” menos ar para realizar a emissão do som) e com um som mais *estridente*. Para ele, o tubo de latão foi o material que ofereceu maior dificuldade para se tocar a flauta, enquanto que o tubo de cobre proporcionou um som mais encorpado (menos estridente, mais aveludado), talvez por se tratar de um material mais robusto. Além disso, suas impressões foram de que o tubo de cobre tenha mais harmônicos graves e que o tubo de latão tenha mais harmônicos agudos (ou menos harmônicos graves), proporcionando assim, um som mais *aberto* e *brilhante*. Em relação aos tubos de mesmo material, o *Flautista T* percebeu uma

⁹² Nesse caso, flautistas costumam utilizar a expressão: “tirar o som da flauta”. Essa expressão é amplamente utilizada por qualquer músico com seu respectivo instrumento musical.

⁹³ Técnicas e “geitos” utilizados por músicos para atingir um efeito ou resultado musical.

⁹⁴ Começa a tocar uma frase musical.

diferença sonora apenas entre os tubos de latão.

Para cada caso, tanto para a *Experiência 1*, realizada com o bocal de flauta doce, quanto para a *Experiência 2*, realizada com o bocal de flauta transversal, a opinião de ambos flautistas demonstra que há variações nos sons dos instrumentos utilizados de acordo com suas impressões e sensações em relação ao som produzido por flautas constituídas por bocais idênticos acoplados à tubos de mesmas dimensões e materiais diferentes.

4.4 Análise da Característica Sonora de Cada Material

Observando as Tabelas 4.4 e 4.5 e, os Gráficos 4.1 e 4.2 constatou-se que todos os tubos, tanto A quanto B, de alumínio, cobre e latão geraram uma frequência (nota) fundamental idêntica na *Experiência 3* e que o primeiro e o segundo harmônico, por possuírem uma maior intensidade sonora, tem uma influência mais significativa na definição da característica sonora do som produzido pelos tubos utilizados. Após o segundo harmônico, há uma queda intensa no valor da intensidade dos harmônicos seguintes que permanecem restritos a uma pequena faixa de aproximadamente 10 dB no espectro sonoro registrado.

Com a identificação da influência significativa do som fundamental e dos dois primeiros harmônicos na característica sonora do som produzido pelos tubos utilizados na *Experiência 3* em cada medida com fluxo de 2 litros/min, foi realizada uma análise mais detalhada da distribuição das três primeiras frequências (por medida) com o ajuste dos picos por meio de *Lorentzianas*, ao invés de *Gaussianas*, a partir do programa Fityk, revelando assim, que a FWHM (largura a meia altura) de cada caso determina a característica sonora de cada um dos metais utilizados.

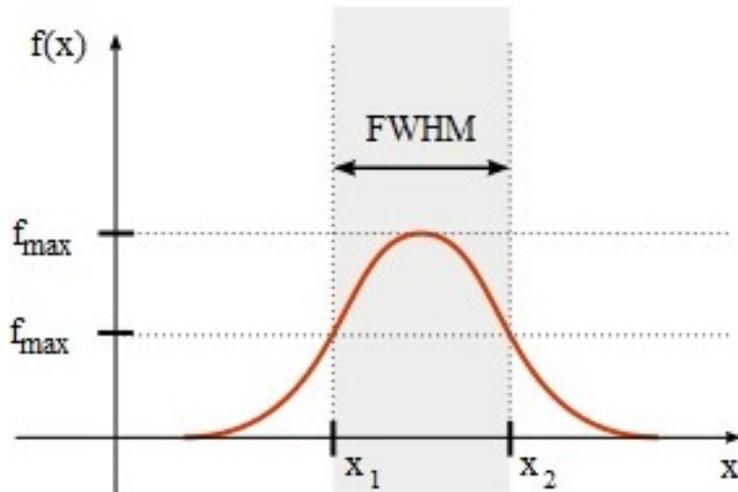


Figura 4.7 – Representação visual da FWHM (largura a meia altura).

Como a FWHM é dada pela diferença entre dois valores extremos de uma variável independente no qual a função atinge metade de seu valor máximo, fornecendo assim, o parâmetro de uma curva ou função referente ao seu "abaulamento", podemos, por exemplo, identificar e analisar a variação da precisão de um sinal, pois quanto maior a FWHM de um pico (harmônico identificado) menor é a sua precisão sonora em relação a uma determinada frequência.

Os dados das Tabelas 4.4 e 4.5 e, dos Gráficos 4.1 e 4.2 foram obtidos com o ajuste dos picos por meio de *Gaussianas*, ou seja, funções que possuem uma curva muito mais distribuída ("larga") do que as funções *Lorentzianas*. Por isso, por questões de detalhamento e precisão, o ajuste dos picos por meio de *Lorentzianas* foi utilizado para a identificação dos sons fundamentais e dos dois primeiros harmônicos das medidas com fluxo de 2 litros/min da *Experiência 3*. Os resultados de tais análises podem ser observados nas Tabelas 4.6 e 4.7 e, nos Gráficos 4.3 e 4.4.

Tabela 4.6 - Comparação da frequência fundamental e dos dois primeiros harmônicos dos sinais gerados pelos tubos A de alumínio, cobre e latão, respectivamente, na *Experiência 3*, com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min.

	Alumínio		Cobre		Latão	
	Frequência [Hz]	FWHM	Frequência [Hz]	FWHM	Frequência [Hz]	FWHM
Fundamental	460	32	460	43	460	38
1° Harmônico	921	43	923	40	921	32
2° Harmônico	1381	38	1384	32	1378	32

Gráfico 4.3 - Comparação da frequência fundamental e dos dois primeiros harmônicos dos sinais gerados pelos tubos A de alumínio, cobre e latão, respectivamente, na *Experiência 3*, com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min.

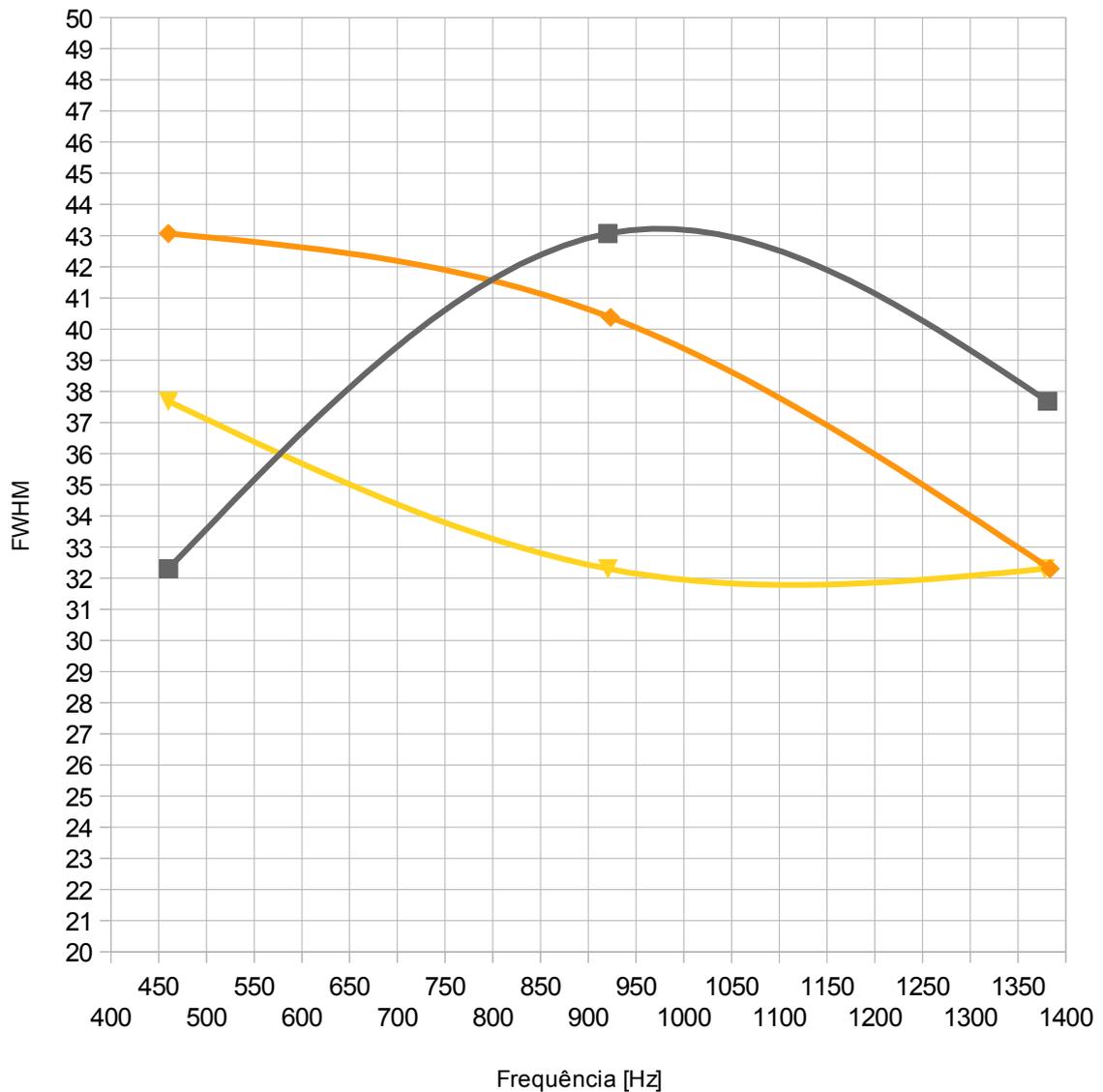
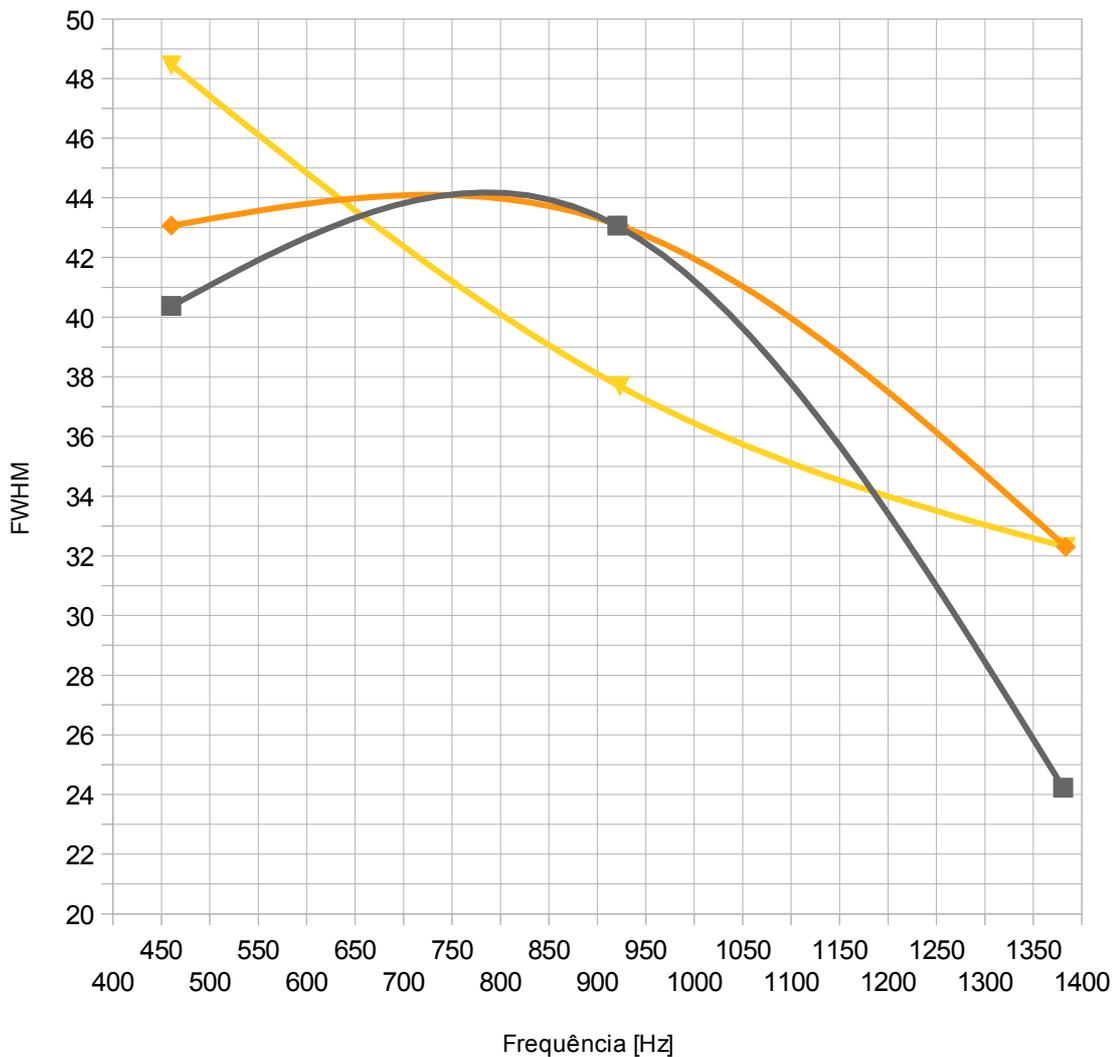


Tabela 4.7 - Comparação da frequência fundamental e dos dois primeiros harmônicos dos sinais gerados pelos tubos B de alumínio, cobre e latão, respectivamente, na *Experiência 3*, com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min.

	Alumínio		Cobre		Latão	
	Frequência [Hz]	FWHM	Frequência [Hz]	FWHM	Frequência [Hz]	FWHM
Fundamental	460	40	460	43	460	48
1° Harmônico	921	43	923	43	923	38
2° Harmônico	1381	24	1384	32	1384	32

Gráfico 4.4 - Comparação da frequência fundamental e dos dois primeiros harmônicos dos sinais gerados pelos tubos B de alumínio, cobre e latão, respectivamente, na *Experiência 3*, com fluxo de $2 \pm 0,5$ litros/min.



A partir dos Gráficos 4.3 e 4.4 nota-se que a FWHM tanto dos Tubos A quanto dos Tubos B possuem comportamentos semelhantes. Com isso, constata-se em ambos os gráficos que:

- Para os tubos de Alumínio:
 - A FWHM apresenta uma tendência *parabólica*, indicando que os tubos de alumínio, neste caso, tende a ter uma menor precisão nos seus sons harmônicos à medida em que aumenta-se o valor de suas respectivas frequências;
 - Isso quer dizer que os sons de frequências próximas aos picos (harmônicos) tendem a ser bem **mais** distribuídos (menos concentrados) à medida que aumenta-se o valor da frequência dos sons harmônicos, proporcionando assim, sons harmônicos agudos (de maior frequência) bem **mais** distribuídos. Com isso, necessita-se de **menos** energia (menor fluxo de gás) para a emissão do som nos tubos de alumínio;
 - Pressupõe-se que a característica de um som *estridente*, ou mesmo, mais *brilhante* possa estar relacionado à certa imprecisão intrínseca dos sons harmônicos agudos produzidos pelos tubos de alumínio.

- Para os tubos de Cobre:
 - A FWHM para os tubos de cobre, sendo levemente decrescente, apresenta um comportamento mais regular, ou mesmo, intermediária em relação aos tubos de alumínio e latão;
 - Constata-se que os sons harmônicos produzidos pelos tubos de cobre são mais “harmonicamente distribuídos”, isto é, são mais suavemente definidos à medida que aumenta-se o valor da frequência dos sons harmônicos e distribuídos de forma mais uniforme ao longo da função;
 - Pressupõe-se que tais características proporcionam um som mais *encorpado*, ou mesmo, *aveludado* devido aos sons harmônicos mais bem distribuídos ao longo da função.

- Para os tubos de Latão:
 - A FWHM apresenta uma queda muito brusca à medida que aumenta-se o

valor da frequência, indicando que os sons harmônicos do tubo de latão tendem a se definirem de forma muito mais rápida e precisa do que nos tubos de alumínio e cobre;

- Isso quer dizer que os sons de frequências próximas aos picos (harmônicos) tendem a ser bem **menos** distribuídos (mais concentrados) à medida que aumenta-se o valor da frequência dos sons harmônicos, proporcionando assim, sons harmônicos agudos (de maior frequência) bem **menos** distribuídos. Com isso, necessita-se de **mais** energia (maior fluxo de gás) para a emissão do som neste tipo de tubo;
- Pressupõe-se que tal característica possa proporcionar um som mais “seco” (preciso – similar a um som emitido por um apito, por exemplo) e menos *cromático*⁹⁵ devido aos sons harmônicos bem mais concentrados, precisos e estabelecidos.

4.5 Conclusões

Durante o período de análise e seleção das medidas notou-se uma grande diferença de qualidade entre os dados obtidos na *Experiência 3* em relação aos dados obtidos nas *Experiências 1 e 2*, justamente pela *Experiência 3* ter sido realizada de forma mais precisa e robusta com o uso de um Soprador Artificial. Com isso, verificou-se a importância da problematização realizada no tópico 3.1 *Princípios e Critérios* na busca por (novas) metodologias mais precisas para o estudo e análise de sons produzidos por instrumentos musicais, ou mesmo, no nosso caso específico, flautas constituídas por bocais idênticos acoplados à tubos de mesmas dimensões e materiais diferentes.

Ao comparar os sons harmônicos produzidos pelas flautas utilizadas neste trabalho, constatou-se que o som fundamental mais os seus dois primeiros harmônicos são os fatores que determinam o perfil do som emitido pelas flautas, ao passo que, verificou-se que a análise da FWHM (largura a meia altura) de tais fatores determina a característica sonora de cada um dos metais utilizados.

Qualitativamente, de acordo com a opinião dos flautistas convidados, há diferenças sutis, porém significativas a quem possui percepção musical, em relação

⁹⁵ Em Música, um som cromático é aquele que possui diversas frequências (tons e semitons).

ao som produzido pelas flautas utilizadas neste trabalho. Assim, de acordo com os flautistas, flautas constituídas por materiais diferentes produzem sons com características (timbres, cores, etc) diferentes.

Quantitativamente, foi verificado a partir de experiências realizadas com parâmetros fixos (temperatura, umidade do ar, fluxo de gás, tipo de gás, geometria e dimensões dos bocais e dos tubos) que somente o tipo de material é o fator que determina o perfil do som produzido por flautas constituídas por bocais idênticos acoplados à tubos de mesmas dimensões e materiais diferentes.

4.6 Trabalhos Futuros

Este trabalho abriu um novo campo de estudo dentro do grupo de pesquisas no qual ele foi desenvolvido. Tratando-se de um tema fortemente interdisciplinar, há diversas possibilidades de novos trabalhos futuros que podem utilizar toda a base metodológica sedimentada e aprimorada neste trabalho. Além disso, a realização deste trabalho produziu uma série de dados que estão prontos para serem analisados em busca de novas interpretações quanto a influencia do material no som da flauta.

Outras condições, parâmetros e variáveis podem ser analisadas, assim como outras ferramentas digitais podem ser utilizadas para o respectivo tratamento e análise dos dados. Assim, análises mais detalhadas e mais precisas, sob melhores condições, juntamente com ferramentas mais robustas de análise, como por exemplo, programas que utilizam algoritmos baseados em ondículas⁹⁶ (Wavelets), podem fornecer muitas novas informações.

⁹⁶ Termo mais apropriado para a língua portuguesa para se referir às Wavelets de acordo com Henrique (2002).

4.7 Disponibilização dos Dados

Juntamente a este trabalho, segue anexado um CD-ROM (PC-compatível) contendo:

- Os dados coletados e registrados no formato WAV pelo programa SpectraPLUS 5.0 durante as *Experiências 1, 2 e 3*, além do *ruído de fundo*;
- Os dados do *Primeiro Tratamento* no formato texto/ASCII “contendo o registro dos valores máximos de intensidade de todas as frequências presentes no sinal para cada áudio reproduzido”, exportados pelo programa SpectraPLUS 5.0 a partir dos arquivos no formato WAV registrados pelo mesmo programa;
- Os dados produzidos pelo programa Fityk 0.9.8 e exportados no formato texto/ASCII contendo os 40 primeiros picos (sons harmônicos) identificados para cada medida com fluxo de 2 litros/min da *Experiência 3*;
- Alguns dados extras coletados, mas não utilizados neste trabalho (off);
- Uma cópia deste trabalho no formato PDF;
- Uma cópia da apresentação deste trabalho no formato PDF;
- Uma cópia do vídeo com o título “Procedimento Experimental”, onde está registrado parte do procedimento experimental realizado durante a coleta de um dado real na *Experiência 3*. Duração: 3:44; Câmera: Prof. Dr. José Luis Passamani Junior.

REFERÊNCIAS

Almeida; Shari S. de; **"A Influência da Rolha de Cortiça e do Stopper de Nylon na Qualidade Sonora da Flauta Transversal - A Percepção de um Grupo de Flautistas"**; Dissertação (Mestrado); Faculdade de Música da UFMG; Belo Horizonte, 2010; 121p.

Backus, John. **"Effect of wall material on the steady-state tone quality of woodwind instruments."** 36, no.10 (1964): 1881-1887.

Blood, Brian. **"music theory online: staves, clefs & pitch notation"**; Disponível em: <http://www.dolmetsch.com/musictheory1.htm>; Acesso em 01/05/2010.

Bolton, Philippe; (Recorder Maker); "How Recorders Work". Retrieved 2009-05-30; Disponível em <http://www.flute-a-bec.com/acoustiquegb.html>. Acesso em 15/03/2011

Carvalho, Paulo Cezar P.; Velho. Luiz; Cicconet, Marcelo; Krakowski, Sergio; **Métodos Matemáticos e Computacionais em Música - São Carlos, SP** : SBMAC, 2009, 108p., 20.5 cm - (Notas em Matemática Aplicada; v. 38); ISSN 2175-3385

Cocchi A.; Tronchin L.; **"Material and obsolescence on flute tone quality"**; J. Acoust. Soc. Am. 103(5):2835, 1998. Disponível em <http://ciarm.ing.unibo.it>. Acesso em 10/11/2011

Coelho, Fabiana M.; POS287; **A Influência do Trato Vocal na Qualidade Sonora da Flauta**; Trabalho apresentado no XVIII Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação (ANPPOM), Salvador – 2008; 7 páginas (378-384)

COGAN, Robert. Music seen, **Music Heard: a picture book of musical design**. 1. ed. Cambridge: Publication Contact International, 1998. 127p.

Coltman, John W. **"Effect of material on flute tone quality."** Journal of the Acoustical Society of America. 49, no.2 (1971): 520-523.

Coltman, J. W.; **'Acoustical analysis of the Boehm flute'**, *J. Acoustic. Soc. Am.*, 65: pp. 499-506 (1979); 7 páginas

Coltman, John W.; **"Material Used in Flute Construction"**; *Woodwind World*, Vol.12, No.1,p.20-21; FEB.1973-WW;

Cooley, J., Tukey, J. (1965), **"An Algorithm For the Machine Computation of Complex Fourier Series"**, *Mathematics of Computation* 19, pp. 297-301.

Faria, Regis Rossi Alves. **"Aplicação de wavelets na análise de gestos musicais em timbres de instrumentos acústicos tradicionais"**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Eletrônica. São Paulo 1997. 182p.

Fletcher, Neville H., Rossing, Thomas D. (1998), **The Physics of Musical Instruments**, New York, Springer-Verlag.

Fuks, Leonardo (1993). **O Bambu Sonante: Um Estudo da Qualidade em Palhetas de Clarineta**. Rio de Janeiro: COPPE UFRJ. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção.

Garcia, Maurício Freire (2000). **Gravando a flauta: aspectos técnicos e musicais**. *PerMusí – revista de performance musical*. Belo Horizonte: Centro Gráfico da UFMG, vol 1.

Henrique, Luís L.; **Acústica Musical**; Edição da FUNDAÇÃO CALOUSTE GULBENKIAN, Av. de Berna - Lisboa; 2002; ISBN 972-31-0987-5; 1130p.

Helmholtz, H. L. F. V.; "**On the Sensations of Tone**"; 1998; Thoemmes Continuum; English ed 1875 edition, Classics in Psychology; vol.9; 852p.

Houtsma, A. J. M., Rossing, T. D., Wagenaars, W. M. (1987), *Auditory Demonstrations*, (Compact Disc Philips 1126-061), New York, Acoustical Society of America.

Hurtgen, Clare M.; "**Body Vibrational Spectra of Metal Flute Models**"; Senior Thesis; Physics Department; Duke University; 1999; 24p.

Kumar, P.T. Ajith, P. Jessy Thomas, and C. Purushothaman. "**Flute vibrations by holographic interferometry**." *Applied Optics*. 29, no.19 (1990): 2841-2842.

KREYSZIG, Erwin (1993), **Advanced Engineering Mathematics**, New York, Wiley.

Lazzarini, Victor E. P.; **Elementos de Acústica**; Universidade Estadual de Londrina; Apostila do curso "Laboratório de Música Eletroacústica"; 47p.

Linortner, Renate; "**Silver, Gold, Platinum - And The Sound Of The Flute**"; 2001; Disponível em: http://iwk.mdw.ac.at/Forschung/english/linortner/linortner_e.htm ; Acesso em 03/06/2011.

López, Manuel Recuero (2000), **Ingeniería Acústica**, Madrid, Paraninfo

Med, Bohumil; **Teoria da Música** / Bohumil Med. - 4. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF : Musimed, 1996; ISBN 978-85-85886-02-1

MIKLÓS, A., ANGSTER, J. (2000), "**Properties of the Sound of Flue Organ Pipes**", *Acustica-acta acustica* 86, pp. 611-622

MORSE, P.M., INGARD, K. U. (1968), **Theoretical Acoustics**, New York, McGraw-Hill. Reedição: Princeton, Princeton University Press, 1986.

Nussenzveig, Herch Moysés; **Curso de Física Básica** - vol. 2 / 4. edição rev. -- São Paulo: Edgard Blucher, 2002; ISBN 978-85-212-0299-8

Panzer, Arjuna C.; Moura, Dácio G.; Módulo Didático: **Produção e Percepção de Sons**; Currículo Básico Comum - Ciências Ensino Fundamental; Centro de Referência Virtual do Professor – SEE-MG; Março 2009

Pierce, Allan D. (1989), **Acoustics: An Introduction to its Physical Principles and Applications**, New York, Acoustical Society of America.

Pierre (1977)

Schaeffer, Pierre (1977); **Traité des Objets Musicaux**, Paris, Seuil.

Resnick, Robert; Halliday, David; Krane, Kenneth S.; **Física**, v.2; tradução Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco ... [et al.]. - 5.ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2007; ISBN 978-85-216-1368-8

ROADS, C. et al. The computer music tutorial. Cambridge, MIT Press, 1996, 1234 p.

Vasconcelos, José; **Acústica musical e organologia**; Porto Alegre: Movimento, 2002; 216p.; 15x22cm. - (Luís Cosme; 23); ISBN 85-71950-31-8 (broch.)

Verge, M.-P., Fabre, B., Hirschberg, A., Wijnands, A. P. J., Steenbergen, A. Van (1994), "**Jet Oscillations and Jet Drive in Recorder-Like Instruments**", *Acustica-acta caustica* 2, pp. 403-419

Verge, Marc-Pierre (1995), **Aeroacoustics of Confined Jets, with Applications to the Physical Modeling of Recorder-Like Instruments**, Tese Ph. D., Eindhoven University of Technology, Holanda. Editado em Den Haag, CIP-DATA Koninklijke Bibliotheek

White, Joan Lynn. "**A Spectral Analysis of Tones Produced on Five Flutes Constructed of Different Metals.**" University of North Carolina— Greensboro. Ann Arbor: University Microfilms (No.81:144886), 1980.

Widholm, G., Linortner, R., Kausel, W., Bertsch, M. (2001), "**Silver, Gold, Platinum – and the Sound of the Flute**", Proceedings of International Symposium on Musical Acoustics (ISMA2001), Perugia, 2001, pp. 277-280

The Flute Book: Chapter 7, Tone; p.89-90; "Quote from Dale Higbee article "**Needed: A Gold Flute or a Gold Lip**", *Woodwind World* 13 no. 3 (1974): 22."

Zappas, Kelly Roncone; "**The Science of Sound: Examining the Role of Materials in Musical Instruments**"; Disponível em:

http://findarticles.com/p/articles/mi_qa5348/is_200708/ai_n21295745/;
JOM. FindArticles.com; 22 Dec, 2010; Acesso em 23/04/2011;

DISCURSO DE COLAÇÃO DE GRAU DA TURMA DE FÍSICA 2006/1 DA UFES (09/08/2006)
ORADOR (AUTOR): JULIHERME FRANCISCO PIFFER

Boa noite. Antes de mais nada, gostaríamos de agradecer a presença de todos nesta difícil e singela Colação de Grau.

Quando entramos na Universidade, a 4, 5 ou 6 anos atrás, tínhamos planos, metas e objetivos. Alguns estavam mais seguros, uns mais atrapalhados e outros completamente perdidos. No decorrer do curso, nossas turmas foram se fragmentando, ao toque de reprovações, desistências e re-opções, mas nós continuamos persistentes, ou não, talvez pensando "Até quando, insensatos, amareis a tolice, e os tolos odiarão a ciência?" (Provérbios 1,22), sem saber, necessariamente, direito o porquê.

No início, a Universidade era um lugar novo, agradável e interessante, passando para, não muito obstante, um lugar confuso e ao final, desesperador. Mas tudo isso, é claro, podem não passar de meras interpretações à partir de cada formando aqui presente. Mesmo que venha soar como exotérico, há um fragmento de texto dizendo que "Toda criação nasce do pensamento. Mas pensamento é energia. Se pensarmos positivamente, então essa atitude positiva será refletida, voltando para nós, através de experiências de vida positivas – a menos que tenhamos certas coisas a aprender antes. Mas é sempre uma opção nossa perceber esse aprendizado como uma lição dolorosa ou não. Todos os eventos desencadeiam uma experiência ou emoção correspondente à nossa maneira de ver o evento. Vivemos num plano de dualidade e, assim sendo, todo evento tem duas facetas. Podemos governar a resposta emocional escolhendo a maneira de ver ou de pensar a respeito do evento" (Jasmuheen; Em Sintonia: A Arte da Ressonância).

Desta forma, dizer que o curso de Física da UFES, ou de qualquer outro lugar é algo desesperador ou regozijante, é meramente uma questão de ponto de vista. Se estudamos, estudamos, estudamos, estudamos... estudamos... estudamos... e mesmo assim, temos a impressão de "nadarmos, nadarmos, nadarmos e de morrermos na praia", deveríamos lembrar que "Se você não gostar de algo, pelo menos ele fortalecerá seu caráter!" (Calvin & Haroldo). Além disso, depois de tantos afogamentos e reanimações, percebemos que, talvez, e que por muitas vezes, não tenhamos chegado na praia, mas que nossos "braços" ficaram mais fortes, bem mais fortes...

Pelas ações e reações, pelos positivos e negativos, pelo bem e pelo mal, cabe a nós interpretarmos os eventos e as causalidades que estão à nossa volta, ao passo que, tal dualidade é necessária para que o sistema esteja e mantenha-se em equilíbrio. Assim sendo, a natureza é perfeitamente fantástica. Se existem pessoas intransigentes, arrogantes, autoritárias e hipócritas, automaticamente, pela conservação da energia, devem existir, também, pessoas flexíveis, simpáticas, democráticas e sinceras. Como um professor do departamento que certa vez disse: "Pessoas boas e ruins nós encontramos em qualquer lugar, tanto na vida quanto também aqui, na Academia. Sendo assim, não pense que aqui você estará imune a dificuldades". Sendo assim, podemos pensar que "A vida é dura para quem é mole" (Luís Fernando Veríssimo), ou que "O homem não é produto das circunstâncias. As circunstâncias são produtos do homem" (Benjamim Disraeli), ou... enfim, cabe a nós os nossos julgamentos e como eles irão repercutir em nossa vida e em nós mesmos.

Neste final de curso, neste final de ciclo, nesta colação de grau, aqui estamos, felizes e também... cansados. Aterrissamos, batalhamos, sofremos, rastejamos e, gloriosamente, ganhamos e agora comemoramos a nossa glória. Foi difícil! Muito difícil! Chegar até aqui. Tendo nós, que convivemos no dia-a-dia, caminhando sobre uma linha tênue entre a dita loucura, para alguns, e a tal lucidez, de uma certa maneira, imposta pela maioria, como uma "força restauradora".

Aterrorizante para muitos. Não tão aterrorizante agora, para nós.

Já concluindo, é importante lembrar que a ciência, sendo imparcial, ao contrário dos homens que a fazem, não é o que tem que ser, pois o ser, não é, assim como o que é, não tem que ser, entendem? No refrão diz que "A mão que faz a bomba, faz o samba" (Criador e Criatura; Samba Enredo; Mocidade Independente; 1996), assim, os homens utilizam-se da ciência como sua ferramenta para criar ou destruir, na medida do possível. Agora, cabe a nós, talvez, termos a sabedoria e cuidado em utilizá-la, ao mesmo tempo em que alertamos os colegas da sua má utilização, de acordo com o bom senso fruto de um senso comum. Mas afinal de contas, o que é o mal mesmo?

E finalizando, há uma citação que diz: "Não creiais em coisa alguma pelo fato de vos mostrarem o testemunho escrito de algum sábio antigo. Não creiais em coisa alguma com base na autoridade de mestres e sacerdotes. Aquilo, porém, que se enquadrar na vossa razão e, depois de minucioso estudo, for confirmado pela vossa experiência, conduzindo ao vosso próprio bem e ao de todas as outras coisas vivas: a isso aceitai como verdade. Por isso, pautai a vossa conduta." (Sidarta Gautama), pois também "Erros são, no final das contas, fundamentos da verdade. Se um homem não sabe o que uma coisa é, já é um avanço do conhecimento saber o que ela não é." (Carl Jung).

Obrigado a todos. À aqueles que nos abraçaram, ajudaram e socorreram e, principalmente, como já discutido, à aqueles que nos atrapalharam, incomodaram e irritaram, pois se não fossem vocês, nós não seríamos tão vencedores e tão fortes hoje.

Muito Obrigado.