

# A física e a música do fagote

The physics and music of the bassoon

Maria Lúcia Netto Grillo<sup>\*1</sup>, Luiz Roberto Perez Lisbôa Baptista<sup>1</sup>, Matheus da Silva Silos<sup>1</sup>,  
José Gonçalves Chaves Júnior<sup>1</sup>, Caio Nabuco Barbosa<sup>1</sup>, Matheus Brill e Souza<sup>1</sup>,  
Elcio Antônio Corrêa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Física, Laboratório de Acústica Ambiental e Musical-Lacustamm, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Recebido em 22 de maio de 2023. Revisado em 30 de junho de 2023. Aceito em 11 de julho de 2023.

No conjunto dos instrumentos de sopro (aerofones) existe um que, apesar de não ser tão popular quanto a flauta ou o saxofone, figura frequentemente na música de concerto; em orquestras e apresentações de câmara: o fagote. Possui uma sonoridade distinta, anasalada e inconfundível. Neste trabalho apresentamos alguns aspectos da física e da música do fagote. Selecionamos alguns sites com músicas que evidenciam o som do fagote. Foram feitos experimentos para estudo das ondas sonoras, espectros sonoros, níveis de pressão sonora, radiação sonora bem como a psicoacústica do instrumento. Na análise dos resultados experimentais foram utilizados os programas Praat, dBTrait e dBInside. Observamos que o fagote pode ser considerado um instrumento harmônico e que a relação de intensidade entre a fundamental e os harmônicos, inclusive sua presença ou ausência, depende da frequência emitida, da posição de medida, do tempo de emissão da nota e de como o som foi captado (incluindo ou não o ataque e o decaimento). Os processos experimentais utilizados podem ser aplicados ao estudo da física de outros instrumentos musicais, permitindo a observação de diferentes tipos de fontes sonoras e assim contribuindo para a motivação no ensino de física e de música.

**Palavras-chave:** fagote, ondas sonoras, espectros sonoros, radiação sonora, psicoacústica.

In the set of wind instruments (aerophones) there is one that, despite not being as popular as the flute or the saxophone, frequently figures in concert music; in orchestras and chamber performances: the bassoon. It has a distinctive, nasal and unmistakable sound. In this work we present some aspects of the physics and music of the bassoon. We selected some sites with songs that show the sound of the bassoon. Experiments were carried out to study sound waves, sound spectra, sound pressure levels, sound radiation as well as the psychoacoustics of the instrument. In the analysis of the experimental results, the programs Praat, dBTrait and dBInside were used. We observed that the bassoon can be considered a harmonic instrument and that the intensity relationship between the fundamental and the harmonics, including their presence or absence, depends on the emitted frequency, the measurement position, the time of emission of the note and how the sound was captured (including or not the attack and decay). The experimental processes used can be applied to the study of the physics of other musical instruments, allowing the observation of different types of sound sources and thus contributing to the motivation in physics and music teaching.

**Keywords:** bassoon, sound waves, sound spectra, sound radiation, psychoacoustics.

## 1. Introdução

Há hoje em dia 2 tipos de fagotes: o francês e o alemão, que diferem na madeira usada e no dedilhado. Abordaremos o fagote alemão, porque é o instrumento que possuímos e foi o objeto de estudo deste artigo.

Segundo Sadie [1], o nome fagote (phagotus – feixe de lenha) foi denominado por Afranio degli Albonesi, em torno de 1520, já com o tubo duplo, ambos encaixados na culatra (parte final do instrumento – veremos mais adiante). A maioria das línguas segue essa etimologia para nomear o instrumento; porém em francês e inglês, por conta da sua função de linha do baixo entre os

sopros de madeira, é denominado basson e bassoon, respectivamente.

Trata-se de um aerofone de madeira que usa um tudel (um pequeno tubo curvado de metal) e uma palheta dupla (2 pedaços de uma cana especial iguais que são juntados por um barbante e um fio de cobre) sendo esse o processo de produção do som no instrumento. O ar percorre aproximadamente 2,40 m desde a sua entrada até a saída pela campana, que é a peça conectada na outra extremidade que não a da palheta. Seu tubo é formado de peças em madeira que são conectáveis, dessa maneira, o instrumento pode ser desmontado a fim de facilitar o transporte. Tem uma sonoridade distinta, anasalada e inconfundível dentro da massa orquestral. Ter um bom instrumento que não tenha problemas graves de afinação

\*Endereço de correspondência: [mluciag@uerj.br](mailto:mluciag@uerj.br)

é imprescindível, mas ter uma boa palheta, que responda bem em graves, médios e agudos é condição “sine qua non” para a execução do instrumento. Geralmente os fagotistas confeccionam suas próprias palhetas e sabem exatamente que palheta usar em determinada música. Para confeccioná-las é preciso tempo e paciência [2–4].

O fagote é um instrumento melódico, só produz notas sucessivas, uma após a outra, diferente de um violão ou um piano, que são instrumentos harmônicos, que podem produzir vários sons ao mesmo tempo (acorde). A origem é meio imprecisa. Segundo Schweizer [5], um provável antecessor do fagote, na Idade Média, é a bombardinha, que possuía vários tamanhos. A bombardinha baixa, a mais longa, possuía um tamanho tão grande que muitas vezes o músico era auxiliado por outra pessoa que segurava o instrumento. Mais adiante resolveram cortar o tubo em duas partes e liga-las através de uma peça, a culatra. As frequências foram mantidas, porém o som foi um pouco modificado, sendo considerado mais doce, o que deu origem à dulciana, também chamada dulciana, curtal ou baixão. Segundo Ribeiro [6], o fagote atual é resultado do trabalho de Karl Almenröder (1786-1843) e Adam Heckel (1812–1876). Esses deram origem ao fagote alemão.

Se o uso mais antigo do instrumento era o de reforçar a linha do baixo, no início do séc. XVII começou a assumir um papel mais independente. Vivaldi escreveu 39 concertos para esse instrumento e vários outros compositores compuseram para ele como solista nesta época. O concerto em Sib K191/186E (1774) de W. A. Mozart é muito tocado pelos solistas de fagote e peça exigida em testes para orquestras profissionais de todo o planeta.

É um instrumento não popular (custos altos) de som refinado e penetrante. Como todo instrumento ele possui uma família que é composta de: oboé, corne-inglês e o contrafagote (oitava abaixo do fagote) todos de palheta dupla. Na orquestra pertence ao naipe das madeiras que inclui: flautim, flauta, clarineta, oboé, corne inglês e contrafagote. Diferente de outros membros dessa família, como o oboé e a clarineta, o fagote é um instrumento não transpositor, isto é, o instrumentista lê e executa as notas musicais com a frequência equivalente às que estão escritas na partitura. Vale ressaltar que o único instrumento das madeiras que não utiliza o vibrato é a clarineta de palheta simples e boquilha.

O fagote funciona muito bem nas orquestras, na música de câmara (duos, trios, quartetos, quintetos, sextetos e como solista em concertos). Seu timbre é inconfundível e se adequa bem a qualquer gênero musical. Hoje temos gravações interessantes de arranjos para fagotes de trechos de peças orquestrais como “Júpiter” dos “Planetas” de Gustav Holst, compositor inglês. Sugerimos a escuta de um arranjo para 7 fagotes e 1 contrafagote, sendo que o mesmo fagotista executa os 7 fagotes [7].

Na experiência de um dos autores como músico de orquestra tocando flauta, contrabaixo, violoncelo e

violino, sempre observou os fagotistas, geralmente ótimos músicos e muito conscientes da sua função destacada na orquestra sinfônica ou filarmônica. Hoje é regente de orquestra e coral e sabe bem da importância de bons fagotistas. Na orquestra temos normalmente 1º fagotista, responsável pelos solos, 2º fagotista que faz contracanto ou harmonia e o 3º fagotista que deve possuir normalmente contrafagote podendo tocá-lo quando necessário. Esta é a composição oficial de fagotes na orquestra. Nos testes para contratação se especifica se é para 1º, 2º ou 3º fagote, pois o salário varia de acordo com a relevância do músico e sua classificação.

Há também aqueles instrumentistas excepcionais que ultrapassam o nível normal dos fagotistas como Theo Plath, nascido em Koblenz, na Alemanha. Já recebeu muitos prêmios, executando obras de grande dificuldade, como o Capricho nº 5 (início do séc. XIX) para violino solo de N. Paganini, violinista e compositor italiano [8].

Temos peças musicais interessantes onde o fagote assume um papel na história, por exemplo em “Pedro e o Lobo” (1936) de Sergei Prokofiev, compositor russo. Trata-se de um entretenimento para as crianças, onde as personagens são: pássaro representado pela flauta, pato pelo oboé, Pedro pelas cordas friccionadas, gato pela clarineta, avô do Pedro pelo fagote, lobo pelas trompas e os tiros dos caçadores pelos tímpanos. Há um narrador e a história atrai bastante a atenção de crianças e adultos. Possui um tema simples e muito bem trabalhado pelo compositor [9].

Outra peça de importância não só para o fagote, mas para todos os instrumentos de orquestra, é o “Guia para jovens instrumentistas de orquestra” (1946) de Benjamin Britten, compositor inglês, que aproveitando um tema do seu contemporâneo famoso compositor do barroco, Henry Purcell, fez essa obra magnífica que apresenta de maneira exuberante os naipes e os instrumentos da orquestra. Termina com uma fuga que se inicia no flautim e segue por toda a orquestra. Muita técnica e talento! Os aerofones madeiras são apresentados na ordem: flautas, oboés, clarinetas e fagotes, logo no início [10]. Vivaldi foi um compositor que teve um grande número de concertos escritos para fagote. Podemos acessar seis deles para escuta [11].

Há uma preferência dos regentes de orquestra pelo fagote alemão que apresenta, por algumas razões, uma sonoridade mais rica, mais potente. Para efeito de comparação do timbre dos dois instrumentos pode-se visualizar uma demonstração feita pelo fagotista Dr. Daryn Zubke [12]. O fagote francês também é bastante interessante, mas como dito anteriormente, não foi nosso objeto de estudo neste artigo. A digitação do fagote lembra a flauta doce contralto, que é em Fá sem ser transpositora. Claro que os recursos do fagote são muito maiores que da flauta doce. Sua extensão, segundo Petri [13] vai de Sib<sub>6</sub> (58,3 Hz), também chamado de Sib<sub>-1</sub> [14] a Mi<sub>4</sub> (659,3 Hz), segundo classificação europeia, e é possível produzir notas mais agudas usando

técnicas não usuais, comparáveis ao flageolett (sons harmônicos, em alemão) dos instrumentos de cordas. Segundo Bennett [15], sua leitura é dada na clave de fá, ou na clave de dó na quarta linha, em notas mais agudas.

Hodiernamente há muitos alunos de fagote pela Europa e Estados Unidos da América, a internet facilitou muito a comunicação e tudo acelerou. A Música é uma grande invenção do ser humano e os instrumentos fazem parte dessa História da Humanidade tão carente de cultura de boa qualidade. O ser humano se valoriza por aquilo que ele aprende e faz com qualidade. A educação de qualidade torna-se “ferramenta” para a vida. É o conhecimento de instrumentos como o fagote torna-se essencial para a boa formação de alunos e professores, e do público em geral.

## 2. Classificação dos Instrumentos Musicais e os Aerofones

Os instrumentos musicais podem ser categorizados de acordo com a forma como o som é produzido, essa classificação é chamada de classificação Hornbostel-Sachs. Esse sistema foi desenvolvido pelo musicólogo alemão Erich von Hornbostel e pelo musicólogo austríaco Curt Sachs, e é amplamente utilizado na etnomusicologia e na organologia.

A classificação Hornbostel-Sachs [16] divide os instrumentos musicais nas categorias: idiofones, membranofones, cordofones, aerofones. Anos depois foram acrescentados os eletrofones a essa classificação. Cada categoria é definida pela forma como o som é produzido pelo instrumento. Por exemplo, os idiofones são instrumentos que produzem som através da vibração do seu próprio material, enquanto os cordofones produzem seu som através de uma corda tensionada. Essa classificação é útil para compreender as semelhanças e diferenças entre os diferentes tipos de instrumentos musicais e para estudar a evolução da música em diferentes culturas.

Quando falamos dos fagotes, estamos lidando com um aerofone. Segundo Sadie [1] eles produzem som através da vibração de uma coluna de ar dentro do instrumento. Esses tipos de instrumentos têm características específicas, por exemplo, um corpo oco. A maioria dos aerofones possui um corpo que é geralmente feito de madeira, como nos oboés, ou de metal, como nos trompetes. Outras características dos aerofones incluem os tubos, que geralmente são cônicos ou cilíndricos e podem ser abertos nas duas extremidades ou fechados em uma delas. Alguns possuem orifícios ao longo do tubo que podem ser cobertos ou descobertos pelo dedo do instrumentista. A boquilha com uma palheta simples está presente em instrumentos como os saxofones e clarinetes, sendo uma pequena peça colocada na extremidade do tubo responsável pela vibração da coluna de ar no instrumento. A palheta dupla está presente em instrumentos como o oboé, o corne inglês, o fagote e o contrafagote. Alguns instrumentos possuem bocal

em formato de taça, como a tuba, e exigem que o instrumentista faça a vibração da coluna de ar soprando essa peça.

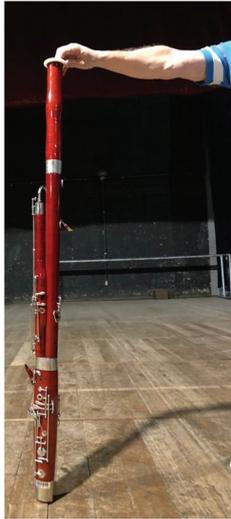
De acordo com Sachs e Kunst [17], os aerofones formam um dos grupos mais antigos de instrumentos musicais, tendo sido utilizados em diversas culturas ao longo da história. Eles podem ser encontrados em uma ampla variedade de estilos musicais, desde a música clássica até o jazz, o rock e a música tradicional de diferentes regiões do mundo.

## 3. As Características Físicas do Fagote

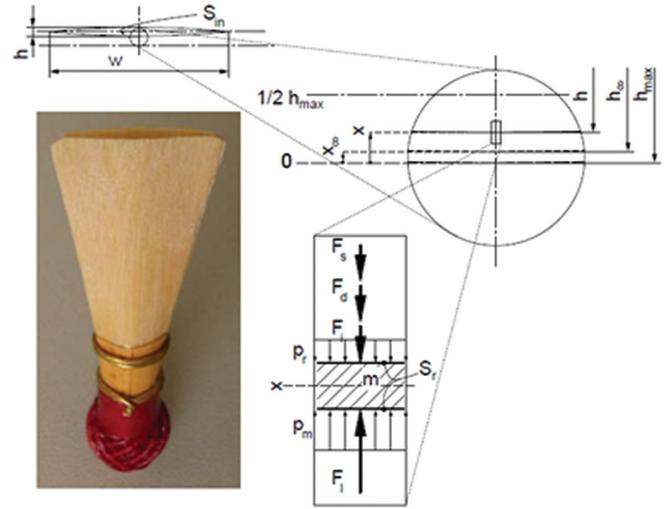
Como mencionado anteriormente, o fagote é um instrumento da família das madeiras que possuem uma palheta dupla, assim como o oboé; possui um comprimento aproximado de 2,40 m e é desmontável em 5 partes mais a palheta dupla [18]. Ele possui um corpo longo e fino, com uma abertura cônica na extremidade, além disso possui um tubo curvo (tudel) que se junta a dois tubos paralelos, (sendo o tubo principal com formato cônico) que são conectados na parte de baixo do instrumento, a culatra, por meio de um conector de metal em forma de u, chamado U-tube. Este possui uma chave para remoção da saliva acumulada do músico (ver Figura 2 – b e c). O tubo principal se divide em duas partes menores, que se estendem para baixo e para cima do instrumento, formando as duas pernas do fagote. A parte inferior do fagote é curvada em forma de J e se conecta ao mecanismo de chaves, que permite ao músico tocar notas diferentes, cobrindo ou descobrindo orifícios ao longo do corpo do instrumento.

Em relação às peças de madeira, se o fagote seguir o sistema alemão, ele geralmente é construído com madeira da família das aceráceas ou das grenadilhas. Por outro lado, se o fagote seguir o sistema francês, a madeira utilizada tradicionalmente é o pau-rosa [6].

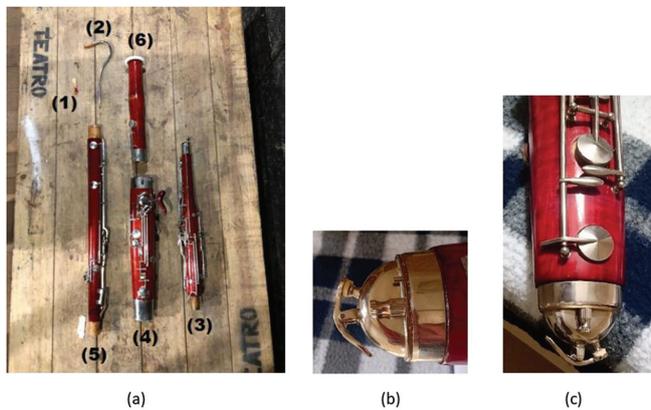
Na Figura 1 podemos ver um fagote montado e na Figura 2 um fagote desmontado em cinco partes mais a palheta dupla (1). Segundo Kopp [19], ele possui um tubo principal que é dividido em seções, o tudel (2), a asa do instrumento (tenor) (3), a seção final (culatra) (4), o corpo central (baixo) (5) e a campana (6). O tudel, é a primeira seção do tubo principal do fagote e é onde a palheta dupla é fixada, além de ser onde o músico coloca a boca para tocar o instrumento. A asa do fagote é a seção superior do tubo principal, onde as chaves são posicionadas para produzir diferentes notas, sendo que o músico pressiona essas chaves para obter as notas desejadas. A seção final do fagote é a parte mais estreita do tubo principal e é responsável por produzir as notas mais graves do instrumento. O corpo central é a seção mais longa do tubo principal e é responsável por produzir a maioria das notas do fagote. Por fim, a campana é a parte final do fagote e é responsável por projetar o som produzido pelo instrumento. O tudel e a palheta são acessórios, mas é impossível tocar fagote sem os dois.



**Figura 1:** Fagote marca Conductor, do tipo alemão, com um comprimento total de 2,5 m (incluindo o tudel) e um diâmetro médio de 4 cm.



**Figura 3:** Palleta dupla do fagote e notação das variáveis e equilíbrio das forças em um segmento de massa de uma palleta [20].



**Figura 2:** (a) Fagote desmontado com peças numeradas: (1) palleta dupla, (2) tudel, (3) asa, (4) culatra, (5) corpo central, (6) campana; (b) e (c) detalhe da extremidade da culatra que é revestida por uma peça metálica.

A afinação do fagote é uma tarefa bastante complexa, tanto de realizar na prática quanto de modelar fisicamente, que depende não só do músico e do instrumento, mas de outros fatores, como a temperatura e a composição do ar soprado.

O modelo físico do fagote depende de muitos parâmetros. Em Grothe [20] podemos ver um modelo que parte da equação das forças aplicadas na palleta dupla, acoplada ao tudel, além das considerações físicas do instrumento todo. O objetivo principal é o estudo de como a variação da pressão na palleta influencia na execução do instrumento. Podemos ter uma ideia do modelo físico da palleta na equação 1:

$$F_l + p_m S_r = F_i + F_d + F_s + p_r S_r \tag{1}$$

que pode ser escrita da forma:

$$F_l(t) + p_m(t)S_r = m\ddot{x}(t) + d\dot{x}(t) + kx(t) + p_r(t)S_r \tag{2}$$

onde  $F_l$  é a força externa de contato aplicada pelos lábios,  $F_i$  é a força inercial da massa acelerada,  $F_d$  é a força de amortecimento proporcional ao deslocamento,  $F_s$  é a força restauradora proporcional ao deslocamento,  $p_m$  e  $p_r$  são pressões na boca do músico e dentro da palleta, respectivamente (ver Figura 3). Os parâmetros  $d$  e  $k$  são constantes correspondentes ao amortecimento e rigidez da palleta.

O formato do fagote é irregular, longe de ser apenas um tubo cilíndrico aberto-fechado, como o modelo que será visto na seção 6.

Segundo Henrique [18], as frequências dos modos acústicos aumentam com a temperatura do ar, conforme equação 3:

$$f = \frac{20,1}{2l} \sqrt{T} \tag{3}$$

Por causa disso, antes de tocar, os músicos de aerofones procuram aquecer o instrumento, buscando atingir uma temperatura estável, a fim de evitar a variação da afinação durante a execução. Porém a velocidade do som não depende apenas da temperatura, mas também das propriedades dos gases [18].

Em um tubo de órgão seco a variação da velocidade do som não é a mesma que em um instrumento submetido ao sopro do músico, com vapor de água e dióxido de carbono. Segundo Fuks [21] o aumento do dióxido de carbono tende a baixar a afinação e o aumento da humidade tende a subir. Esses efeitos opostos não se compensam. Os fagotistas, quando executam notas longas observam que a frequência tende a baixar, principalmente nas notas graves [21]. Para minimizar a

variação da frequência, os músicos controlam a pressão aplicada com os lábios.

#### 4. Radiação Sonora

A radiação sonora consiste na propagação da energia sonora por uma fonte de um ponto para outro do espaço. Para Jim Woodhouse [22], na maioria dos instrumentos de sopro, o som é irradiado diretamente pelo movimento do ar no tubo, este tubo fornece um conjunto de ressonâncias, às vezes aproximadamente relacionadas harmonicamente, que interagem com a não linearidade para produzir o tom e a forma de onda do som. É importante ressaltar que a vibração da parede do material não influencia nos efeitos direcionais da radiação sonora.

As fontes omnidirecionais não possuem direções preferenciais, essas fontes sonoras irradiam energia sonora em todas as direções principalmente para baixas frequências. Segundo Meyer [23], no caso mais simples, como por exemplo, de uma fonte sonora esférica que se expande e contrai uniformemente em todas as direções, a radiação sonora é igual em todas as direções. Os padrões de direcionalidade são cada vez mais complexos quanto mais alta é a frequência, e a fonte apresenta direções preferenciais de radiação sonora.

Os efeitos direcionais presentes no fagote variam com a frequência emitida pelo instrumento. Segundo Meyer [23], o fagote não irradia o som em todas as direções com igual intensidade para frequências acima de 250 Hz; para esse intervalo de frequência a fonte sonora emite radiação que possui direções preferenciais. Essas características direcionais estão relacionadas, por exemplo, com a distribuição espacial dos orifícios ao longo do instrumento, pois cada abertura se torna uma fonte sonora o que torna os padrões de radiação muito complexos. Porém para valores menores que 250 Hz podemos caracterizar a radiação sonora produzida pelo instrumento como sendo aproximadamente esférica, ou seja, o fagote se comporta como uma fonte quase omnidirecional.

Segundo Fletcher e Rossing [24], nas notas mais graves a intensidade da fundamental é fraca devido ao pequeno diâmetro do tubo, em relação ao comprimento, o que gera uma frequência de corte em torno de 300 Hz a 600 Hz. Segundo Rossing [25], para um tubo cilíndrico com um lado aberto, a eficiência da radiação aumenta com  $f^2$  acima de certa frequência  $f_c$  (frequência de corte) e então permanece aproximadamente estável.

Então, a radiação sonora do fagote varia com a posição da medida, como a maioria dos instrumentos. Segundo Grothe e Kob [26], o fagote é uma fonte sonora de grande irregularidade geométrica e o conjunto fagote/músico é considerado como um bom caso de radiador complexo. Alguns autores estudaram a radiação do fagote, sendo o pioneiro Meyer [23], usado como referência em muitos trabalhos. Weinzierl e outros [27] mediram a radiação de

41 instrumentos musicais, inclusive do fagote, em uma rede de 32 microfones, em câmara anecoica. Patynen e Lokki [28] mediram a radiação de 40 instrumentos de orquestra e uma cantora soprano, em câmara anecoica, com 22 microfones distribuídos em torno do músico. Estes observaram que a radiação dos aerofones madeira varia muito com a frequência, porém não com a variação da dinâmica (intensidade de emissão).

Fletcher e Rossing [24] consideram que os padrões complexos de radiação observados no fagote são o resultado da superposição de fontes pontuais que contribuem com fases e amplitudes individuais, até a posição do microfone que mede o NPS (nível de pressão sonora). Essas fontes pontuais são as pequenas aberturas, que possuem diferentes tamanhos, que abrem ou fecham, conforme a nota a ser emitida. No caso da nota mais grave, o Sib<sub>o</sub> (58 Hz), também chamada de Sib<sub>-1</sub>, apenas um orifício fica aberto, que é a extremidade do tubo (campana). Nesta nota a radiação é aproximadamente omnidirecional.

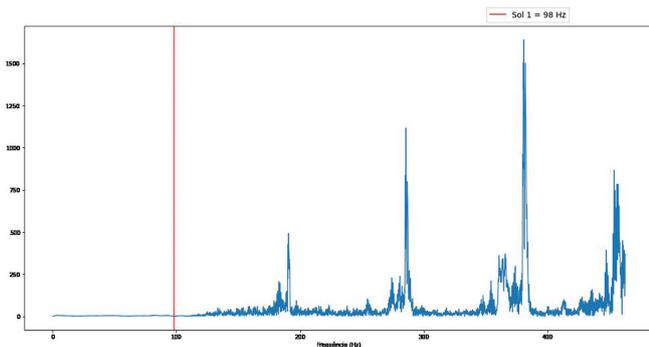
#### 5. A Psicoacústica e o Fenômeno da Fundamental Ausente

A psicoacústica é um ramo da psicofísica focada na relação entre os estímulos sonoros e as sensações auditivas. A finalidade da psicoacústica, essencialmente, é compreender por que determinados estímulos sonoros provocam certas sensações como medo, desconforto, felicidade e alegria. Rasch e Plamp [29] referem-se à psicoacústica musical como sendo a área em que se estudam as características subjetivas do som, tanto em pequenos estímulos quanto em vários sons simultâneos, como na música.

A formulação da psicofísica e psicoacústica começou durante o século XIX, com sua primeira aparição no livro “Elementos da Psicofísica (1860)” escrito por Gustav Fechner (1801–1887), considerado o pai da Psicoacústica. Em seu livro, Fechner expôs pela primeira vez na literatura temas como métodos psicofísicos e as interações psicofísicas. Mas, bem antes disso, os gregos, na figura de Pitágoras, por exemplo, já tentavam explicar a relação físico-matemática presente na música através das escalas musicais, consonância e dissonância de seus instrumentos. Alguns trabalhos com cordas vibrantes e rodas dentadas, de renomados físicos como Hooke e Savart, ajudaram a teorizar o estudo da percepção auditiva dos humanos. Mas, a psicoacústica teve como seu maior expoente, o médico e físico alemão Herman von Helmholtz (1821–1894). Este, contou com fortes influências de Georg Ohm, que confirmou que o ouvido humano realiza uma análise limitada de Fourier, determinado pelas componentes senoidais complexas das ondas sonoras. Dessa forma, Helmholtz usou os teoremas de Fourier para descrever sua teoria de ressonância sonora. Assim, a psicoacústica começou a ser explorada

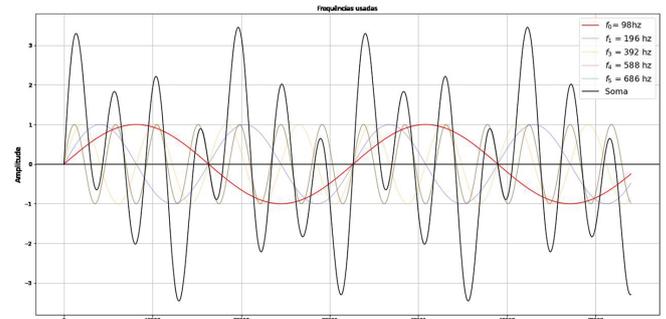
em diversos estudos, tendo como áreas principais o ruído e a localização de fontes sonoras [30].

O primeiro trabalho sobre o fenômeno da fundamental ausente foi de August Seebeck (1805–1849), construindo uma sirene baseada numa série de harmônicos (múltiplos inteiros da frequência inicial–fundamental). A sirene foi construída de forma que a frequência fundamental não estivesse presente, apenas os harmônicos. Mas, mesmo não estando presente, a fundamental era ouvida. A estrutura acústico-mecânica que constitui nosso ouvido tem um comportamento não-linear [18]. De acordo com Hartmann [31], todas as fases do nosso processo auditivo são potenciais fontes de não-linearidade. Nosso lobo temporal, parte caracterizada pelo processamento sonoro, é tão apurado que podemos em alguns casos determinar o som que ouvimos sem que esteja presente. O fenômeno, no fagote, ocorre quando o instrumentista toca, por exemplo, a nota Sol<sub>1</sub> (98 Hz), como podemos ver na Figura 4<sup>1</sup>. Neste caso, a fundamental não está presente no gráfico de harmônicos, mas mesmo assim, a nota foi ouvida. (Este resultado foi obtido pelos autores. Outros resultados experimentais obtidos serão melhor explicados na seção 7). Fisicamente, com uma analogia gráfica, podemos mostrar que a soma dos harmônicos remanescentes terá o mesmo período que a frequência fundamental, como ilustrado na Figura 5. Podemos escutar um exemplo de som com a fundamental e sem a fundamental, a nota fá<sub>3</sub> [32].



**Figura 4:** Espectro sonoro da nota sol 1–98Hz emitida pelo Fagote. A linha vertical em vermelho indica onde deveria aparecer o primeiro harmônio. Fonte: Os Autores.

<sup>1</sup> A nota Sol<sub>1</sub> possui frequência de 98 Hz. Quando se fala a frequência de um som, na verdade fala-se da frequência fundamental, não significa que apenas essa frequência será emitida. Num som complexo são emitidas várias frequências, normalmente a fundamental e seus harmônicos superiores (que são múltiplos da fundamental no caso de sons harmônicos). Como as frequências são múltiplas da fundamental, a diferença entre as frequências é igual à frequência fundamental. Na Figura 4 a diferença entre as frequências é 98 Hz, logo a fundamental é 98 Hz, e pode-se ver que não está presente. A Figura 5 mostra como o fenômeno da fundamental ausente pode ocorrer e ser ouvida.



**Figura 5:** Gráfico da soma dos múltiplos da frequência fundamental 98 Hz. A soma pode ser identificada pela curva em preto, enquanto a frequência fundamental em vermelho, não presente na soma. Fonte: Os Autores.

## 6. Ondas Sonoras em Tubos

As ondas sonoras dos aerofones são produzidas pela coluna de ar vibrante dentro do tubo. Os tubos podem ser abertos nas duas extremidades ou em apenas uma delas (tubo aberto-fechado). Neste trabalho consideramos apenas os tubos tipo aberto-fechado, que condiz com o tubo sonoro do fagote, que é o nosso interesse.

Segundo Henrique [18], a vibração de uma coluna de ar, em um tubo ou cavidade, tem determinados modos próprios, que surgem devido à geração de ondas estacionárias, que podem ser expressas pela equação 4:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) = 0 \tag{4}$$

considerando uma onda unidimensional, onde  $\rho$  é a densidade e  $v$  a velocidade. A equação 5 pode ser escrita na forma (eq. 5):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v^2) + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \tag{5}$$

aplicando a lei de Newton ao fluido em movimento, onde  $p$  é a pressão.

Essas equações não lineares podem ser simplificadas para uma situação linear, considerando movimentos acústicos de pequenas amplitudes, resultando nas equações 6 e 7 [32]:

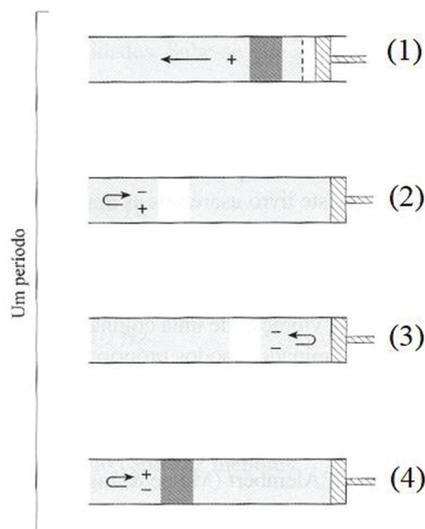
$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \tag{6}$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \tag{7}$$

As ondas estacionárias podem ser expressas pela equação 8 (superposição de duas ondas em sentidos contrários com amplitudes A e B) [24]:

$$p(x, t) = [A e^{-jkx} + B e^{jkx}] e^{j\omega t} \tag{8}$$

Acompanhando a formação de uma onda gerada num tubo de comprimento  $l$  aberto-fechado a partir de uma força excitadora [18], conforme a Figura 6, ocorre na



**Figura 6:** Propagação de um impulso de um ciclo num tubo aberto-fechado.

primeira etapa (1) a compressão da massa de ar pelo pistão (representando o sopro na palheta), dando assim origem a uma onda de compressão, onde tal onda percorre o interior do tubo até a extremidade aberta expulsando uma porcentagem das partículas de ar, o que resulta em uma pressão interna ao tubo inferior à pressão atmosférica.

A partir das partículas deslocadas pelo pistão que retornam às suas posições originais gerando uma onda rarefeita no sentido interno ao tubo, nesta segunda etapa (2) esta onda percorre o tubo até a extremidade fechada para ser refletida, e como terceira etapa (3) retornar à extremidade aberta.

Por fim, na quarta etapa (4) quando a onda rarefeita alcança a extremidade aberta, as partículas tendem a ocupar os espaços vazios para que se equilibre a pressão interna à atmosférica. Desta forma, as partículas externas ao tubo seguem o caminho interno, gerando uma onda de compressão em relação à onda de rarefação iniciada na etapa 2.

Com a quarta etapa finalizada, uma onda sonora é formada de maneira completa com seu comprimento  $\lambda$ , o que significa que, para a construção total da onda sonora, o deslocamento das partículas precisa percorrer o caminho do tubo por quatro vezes, isto é,  $4l$ , onde  $l$  é o comprimento do tubo.

Acima de uma determinada frequência, denominada frequência de corte,  $f_c$ , as ondas formadas dentro do tubo deixam de ser refletidas na extremidade aberta, de forma que não produzem ressonância. Isso ocorre quando o comprimento de onda for da ordem de grandeza do diâmetro do tubo. O valor  $f_c$  é aproximadamente dado pela equação 9 [25]:

$$f_c = \frac{v}{\pi a}, \tag{9}$$

onde  $v$  é a velocidade do som e  $a$  é o raio do tubo.

Considerando que  $v = \lambda f$ , e levando em conta que um ciclo equivale a  $4l$ , as frequências capazes de gerar ondas estacionárias num tubo cilíndrico são  $f = nv/4l$  ( $n$  é um número ímpar) e a frequência fundamental (eq. 10) é dada por:

$$f = \frac{v}{4l} \tag{10}$$

Conforme Henrique [18], para que um tubo fechado-aberto tenha todos os harmônicos é necessária uma conicidade mínima. O tubo cilíndrico possui apenas os harmônicos ímpares. A conicidade é dada pela relação  $B = r_2/r_1$ , onde  $r_1$  é o raio do tubo em uma extremidade e  $r_2$  o raio na extremidade oposta.

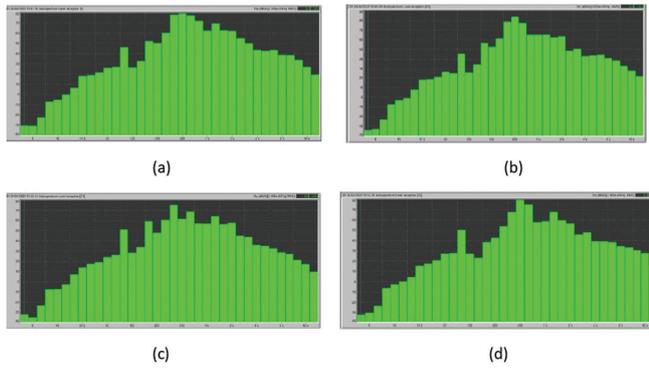
Segundo Grillo e Perez [33], “na extremidade aberta do tubo forma-se um nó de pressão e um ventre de deslocamento. Porém os nós ou ventres não são formados exatamente na extremidade, mas um pouco para fora, numa distância de cerca de  $0,6 R$  no comprimento do tubo, onde  $R$  é o raio do tubo”. Então o comprimento do tubo a ser considerado no cálculo de  $f$  deve ser o comprimento efetivo,  $l_e$ , e não o  $l$  medido ( $l_e = l_m + 0,6 R$ ).

## 7. Resultados Experimentais e Análises

### 7.1. Níveis de pressão sonora do fagote

Neste trabalho foram feitas medidas do nível equivalente de pressão sonora (NPS–Leq), em ponderação A, em duas frequências: Sol<sub>1</sub> (98 Hz) e Dó<sub>2</sub> (130,8 Hz), em 4 posições cada, todas a uma distância de 2 m do fagote. Usamos um sistema de monitoramento e análise de ruído e vibração Fusion Smart Sound & Vibration, marca 01 dB, da Acoem Group. O fagote utilizado é da marca Conductor, do tipo alemão, com um comprimento total de 2,24 m (considerando todos os tubos) e um diâmetro médio de 4 cm, sem contar com o tudel, que mede 0,31 m, e é um tubo bem mais estreito que o restante do instrumento (varia de 3 mm a 6 mm de diâmetro). Os sons foram executados por um músico, que é um dos autores desse trabalho. O local utilizado foi o palco de um teatro da universidade, que possui um bom isolamento acústico, a fim de minimizar ruídos externos e buscar reproduzir uma situação real. Foram utilizados os softwares dBInside e dBTrait para análise. Embora as medidas tenham sido feitas em apenas 4 pontos, este trabalho possui um diferencial pois buscamos uma situação real, diferente de alguns autores citados anteriormente nas seções 3 e 4, que fizeram a gravação em câmara anecoica e além disso, alguns utilizaram uma máquina e não um músico real para a emissão dos sons. Nosso objetivo é um pouco diferente.

Na Figura 7 podem ser observados 4 gráficos do Leq (NPS) em dB, em função da frequência (Hz), da nota Sol<sub>1</sub> (98 Hz). Os maiores valores de Leq foram obtidos no lado direito do músico, na direção dos orifícios do fagote, como pode ser observado na Figura 8, chegando



**Figura 7:** Frequência (Hz) × Leq (dB), nota Sol<sub>1</sub> (98 Hz) do fagote, nas posições: (a) frente ao músico; (b) lado direito; (c) atrás; (d) lado esquerdo.



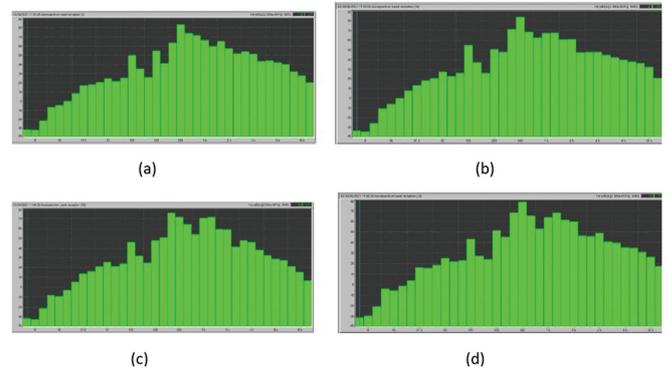
**Figura 8:** Posições frente (a) e direita (b) do fagote.

a 86,8 dB, na frequência de 500 Hz, o que está de acordo com o esperado para a região de formantes, conforme Lehman [34], que prevê a região formântica, no fagote, mais intensa aproximadamente entre 440 Hz e 494 Hz. Os valores menos intensos foram obtidos na posição atrás do músico, atingindo apenas o valor de 80,1 dB em 400 Hz. Nas posições frente e lado esquerdo o maior valor obtido para o Leq foi de 82,7 dB em 400 Hz e em 500 Hz, respectivamente. Observando a Figura 7 podemos identificar a região mais intensa dos formantes nas 4 posições, como previsto por Lehman [34], bem como a menos intensa entre 1.220 Hz e 1.280 Hz. As diferentes intensidades relativas evidenciam diferentes timbres em cada posição, o que está de acordo com o esperado, segundo Hyronimus e Grothe [35], o timbre é desbalanceado entre as notas.

É interessante observarmos, na Figura 7, que o nível de pressão sonora pode ter valores positivos e negativos, isso ocorre porque trata-se de uma representação adimensional de uma grandeza sonora em escala logarítmica,

**Tabela 1:** Valores referentes às medidas apresentadas na Figura 7.

| Tipo           | Peso | Tipo de grandeza | Unidade | Min. | Max. | Min.  | Max.  |
|----------------|------|------------------|---------|------|------|-------|-------|
| Leq            | A    | Pressão          | dB      | 70   | 90   |       |       |
| Pico           | C    | Pressão          | dB      | 80   | 100  |       |       |
| Max Lent       | A    | Pressão          | dB      | 70   | 90   |       |       |
| Min Lent       | A    | Pressão          | dB      | 70   | 90   |       |       |
| Multi-espectro |      |                  |         |      |      |       |       |
| 1/3 Oit Leq    | Lin  | Pressão          | dB      | 10   | 90   | 6.3Hz | 20kHz |



**Figura 9:** Frequência (Hz) × Leq (dB), nota Dó<sub>2</sub> (130,8 Hz) do fagote, nas posições: (a) frente ao músico; (b) lado direito; (c) atrás; (d) lado esquerdo.

expressa em decibels (dB, ou seja, a décima parte do Bel). Conforme Henrique [18], a pressão sonora, bem como a intensidade sonora e a potência sonora, apresentam uma variação muito extensa entre os sons máximo e mínimo audíveis, o que torna a utilização dessas grandezas pouco prática, por isso são usadas escalas logarítmicas. Além disso a resposta dos nossos ouvidos às perturbações acústicas é do tipo logarítmico e não linear. Então o nível de pressão sonora pode ser expresso pela equação 11:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_o} \tag{11}$$

onde  $p_o$  é a pressão sonora de referência  $2 \times 10^{-5} \text{ Nm}^{-2}$  ( $\text{Nm}^{-2} = \text{Pa}$ ), correspondente ao limiar de audição. Podemos ver que se  $p < p_o$ ,  $L_p$  será negativo. Vale ainda lembrar que o conceito de decibel é utilizado também em outras grandezas não acústicas, como as grandezas elétricas.

A Tabela 1 apresenta os valores máximo e mínimo de Leq, nas 4 posições, para a nota Sol<sub>1</sub>: 70 dB e 90 dB, na ponderação A e 10 dB a 90 dB, na ponderação linear.

Na Figura 9 vemos a variação do Leq em 4 posições diferentes, em função da frequência, da nota Dó<sub>2</sub>(130,8 Hz).

Os maiores níveis de Leq, na Figura 9, atingiram os seguintes valores: 86,5 dB (500 Hz), 86,6 dB (500 Hz), 80,6 dB (400 Hz) e 81,6 dB (500 Hz), nas posições frente, direita, atrás e esquerda do músico, respectivamente. A relação de intensidade foi obtida da mesma forma nas

**Tabela 2:** Relação de Leq (dB), ponderação A, em 4 posições e 2 notas (Sol<sub>1</sub> e Dó<sub>2</sub>).

| Nota             | Leq (dB)<br>frente | Leq (dB)<br>direita | Leq (dB)<br>atrás | Leq (dB)<br>esquerda |
|------------------|--------------------|---------------------|-------------------|----------------------|
| Sol <sub>1</sub> | 82,7 (400 Hz)      | 86,8 (500 Hz)       | 80,1 (400 Hz)     | 82,7 (500 Hz)        |
| Dó <sub>2</sub>  | 86,5 (500 Hz)      | 86,6 (500 Hz)       | 80,6 (400 Hz)     | 81,6 (500 Hz)        |

**Tabela 3:** Valores referentes às medidas apresentadas na Figura 9.

| Tipo           | Peso | Tipo de  |         | Unidade | Min. | Max.  | Min.  | Max. |
|----------------|------|----------|---------|---------|------|-------|-------|------|
|                |      | grandeza | Unidade |         |      |       |       |      |
| Leq            | A    | Pressão  | dB      | 70      | 90   |       |       |      |
| Pico           | C    | Pressão  | dB      | 80      | 100  |       |       |      |
| Max Lent       | A    | Pressão  | dB      | 70      | 90   |       |       |      |
| Min Lent       | A    | Pressão  | dB      | 70      | 90   |       |       |      |
| Multi-espectro |      |          |         |         |      |       |       |      |
| 1/3 Oit Leq    | Lin  | Pressão  | dB      | 10      | 90   | 6.3Hz | 20kHz |      |

duas notas. Podemos ver o resumo dos resultados na Tabela 2. A região formântica também foi mantida nas duas notas.

A Tabela 3 apresenta os valores máximo e mínimo de Leq, nas 4 posições, para a nota Dó<sub>2</sub>: 70 dB e 90 dB, na ponderação A e a pressão variando de 10 dB a 90 dB, na ponderação linear, como na nota Sol<sub>1</sub>.

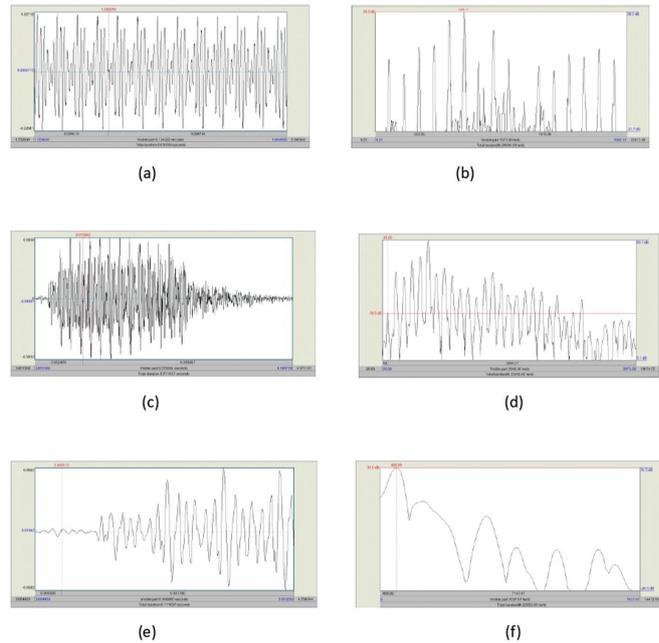
### 7.2. Formas de onda e espectros sonoros do fagote

As gravações e análises dos sons foram feitas com o software Praat [36], que é gratuito e qualquer pessoa pode ter acesso através do site, sem necessidade de registro. Este programa foi criado por pesquisadores do Instituto de Ciências Fonéticas, da Universidade de Amsterdã. O fagote utilizado foi o mesmo citado no item anterior, executado pelo mesmo músico.

Na Figura 10 podemos observar as formas de onda e os espectros referentes às ondas, do fagote emitindo a nota Sol<sub>1</sub>, na posição esquerda do fagotista. A onda apresentada na Figura 10a foi obtida após o ataque e sem o decaimento<sup>2</sup>. O espectro correspondente (Figura 10b) apresenta a fundamental e 15 harmônicos. A Tabela 4 apresenta as frequências da fundamental e de 10 harmônicos, bem como a diferença de frequência em relação ao harmônico anterior e seus níveis de pressão sonora, da mesma nota Sol<sub>1</sub>, conforme Figura 10b.

A frequência da fundamental indica que o fagote estava levemente desafinado, uma vez que a frequência esperada seria 98 Hz. A variação de frequência entre as linhas mostra que o instrumento é harmônico, uma vez que  $\Delta f$  é praticamente constante e bem próxima ao valor da frequência fundamental, o que seria esperado

<sup>2</sup> Num som consideram-se três períodos de duração: transiente inicial (de ataque), período de estabilidade e transiente de extinção (decaimento). O transiente inicial corresponde à passagem do silêncio ao som, o transiente de extinção é o período em que o som se extingue, enquanto que o período de estabilidade é o período entre os dois anteriores [18]



**Figura 10:** Formas de onda (a, c, e) e espectros (b, d, f) do Sol<sub>1</sub> no fagote, na posição esquerda.

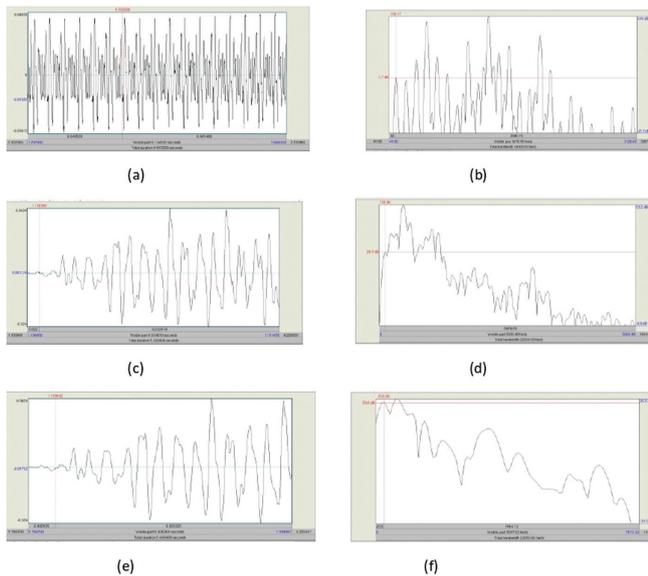
**Tabela 4:** Frequências, variações de frequência entre os harmônicos e NPS de cada frequência, da nota Sol<sub>1</sub> do fagote, medida no lado esquerdo do fagotista.

| Harmônico   | frequência (Hz) | $\Delta f$ (Hz) | NPS (dB) |
|-------------|-----------------|-----------------|----------|
| Fundamental | 95,1            |                 | 14,5     |
| 1°          | 188,7           | 93,5            | 7        |
| 2°          | 282,4           | 93,7            | 20,7     |
| 3°          | 376,1           | 93,7            | 21,7     |
| 4°          | 470,7           | 94,6            | 34,2     |
| 5°          | 563,5           | 92,8            | 38,2     |
| 6°          | 658,2           | 94,6            | 13,5     |
| 7°          | 751,9           | 93,7            | 28,9     |
| 8°          | 845,6           | 93,7            | 14,7     |
| 9°          | 941,2           | 95,5            | -6,4     |
| 10°         | 1.033,2         | 92,1            | 11,4     |

para um instrumento harmônico, onde as frequências dos harmônicos são múltiplas da fundamental.

O NPS da fundamental é baixo (14,5 dB) na posição esquerda, em relação à maioria dos harmônicos, como esperado (Fig. 10b). O mesmo foi encontrado nas outras 3 posições estudadas. Conforme Grillo, Baptista e Brandão [37] em algumas posições de medida a fundamental pode inclusive não estar presente, embora o som seja percebido como se estivesse, ou seja, a altura da nota não é modificada pela ausência da fundamental. Este fenômeno está explicado na seção 5.

Na Figura 10c apresentamos uma forma de onda da nota Sol<sub>1</sub>, medida desde o ataque até o decaimento e ao lado, na Figura 10d, o espectro respectivo. Neste caso a diferença entre os NPS da fundamental, em relação ao harmônico mais intenso, (36,6 dB), é maior que a obtida anteriormente, (23,7 dB). Considerando principalmente



**Figura 11:** Formas de onda (a, c, e) e espectros (b, d, f) do  $Dó_2$  no fagote, na posição esquerda.

o ataque do som, como na Figura 10e, a fundamental fica cada vez menos intensa, chegando a desaparecer, como na Figura 10f. Esta situação corresponde a uma nota emitida rapidamente. Com isso vemos que a relação de intensidade entre a fundamental e os harmônicos, inclusive sua presença ou ausência, depende da frequência emitida, da posição de medida, do tempo de emissão da nota e de como o som foi captado (incluindo ou não o ataque e o decaimento). A Figura 11 confirma esse comportamento da frequência fundamental, agora na nota  $Dó_2$ .

O não aparecimento da fundamental, principalmente no ataque e em sons emitidos rapidamente, onde domina o ataque, concorda com Hosek [38]: “o som não soa imediatamente em toda sua força e timbre logo no momento do ataque ... até que todos os elementos sonoros cheguem à sua força e timbre definitivos ... No ataque de um som surgem ruídos característicos (ruídos de sopra), sem os quais o som perderia sua característica natural”.

A Tabela 5 apresenta as frequências da fundamental e de 10 harmônicos, bem como a diferença de frequência em relação ao harmônico anterior e seus níveis de pressão sonora, da nota  $Dó_2$ , conforme Figura 11b.

No caso da nota  $Dó_2$  o fagote apresentou melhor afinação, uma vez que a frequência esperada era 130,8 Hz e foi obtido 130,1 Hz, o que está dentro do erro experimental. A diferença de frequência em relação à anterior variou um pouco, o que significa uma menor harmonicidade, em comparação com a nota  $Sol_1$ . Observamos que os timbres das notas  $Sol_1$  e  $Dó_2$  são bem diferentes, conforme já tinha sido citado na seção anterior. O mesmo comportamento da nota  $Sol_1$  é observado na nota  $Dó_2$ , considerando as formas de onda e os espectros. A frequência fundamental não é observada na Figura 5f.

**Tabela 5:** Frequências, variações de frequência entre os harmônicos e NPS de cada frequência, da nota  $Dó_2$  do fagote, medida no lado esquerdo do fagotista.

| Harmônico   | frequência (Hz) | Df (Hz) | NPS (dB) |
|-------------|-----------------|---------|----------|
| Fundamental | 130,1           |         | 3,5      |
| 1°          | 256,0           | 125,5   | 2,5      |
| 2°          | 388,4           | 132,4   | 12,7     |
| 3°          | 514,1           | 125,7   | 32,2     |
| 4°          | 639,9           | 125,8   | 14,0     |
| 5°          | 765,6           | 125,7   | 5,2      |
| 6°          | 891,4           | 125,8   | -10,8    |
| 7°          | 1.023,8         | 132,4   | 22,1     |
| 8°          | 1.149,5         | 125,7   | 0,6      |
| 9°          | 1.281,9         | 132,4   | 34,8     |
| 10°         | 1406,0          | 124,9   | 16,4     |

O instrumento usado possui um comprimento total de 2,5 m. De acordo com o apresentado na seção 6, se fosse um tubo cilíndrico deveria emitir cerca de 34 Hz (ou pouco menos, considerando a correção da extremidade aberta), com todos os orifícios fechados, mas na verdade ele emite 58 Hz, que é sua frequência mais grave.

## 8. Conclusões

Este trabalho é fruto de uma parceria entre 4 estudantes de Física, uma professora de Física e dois Músicos (um formado em Regência e outro Bacharel em Violão). A parceria tem sido importante, permitindo o estudo da Física dos instrumentos musicais e a interação destes com as salas, que de outra forma não seria possível. Neste trabalho abordamos vários aspectos da física do fagote, sendo que a maioria deles estão baseados na Acústica básica, que pode ser estudada nos primeiros anos da graduação em Física, ou outros cursos da área tecnológica. O mesmo método pode ser aplicado ao estudo de outros instrumentos musicais, mesmo aos não aerofones. A Acústica Musical é uma área interdisciplinar e ampla, recurso que pode ser utilizado para motivar os estudantes e os professores, mostrando uma Física facilmente observável no cotidiano e relacionada com a Música, que normalmente interessa a todos. Também aos músicos (ou estudantes) esse estudo pode ser útil, podendo servir de motivação para estudos mais aprofundados de seus instrumentos, levando em conta aspectos importantes, que podem levar a uma melhor performance.

## Agradecimentos

Agradecemos os auxílios que temos recebido da Faperj e do CNPq, sem os quais esse e outros trabalhos não seriam possíveis.

## Referências

- [1] S. Sadie (org.), *Dicionário Grove de Música* (Jorge Zaar Editor, Rio de Janeiro, 1994).

- [2] F. Formiga, *Projeto Espiral – Fagote – aula 19 – montagem das palhetas*, disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=onNP9ZAVK7g&t=167s>, acessado em 16/05/2023.
- [3] H. Schweizer, *Portal do Fagote – Palhetas – um guia para sua confecção*, disponível em: [https://www.haryschweizer.com.br/Palhetas/index\\_palhetas.htm](https://www.haryschweizer.com.br/Palhetas/index_palhetas.htm), acessado em 16/05/2023.
- [4] E. Oft, *Make a bassoon reed part 1, Hang Gougung, Fold Over and Beveling*, disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=bcDZdfujJfE&t=87s>, acessado em 16/05/2023.
- [5] H. Schweizer, *Portal do Fagote – Fagote, uma breve história*, disponível em: <https://www.haryschweizer.com.br/Textos/brevehistoria.htm>, acessado em 16/05/2023.
- [6] J.A.S. Ribeiro, *Sobre os Instrumentos Sinfônicos e em Torno Deles* (Record, Rio de Janeiro, 2005).
- [7] A. Mayes, *Jupiter, the Bringer of Jollity (arranged for Bassoon Ensemble) – Gustav Holst*, disponível em: <https://youtu.be/QfG4TNj81W8>, acessado em 16/05/2023.
- [8] T. Plath, *Caprice No. 5, Nicolo Paganini, bassoon*, disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=pX9A5bib1FQ>, acessado em 16/05/2023.
- [9] D. Gatti, *Pedro e o Lobo, S. Prokofiev*, disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ggRJRJSjvFTA>, acessado em 16/05/2023.
- [10] R.S. Castro, *Benjamin Britten: Guia Orquestral para Jovens Instrumentistas*, disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=AsKrpvVhPF8>, acessado em 16/05/2023.
- [11] T. Benkócs, A. Vivaldi, *Concertos para Fagote*, disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=CrUafwWXBKk&list=OLAK5uy\\_k2SfWbrAKUsf3YkgQkSjFmK30O05bdMrA](https://www.youtube.com/watch?v=CrUafwWXBKk&list=OLAK5uy_k2SfWbrAKUsf3YkgQkSjFmK30O05bdMrA), acessado em 16/05/2023.
- [12] D. Zubke, *German and French bassoon comparison*, disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=IKc\\_liCxMQ](https://www.youtube.com/watch?v=IKc_liCxMQ), acessado em 16/05/2023.
- [13] A. Petri, *Obras de Compositores Brasileiros para Fagote Solo*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (1999).
- [14] F.A. Lima, *Elementos Fundamentais da Música* (Cia. Editora Leitura, Rio de Janeiro, 1948).
- [15] R. Bennett, *Instrumentos de Orquestra* (Jorge Zahar, Rio de Janeiro, 1985).
- [16] D. Santos, *As classificações de instrumentos musicais: um breve panorama*, disponível em: [https://www.mvim.com.br/wp-content/uploads/2022/04/classificacoes\\_daniel\\_dos\\_santos-1.pdf](https://www.mvim.com.br/wp-content/uploads/2022/04/classificacoes_daniel_dos_santos-1.pdf), acessado em 18/05/2023.
- [17] C. Sachs e J. Kunst, *The history of musical instruments* (W.W. Norton & Company, New York, 1962).
- [18] L.L. Henrique, *Acústica Musical* (Ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2007), 2 ed.
- [19] J.B. Kopp, *The Bassoon* (Yale University Press, New Haven, 2012), 1 ed.
- [20] T. Grothe, *Experimental Investigation of Bassoon Acoustics*. Tese de Doutorado, Universidade Técnica de Dresden, Dresden, (1978).
- [21] L. Fuks, em: *International Symposium on Music Acoustics* (Edinburgh, 1997).
- [22] J. Woodhouse, *Euphonics – The science of musical instruments*, disponível em: <https://euphonics.org/11-1-the-world-of-wind-instruments/>, acessado em 18/05/2023.
- [23] J. Meyer, *Acoustics and the Performance of Music* (Springer, New York, 2009).
- [24] N. Fletcher e T.D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments* (Springer, New York, 2008).
- [25] T.D. Rossing, *The Science of Sound* (Addison-Wesley Publishing Company, New York, 1990), 2 ed.
- [26] T. Grothe e M. Kob, em: *International Symposium on Music Acoustics* (Detmold, 2019).
- [27] S. Weinzierl, M. Vorländer, G. Behler, F. Brinkmann, H. von Coler, E. Detzner, J. Krämer, A. Lindau, M. Pollow, F. Schulz, et al., *A Database of Anechoic Microphone Array Measurements of Musical Instruments* (Aachen University, 2017).
- [28] J. Pätynen e T. Lokki, *Acta Acustica United with Acustica* **96**, 138 (2010).
- [29] R. Rasch e R. Plomp, em: *The psychology of music*, editado por D. Deutsch (Academic Press, New York, 1982).
- [30] W.A. Yost, *Acoustics Today*, **11**, 46 (2015).
- [31] W.M. Hartmann, *Signal, Sound and Sensation* (Springer-Verlag, New York, 1998).
- [32] B.R. Munson, D.F. Young e T.H. Okiishi, *Fundamentals of Fluid Mechanics* (Wiley, New York, 1998).
- [33] M.L. Grillo e L.R. Perez (org.), *Física e Música* (Ed. Livraria da Física, São Paulo, 2016).
- [34] P.R. Lehman, *J. Acoust. Soc. Am.* **36**, 1649 (1964).
- [35] W. Hyronimus e W.T. Grothe, em: *Proceeding of the German Conference on Acoustics*, (Rostock, 2019)
- [36] P. Boersma e D. Weenink, *Praat: doing phonetics by computer*, disponível em: <https://www.fon.hum.uva.nl/praat/>, acessado em 29/06/2023.
- [37] M.L. Grillo, L.R. Baptista e L.P. Brandão, em: *Anais do Tecnicacústica* (Valência, 2015).
- [38] M. Hosek, *The woodwind quintet* (Bernhard Brüchte, Grünwald, 1979).