# UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

**BERNARDO SANDRI** 

# ANALISE DA INFLUÊNCIA DOS DESLOCAMENTOS DOS PARAFUSOS DE AFINAÇÃO NAS FREQUÊNCIAS DE TAMBORES PERCUSSIVOS

CAXIAS DO SUL

## **BERNARDO SANDRI**

# ANALISE DA INFLUÊNCIA DOS DESLOCAMENTOS DOS PARAFUSOS DE AFINAÇÃO NAS FREQUÊNCIAS DE TAMBORES PERCUSSIVOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia.

Orientador: Prof. Me. Paulo Roberto Linzmaier

# CAXIAS DO SUL 2024

## **BERNARDO SANDRI**

# ANALISE DA INFLUÊNCIA DOS DESLOCAMENTOS DOS PARAFUSOS DE AFINAÇÃO NAS FREQUÊNCIAS DE TAMBORES PERCUSSIVOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia.

Aprovado em:

**BANCA EXAMINADORA** 

Prof. Me. Paulo Roberto Linzmaier Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Sandro Tomaz Martins

Prof. Dr. Leandro Luis Corso Universidade de Caxias do Sul – UCS

Dedico este trabalho a minha família, as pessoas mais importantes da minha vida, que me acompanharam e forneceram suporte durante toda esta jornada.

### AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Bruno e Alice, que me apoiaram e não mediram esforços durante toda vida, principalmente na minha jornada acadêmica, pelo amor e carinho durante todo este tempo.

À minha irmã Bruna, que foi minha base no início dessa jornada, me guiando pelo caminho certo.

À minha namorada Camila, pelo enorme apoio e companheirismo durante toda essa etapa, sendo muito compreensiva e prestativa o tempo todo, facilitando todo esse árduo processo.

Aos meus amigos de longa data, pelos momentos passados, que foram de grande valia ao longo desta caminhada.

A todos os professores que de alguma forma fizeram parte da minha trajetória acadêmica, ao meu orientador Professor Paulo Roberto Linzmaier, ao Professor Sandro Tomaz Martins que me direcionou através do seu conhecimento, ao Professor Leando Luis Corso por participar da minha banca e avaliar este trabalho, acrescentando no meu desenvolvimento acadêmico e também como pessoa.

#### RESUMO

O timbre do instrumento é uma característica importante que determina a forma como a música é interpretada pelo ouvinte, trazendo as características distintas de cada músico. O músico utiliza vários artifícios dos instrumentos para produzir o efeito desejado. O presente trabalho teve como objetivo principal analisar as frequências excitadas em membranas de tambores de bateria, ajustando a tensão superficial das membranas superiores e inferiores de diferentes formas. A análise foi feita de forma experimental, captado o som produzido pelas membranas excitadas através de uma baqueta, através de um microfone e placa de áudio. Com o auxílio dos softwares foram feitas as gravações e análises do som emitido. Cada metodologia de análise serviu para o entendimento do comportamento do espectro de frequências e dos harmônicos produzidos. Na etapa de equalização foi constatada a importância da equalização da membrana para a formação de harmônicos no som. No ajuste de frequências ficou determinado que o ajuste das membranas inferiores do tambor também impacta no aumento dos harmônicos, necessitando mesmo ajuste que a membrana superior. A determinação teórica das frequências dos modos de vibração não foi possível tendo em vista a dificuldade em determinar a tensão superficial da membrana, além do comportamento não ideal das membranas de tambores percussivos.

Palavras chave: Vibrações, Frequência, Membranas, Harmônicos, Tambores

### ABSTRACT

The timbre of the instrument is an important characteristic that determines the way the music is interpreted by the listener, bringing out the distinct characteristics of each musician. The musician uses various instrument devices to produce the desired effect. The main objective of this work was to analyze the excited frequencies in drum drum membranes, adjusting the surface tension of the upper and lower membranes in different ways. The analysis was carried out experimentally, capturing the sound produced by membranes excited through a drumstick, through a microphone and audio card. With the help of software, recordings and analyzes of the sound emitted were made. Each analysis methodology served to understand the behavior of the frequency spectrum and the harmonics produced. In the equalization stage, the importance of membrane equalization for the formation of harmonics in the sound was noted. When adjusting the frequencies, it was determined that the adjustment of the lower membranes of the drum also impacts the increase in harmonics, requiring the same adjustment as the upper membrane. The theoretical determination of the frequencies of the vibration modes was not possible given the difficulty in determining the surface tension of the membrane, in addition to the non-ideal behavior of percussive drum membranes.

Keywords: Vibrations, Frequency, Membranes, Harmonics, Drums

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Forma de onda. (a) Tom puro, (b) Ruído	19
Figura 2 – Propagação de onda gerada por um diapasão	19
Figura 3 - Onda sonora esférica	20
Figura 4 – Comparação entre frequências	21
Figura 5 – Forma de onda de um ruído (a), espectro sonoro do ruído (b)	22
Figura 6 - Superposição de três tons puros nas frequências f, 2f, 3f (a), espectro sonoro do	
som harmônico (b)	23
Figura 7 - Bumbo e caixa	27
Figura 8 - Caixa	28
Figura 9 - Kit de bateria	30
Figura 10 - Afinação da membrana	31
Figura 11 - Casco do tambor	31
Figura 12 - Bordas das conchas	32
Figura 13 - Modos de uma membrana ideal	33
Figura 14 - As seis frequências vibracionais mais baixas de uma caixa	34
Figura 15 - Interferogramas holográficos de uma caixa sem membranas (a), com membranas	3
(b)	34
Figura 16 - Representação dos modos de vibração através de um sistema massa-mola	35
Figura 17 - Espectro sonoro de um bumbo	36
Figura 18 - Bateria Pearl Roadshow	37
Figura 19 - Aresta de assentamento do casco	38
Figura 20 – Aro	38
Figura 21 - Parafuso de afinação	39
Figura 22 - Chave de aperto	39
Figura 23 - Membrana não ajustada	40
Figura 24 - Membrana ajustada	40
Figura 25 - Microfone condensador AKG P-170	41
Figura 26 - Placa de áudio Arturia MINIFUSE 1	42
Figura 27 - Cabo montado	42
Figura 28 - Base tambor 12"	43
Figura 29 - Sistema de pivô	44
	• •

Figura 31 - Especificação das membranas EVANS EC2S	45
Figura 32 - Posições definidas para equalização da membrana	46
Figura 33 - Posição microfone	47
Figura 34 - Configurações do Reaper	47
Figura 35 - Interface MIDI	49
Figura 36 - Sample Steve Slate Drums 5.5	50
Figura 37 - Espectro de frequências tambor 16" equalizado e não-equalizado	52
Figura 38 - Espectro de frequências tambor 12" equalizado e não-equalizado	53
Figura 39 - Gravação 5 sem ajuste da membrana inferior	54
Figura 40 - Gravação 6 com ajuste da membrana inferior	55
Figura 41 - Espectro de frequências do tambor de 12" ajustado conforme referência	56
Figura 42 - Espectro de frequências do tambor de 16" ajustado conforme referência	57
Figura 43 - Modos de vibração inarmônicos tambor 16"	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Frequências de pico da equalização	51
Tabela 2 - Avanços dos parafusos das membranas do tambor de 12"	55
Tabela 3 - Avanços dos parafusos das membranas do tambor de 16"	57

# LISTA DE SÍMBOLOS

$p_{pico}$	Pressão sonora de pico (Pa)	
Α	Amplitude	
r	Raio	
ω	Frequência angular (rad/s)	
k	Número de ondas	
$\phi$	Ângulo de fase (rad)	
f	Frequência (Hz)	
Т	Período (s)	
t	Tempo (s)	
n	Número de oitavas	
λ	Comprimento de onda (m)	
Ι	Intensidade sonora (W/m <sup>2</sup> )	
W	Potência sonora (W)	
Ζ	Impedância (kg/(m <sup>2</sup> s))	
W <sub>0</sub>	Potência sonora de referência (W)	
а	Raio da membrana (m)	
$T_s$	Tensão superficial aplicada à membrana (N/m)	
σ	Densidade de área (kg/m <sup>2</sup> )	
$\beta_{mn}$	Valores para os quais a função de Bessel torna-se zero	
f <sub>mn</sub>	Frequência do modo vibracional	
$m_b$	Massa da membrana batedora	
m <sub>s</sub>	Massa da membrana vibratória	
K <sub>b</sub>	Constante elástica da membrana batedora	
K <sub>s</sub>	Constante elástica da membrana vibratória	
K <sub>c</sub>	Constante elástica da coluna de ar	

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVOS	
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	PERCEPÇÃO MUSICAL	16
2.1.1	Tom	16
2.1.2	Afinação	
2.1.3	Música	
2.1.4	Timbre	
2.2	O SOM	
2.2.1	Ondas sonoras	
2.2.2	Frequência e período	21
2.2.3	Comprimento de onda	24
2.2.4	Grandezas sonoras	24
2.2.5	Nível logarítmico	26
2.3	TAMBOR PERCUSSIVO	27
2.3.1	Visão geral	27
2.3.2	Membrana	
2.3.3	Casco	
2.4	VIBRAÇÃO DA MEMBRANA	
2.4.1	Modos de vibração da caixa	
2.4.2	Modos de vibração do bumbo	
3	MATERIAIS E MÉTODOS	
3.1	OS TAMBORES	
3.2	MONTAGEM DOS TAMBORES	40
3.3	EQUIPAMENTOS	41
3.4	MEMBRANAS	44

3.5	MÉTODO EXPERIMENTAL	45
3.5.1	Método de equalização das membranas superiores e inferiores	45
3.5.2	Ajuste da frequência baseada na referência	48
3.6	SOFTWARES	50
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	51
4.1	EQUALIZAÇÃO DAS MEMBRANAS	51
4.2	AJUSTE DAS FREQUENCIAS	54
4.3	MODOS DE VIBRAÇÃO	58
5	CONCLUSÃO	59
REFER	RENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60 CÕES DOS
TAMR	ORES	62
APÊNI	DICE B – ESPECTROS DE FREQUÊNCIAS DO AJUSTE DE FRE(	QUÊNCIAS
DO TA	MBOR DE 12"	66
APÊNI	DICE C – ESPECTROS DE FREQUÊNCIAS DO AJUSTE DE FRE(	QUÊNCIAS
DO TA	MBOR DE 16"	69
APÊNI	DICE D – ESPECTROS DE FREQUÊNCIAS TAMBOR ATIN	GIDO NO
CENTH	RO E NA BORDA	70
APÊNI	DICE E – ALGORITMO DESENVOLVIDO NO MATLAB PARA A	ETAPA DE
EQUAI	LIZAÇÃO DAS MEMBRANAS	71
APÊNI	DICE F – ALGORITMO DESENVOLVIDO NO MATLAB	PARA A
DESEQ	QUALIZAÇÃO	76

### 1 INTRODUÇÃO

A música está fundamentalmente ligada ao nosso senso de identidade, esta afirmação necessita de investigações psicológicas sobre a importância e a natureza da música na vida contemporânea (MACDONALD; HARGREAVES; MIELL, 2017).

Os conjuntos de critérios de evolução dos instrumentos musicais se desenvolveram durante vários séculos, através da interação de fabricantes de instrumentos, intérpretes, compositores e ouvintes, para a maioria dos instrumentos musicais atualmente em uso (FLETCHER; ROSSING, 1991).

Na maioria dos instrumentos, a produção sonora depende do comportamento coletivo de várias vibrações, que podem estar fortemente acoplados entre si. Este acoplamento pode fazer com que o instrumento todo se comporte como um sistema vibratório complexo, mesmo que o elemento possua vibradores relativamente simples (FLETCHER; ROSSING, 1991).

Os instrumentos de percussão podem ser os nossos instrumentos musicais mais antigos e importantes. Os primeiros tambores percussivos eram provavelmente feitos de madeira, onde mais tarde descobriu-se que esticar uma pele e usar um batedor poderia maximizar o efeito sonoro (ROSSING, 2000).

O que muitas vezes é denominado de "som contemporâneo" faz uso extensivo de instrumentos de percussão, o que traz uma nova onda de interesse e popularidade para esse tipo de instrumento (ROSSING, 2000). Nos últimos anos o interesse de pesquisa em problemas acústicos tem aumentado, especificamente pelos fatores que incidem nas características sonoras, como os objetos, materiais, cenários e ambientes (ALEXANDRAKI et al., 2023).

O objetivo de muitos estudos físicos é para compreensão dos instrumentos musicais e para complementar o conhecimento empírico conquistado ao longo da história, com princípios científicos e ferramentas que permitirão a construção de excelentes instrumentos de uma forma mais confiável e efetiva. Muitos aspectos importantes da produção sonora em instrumentos envolvem características da física, e essas sutilezas podem revelar importantes características sonoras dos instrumentos (CAMPBELL, 2014).

A sensação sonora é ocasionada pela ação mecânica das vibrações elásticas do meio, ação que incide sobre o órgão auditivo. As ondas sonoras podem ser completamente caracterizadas pela sua altura, timbre e intensidade (COSTA, 2003).

O método de elementos finitos auxilia na análise e otimização, permitindo o cálculo de valores e otimização das formas, a fim de obter um conjunto que atinja as frequências modais (HENRIQUE; ANTUNES, 2003).

As propriedades dos materiais são diretamente relevantes para a construção e performance de instrumentos musicais. As propriedades mais relevantes são mecânicas, embora algumas sejam térmicas e químicas (FLETCHER; ROSSING, 1998).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A compreensão do funcionamento instrumentos musicais progrediu nas últimas décadas, auxiliado pela tecnologia de instrumentos de medição acústica e pelas técnicas de simulação computacional. A era moderna viu o surgimento de instrumentos eletrônicos de percussão, transformando a forma como o ritmo é criado e manipulado na música.

A física da bateria acústica ajuda a compreender como o som é produzido pela bateria, este conhecimento ajuda músicos, bateristas, engenheiros de gravação e designers de som a manipular o instrumento de forma mais eficaz, produzindo os sons desejados.

A construção da bateria envolve detalhes intrincados, como tensão das peles superiores e inferiores, materiais, dimensões dos tambores e aros de tensionamento, que impactam diretamente o som do instrumento.

O papel do tambor é ressoar com a vibração da pele, quanto maior o volume do corpo ressonante, menor a frequência característica, e mais fácil é ressoar na banda de frequência mais baixa, enquanto quanto menor o volume, mais fácil é ressoar na banda de frequência mais alta (YAMAHA CORPORATION, 2023).

A prática de afinação de bateria tenta minimizar pequenas diferenças de frequência associadas principalmente aos modos de vibração das membranas. A afinação é um processo desafiador e iterativo para o baterista devido tanto ao aspecto bidimensional das membranas do tambor quanto a tensão aplicada na membrana através do aro e dos parafusos (WORLAND, 2008).

Caixas e tom-toms usados em conjuntos de bateria geralmente produzem um som de toque de alta frequência indesejável quando atingido com força. Este toque é especialmente perceptível em pequenas distâncias e principalmente quando próximo a microfones de captação. Historicamente, para a solução desse problema, os bateristas aplicaram uma variedade de amortecedores em suas peles de bateria (WORLAND; MIYAHIRA, 2018).

#### 1.2 OBJETIVOS

## 1.2.1 Objetivo geral

Analisar a influência dos deslocamentos dos parafusos de afinação nas frequências de membranas de tambores de bateria.

## 1.2.2 Objetivos específicos

- a) Analisar a influência do deslocamento dos parafusos de afinação nas membranas de um tambor de bateria.
- b) Aferir o espectro de frequências através da diferença de afinação entre a membrana superior e inferior.
- c) Analisar os modos de vibração da membrana quando excitadas em diferentes diâmetros da membrana.

#### 2 **REFERENCIAL TEÓRICO**

Neste capítulo serão apresentados os componentes, conceitos e equações que descrevem um tambor percussivo.

### 2.1 PERCEPÇÃO MUSICAL

A percepção musical é um campo interdisciplinar, e se sobrepõe às disciplinas acadêmicas de física, biologia, psicologia, música, audiologia e engenharia, utilizando princípios de cada uma delas (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).

#### 2.1.1 Tom

Os sons são o resultado de modos complexos de vibração que incluem um tom fundamental e sobretons. A relação do fundamental com seus harmônicos determina o timbre do som. (HARTENBERGER, 2016).

Os bateristas têm a liberdade de determinar que tipo de tambor e som usarão, entre suas opções estão a profundidade da casca, espessura e material da casca, número e tipo de terminais de tensão, quantidade de tensão nas peles, entre outros (HARTENBERGER, 2016).

Identificar e produzir o tom mais apropriado dentro de um contexto musical pode surgir paralelamente ao desenvolvimento musical pessoal, à medida que a consciência sobre os intérpretes aumenta, eles desenvolvem os seus próprios conceitos de performances ideais (PARNCUTT; MCPHERSON, 2002).

Artistas mais experientes podem monitorar ajustes finos de tom, contribuindo com a qualidade e expressão musical (PARNCUTT; MCPHERSON, 2002).

Cada tom que chega ao nosso ouvido no decorrer de uma obra musical contém uma plenitude de informações. Percebemos um tom, volume e cor do tom (timbre). Além disso, notamos mudanças e flutuações no volume, bem como na natureza do tom, da mesma forma que podemos perceber a decadência da nota. Todos esses detalhes dão um tom característico, da qual extraímos o conteúdo musical (MEYER, 2009).

O som não consiste em uma oscilação senoidal, mas exibe uma sequência temporal complicada. Assim o ouvido é colocado na posição de precisar diferenciar tons de timbres diferentes no mesmo instante (MEYER, 2009).

O tom é uma sensação subjetiva. Duas pessoas que ouvem o mesmo som podem atribuí-lo a posições diferentes em uma escala de altura (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).

## 2.1.2 Afinação

Ao contrário dos tímpanos, as partes de uma bateria pertencem aos instrumentos de percussão sem afinação (MEYER, 2009).

Um impacto próximo ao meio da membrana favorece os componentes graves e um impacto próximo à borda favorece os parciais agudos. Tanto a localização inarmônica quanto a largura de frequência das parciais desfavorecem uma afinação única (MEYER, 2009).

O processo de decaimento desempenha um papel importante para instrumentos de percussão, a duração do decaimento é particularmente longa e determina a imagem tonal (MEYER, 2009).

Alguns instrumentos musicais, particularmente os de percussão, produzem ondas que não são periódicas e não têm altura definida. Esses instrumentos percussivos produzem sons sem afinação (FORDE; OLSEN, 2020).

## 2.1.3 Música

A música é escrita em pautas que se aproximam de escalas de frequência logarítmicas (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).

A música pode ser descrita como a arte de combinar sons com o objetivo de alcançar a forma e a expressão do pensamento e do sentimento (FORDE; OLSEN, 2020).

O tom é muito importante na criação de melodias. Uma melodia pode ser definida como uma sequência de notas ordenadas no tempo. Combinações harmoniosas de vários tons diferentes são chamadas de acordes (FORDE; OLSEN, 2020).

#### 2.1.4 Timbre

O timbre nos permite diferenciar as notas tocadas em uma flauta, um trompete e um violino, mesmo quando seu tom, dinâmica e duração são todos iguais (FORDE; OLSEN, 2020).

As frequências adicionais que criam o timbre são chamadas de harmônicos. Os harmônicos são múltiplos da frequência fundamental. Os timbres complexos que nos permitem

distinguir um instrumento de outro são simplesmente combinações de tons, misturados de acordo com as frequências fundamentais, harmônicos e amplitudes (FORDE; OLSEN, 2020).

A altura, o timbre e o ritmo são blocos de construção fundamentais da música, eles não são características objetivas do sinal acústico, mas fornecem experiências subjetivas na mente do ouvinte (FORDE; OLSEN, 2020).

Os sons da maioria dos instrumentos musicais consistem em séries de harmônicos que determinam o timbre. Quando a frequência fundamental predomina, a qualidade do tom é rica, quando a frequência fundamental não é suficientemente forte, a qualidade o tom é ruim (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).

### 2.2 O SOM

O som musical é gerado por algum tipo de sistema vibratório, seja uma corda um violino, a coluna de ar de uma trombeta, a pele de um tambor ou a bobina de um alto-falante (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).

Segundo Bistafa (2018), som pode ser definido como uma variação da pressão ambiente detectável pelo sistema auditivo. Ao nível do mar, a pressão ambiente é de 101350 *Pa*, e a menor variação de pressão ambiente detectável pelo sistema auditivo é da ordem de  $2 \times 10^{-5}$  *Pa*, logo essa pressão é denominada de limiar da audição.

No lado oposto ao limiar da audição encontra-se o limiar da dor, onde a pressão exercida sobre o sistema auditivo é capaz de gerar incomodo ao indivíduo. Diferentes valores de pressão são atribuídos ao limiar da dor, desde 20 até 200 Pa (BISTAFA, 2018).

Deslocando uma partícula de ar da sua posição original, forças elásticas do ar tendem a restaurá-la para sua posição original, devido à inércia da partícula, ela ultrapassa a posição de repouso, gerando forças elásticas na direção oposta, e assim por diante. O som é facilmente conduzido em gases, líquidos e sólidos, que são meios elásticos (EVEREST, 2001).

### 2.2.1 Ondas sonoras

O comportamento da pressão sonora é a informação que extraímos de um registrador gráfico acoplado a um microfone, ele capta a pressão sonora em determinado ponto do espaço durante um certo intervalo de tempo, esse registro é chamado de forma de onda (BISTAFA, 2018).

Um tom puro apresenta valor de pico ( $p_{pico}$ ) igual a amplitude (A), já para a forma de ruído apresenta vários valores de pico, conforme Figura 1 (BISTAFA, 2018).





Fonte: Bistafa (2018)

### 2.2.1.1 Onda sonora plana

No movimento de vibração do diapasão, conforme Figura 2, a movimentação das partículas de ar próximas ao diapasão gera a transmissão em cadeia a outras partículas. À medida que mais partículas vão sendo alcançadas pela onda, cada uma delas é colocada em movimento com as mesmas características das partículas que estão próximas do diapasão.



Figura 2 – Propagação de onda gerada por um diapasão.

Fonte: Bistafa (2018)

Segundo Bistafa (2018), uma onda sonora plana ocorre quando um tom puro propaga ondas em apenas uma direção. Isso significa que, em qualquer ponto de um plano perpendicular à coordenada x, a pressão sonora é uniforme em qualquer instante de tempo.

### 2.2.1.2 Onda sonora esférica

A propagação mais representativa dos sons que ouvimos no dia a dia se dá na forma de ondas esféricas, onde a pressão sonora apresenta a mesma fase em superfícies esféricas com centro na fonte sonora, conforme Figura 3 (BISTAFA, 2018).



Figura 3 - Onda sonora esférica

As principais diferenças das ondas esféricas com relação as planas são a substituição da coordenada x pela coordenada radial r (a partir do centro pulsante) e a relação inversa da amplitude com relação a r, conforme Equação (1).

$$p(r,t) = \frac{A}{r}\cos(\omega t - kr + \phi)$$
(1)

Fonta: Bistafa (2018)

A frequência é uma característica das ondas periódicas medidas em hertz, facilmente observáveis em um osciloscópio ou contados por um contador de frequência (EVEREST, 2001).

Define-se período como o intervalo de tempo decorrido para que um ciclo se complete na curva de variação da pressão ambiente com o tempo. Em acústica, é usual trabalhar-se com o inverso do período, que recebe o nome de frequência, portanto definida conforme Equação (2). A frequência indica o número de períodos existentes no intervalo de um segundo (BISTAFA, 2018).

$$f = \frac{1}{T} \tag{2}$$

Onde:

f =frequência (Hz)

T = período (s)

Conforme Figura 4 os sons tem a mesma amplitude de pressão sonora. Porém nosso sistema auditivo percebe o som de frequência f1 de frequência f2 como grave e agudo, respectivamente (BISTAFA, 2018).

Se a forma de onda for complexa ela pode ser resolvida em um espectro de frequências parciais, chamados de harmônicos (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).





Fonte: Bistafa (2018)

O sistema auditivo pode detectar sons na faixa de frequência entre 20 Hz e 20 kHz, essas frequências recebem o nome de faixa de áudio. Sons com frequência abaixo dessa faixa são chamados de infrassons, e sons com frequência acima são chamados de ultrassons (BISTAFA, 2018).

A frequência angular pode ser definida pela Equação (3).

$$\omega = 2 \times \pi \times f \tag{3}$$

2.2.2.1 Espectro sonoro

O espectro sonoro fornece o valor eficaz da pressão sonora para cada frequência presente no som, conforme Figura 5.



Figura 5 – Forma de onda de um ruído (a), espectro sonoro do ruído (b)

A transformada direta de Fourier é uma operação matemática aplicada a uma forma de onda, permitindo extrair dela o conteúdo de frequências. Ao se aplicar a transformada direta de Fourier à forma de onda da Figura 5(a), obtêm-se como resultado o gráfico da Figura 5(b), que é o gráfico do espectro sonoro da forma de onda. A chamada transformada inversa de Fourier é a operação matemática que permite "recuperar" a forma de onda a partir do espectro sonoro (BISTAFA, 2018).

A frequência mais baixa é denominada frequência fundamental e os sobretons são denominados harmônicos do fundamental, a Figura 6 demonstra a superposição de uma frequência mais baixa (frequência fundamental) e de duas frequências mais altas (harmônicos).

Fonte: Bistafa (2018)



Figura 6 - Superposição de três tons puros nas frequências f, 2f, 3f (a), espectro sonoro do som harmônico (b)

Fonte: Bistafa (2018)

Instrumentos musicais como de sopro, de corda ou metais, produzem sons harmônicos. Um som harmônico consiste na superposição da fundamental e de tons puros harmonicamente relacionados, em que cada frequência harmônica é um múltiplo da frequência fundamental (BISTAFA, 2018).

Outros sons poderão ser compostos de sobretons que não são múltiplos do fundamental, estes são denominados de sobretons não harmônicos, esses sons são geralmente produzidos por instrumentos de percussão (BISTAFA, 2018).

Os espectros sonoros de um determinado instrumento variam amplamente de acordo com a maneira como o instrumento é tocado (suave, alto, alto, baixo ou médio) e como o som é gravado (campo próximo, campo distante, campo reverberante, direção do microfone do instrumento, etc.) (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).

2.2.2.2 Bandas de oitava

Uma oitava é definida como uma proporção de 2:1 das duas frequências iniciais. As proporções de frequências fazem parte da escala musical. As frequências na proporção 2:1 são chamadas de bandas de oitava, na proporção 3:2 são chamadas de bandas de quinta e na proporção de 4:3 são chamadas de bandas de quarta. Como a oitava é muito importante em acústica, é bom o entendimento da expressão matemática, conforme Equação (5) (EVEREST, 2001).

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^n \tag{4}$$

Onde:

 $f_2$  = frequência superior do intervalo (Hz)  $f_1$  = frequência inferior do intervalo (Hz)

n = número de oitavas

2.2.2.3 Série de Fourier

A determinação dos componentes harmônicos de uma forma de onda periódica é chamada de série de Fourier, segundo o matemático Joseph Fourier, a vibração periódica pode ser construída partir de uma série de vibrações simples, cujas frequências são harmônicas de uma frequência fundamental, escolhendo as amplitudes e fases adequadas desses harmônicos (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).

#### 2.2.3 Comprimento de onda

A velocidade de propagação da onda sonora é chamada de velocidade do som (c), e essa velocidade corresponde a 340 metros por segundo, à temperatura ambiente. A definição de comprimento de onda ( $\lambda$ ) é a distância para que um ciclo se complete na curva pressão sonora *versus* distância (BISTAFA, 2018).

A relação entre comprimento de onda e frequência, através da velocidade do som, que é dada pela Equação (5).

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{5}$$

A definição de número de ondas é dada pela Equação (6).

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{6}$$

## 2.2.4 Grandezas sonoras

A energia sonora irá gerar uma pressão sonora em determinado ponto, portanto a pressão sonora não dependerá somente da potência sonora da fonte, mas também da posição da fonte em relação ao ponto de medição. Dessa forma, o que caracteriza acusticamente uma fonte sonora é sua potência sonora e não a pressão sonora. A potência sonora indica a capacidade de uma fonte som (BISTAFA, 2018).

A pressão sonora é uma grandeza física fortemente correlacionada com a sensação subjetiva de intensidade do som, além de ser possível medi-la diretamente com um microfone (BISTAFA, 2018).

A intensidade sonora, por ser uma grandeza vetorial, fornece indicação do fluxo de energia sonora atravessando uma superfície, a medição direta da intensidade sonora requer a utilização de equipamentos específicos e de procedimentos adequados de medição (BISTAFA, 2018).

#### 2.2.4.1 Pressão

O comportamento no tempo e no espaço da pressão sonora de um tom puro, pode ser descrito pela Equação (7).

$$p(x,t) = A\cos(\omega t \pm kx + \phi) \tag{7}$$

2.2.4.2 Intensidade

A intensidade sonora (I) é definida como a quantidade média de energia, na unidade de tempo, que atravessa uma área unitária perpendicular à direção de propagação da onda. Para ondas esféricas, a intensidade sonora é dada pela Equação (8) (BISTAFA, 2018).

$$I_r = \frac{(A/r)^2}{2\rho c} \tag{8}$$

Onde:

A = amplitude da pressão sonora (W) r = distância (m)

2.2.4.3 Potência

Para uma onda esférica, ao multiplicarmos a intensidade sonora pela distância r da esfera pulsante e pela área da superfície esférica que envolve a esfera pulsante nessa distância, obtém-se a potência sonora (W), conforme Equação (9) (BISTAFA, 2018).

$$W = I_r \times 4 \times \pi \times r^2 \tag{9}$$

A definição de impedância acústica específica (z) se dá pela razão entre a pressão sonora e a velocidade das partículas. A impedância acústica depende do meio de propagação e do tipo de onda presente. A impedância acústica específica é descrita pela Equação 10 (BISTAFA, 2018).

$$z = \rho \times c \tag{10}$$

## 2.2.5 Nível logarítmico

O *decibel* ou *unidade de sensação* (símbolo dB) é uma medida do nível da potência em relação à potência de referência, expressa pela Equação 11. A necessidade surgiu para comprimir uma ampla faixa de variação da escala linear de potências, conforme Tabela 1. Também verificou que 1 dB era a mínima variação da potência sonora detectável pelo sistema auditivo, tornando esse valor a potência sonora de referência (BISTAFA, 2018).

$$unidade - de - sensação = 10 \times \log(\frac{W}{W_o})$$
(11)

			(Continua)
Sensação subjetiva de intensidade	Descrição	Pressão sonora (Pa)	Nível de pressão sonora (dB)
	Perigo de ruptura do tímpano	200	140
	• Avião a jato a l m	200	140
Estrondoso	• Fogo de artilharia		
	Limiar da dor		
	• Tambor de graves a 1 m	63	130
	• Avião a jato a 5 m		
	Limiar do desconforto auditivo		
	• Avião a pistão a 3 m	20	120
	Broca pneumática		
Muito barulheto	• Metrô	63	110
	Próximo a uma britadeira	0,5	110
	Indústria barulhenta	2	100
	• Dentro de um avião	Z	100
	Banda ou orquestra sinfônica		
	• Rua barulhenta	0,63	90
Barulhento	Obs: Ambientes com níveis de pressão sonora		
	superiores a 85 dB são considerados insalubres		
	• Dentro de um automóvel em alta velocidade		
	Escritório barulhento	0,2	80
	• Aspirador de pó		

Tabela 1 - Pressões sonoras e níveis de pressão sonora para sons do cotidiano, e correspondentes sensações subjetivas de intensidade associadas.

			(Conclusao)
Moderado	Rua de barulho médio     Pessoa falando a 1 m	0,063	70
	Escritório de barulho médio     Rádio com volume médio	0,02	60
Tranquilo	<ul> <li>Restaurante tranquilo</li> <li>Escritório aberto (com tratamento acústico)</li> </ul>	0,006	50
	<ul><li>Sala de aula (ideal)</li><li>Escritório privado (ideal)</li></ul>	0,002	40
Silencioso	Teatro vazio     Quarto de dormir	0,0006	30
	<ul><li>Movimento de folhagem</li><li>Estúdio de rádio e TV</li></ul>	0,0002	20
Muito silencioso	<ul><li>Deserto ou região polar (sem vento)</li><li>Respiração normal</li></ul>	0,00006	10
	<ul><li> Laboratório de Acústica (câmara anecoica)</li><li> Limiar da audição</li></ul>	0,00002	0

Fonte: Bistafa (2018)

## 2.3 TAMBOR PERCUSSIVO

## 2.3.1 Visão geral

As peles são membranas de couro ou plástico esticadas através de algum tipo de arco ou estrutura tensora, o bumbo e caixa são exemplos de tambores percussivos, conforme Figura 7. Quando uma pele de bateria vibra, ela desloca ar próximo a ele e faz com que a pressão do ar local aumente e diminua ligeiramente. Essas flutuações de pressão se deslocam formando uma onda sonora. Os corpos vibrantes são as fontes mais comuns de som (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).





Fonte: Rossing et al. (2001)

~ . )

Para os percussionistas a escolha do instrumento implica em um espectro bastante amplo de possibilidades de instrumentos, desde um instrumento pequeno, com um som agudo e claro até um instrumento maior com um som mais grave rico em tons. Está na seleção de sons que cada percussionista exibe uma voz musical individual (HARTENBERGER, 2016).

Os tambores percussivos reproduzem tons não agudos, que são mais profundos se forem atingidos em direção ao centro da membrana e mais altos se forem atingidos perto da borda (ALEXANDRAKI et al., 2023).

A caixa é um instrumento de duas membranas com cerca de 33 a 38 cm de diâmetro e 13 a 20 cm de profundidade, demonstrado na Figura 8. A concha deste tipo de tambor pode ser feita de madeira, metal ou material sintético. A caixa é composta por um par de membranas fixadas através de um aro de metal (que pode ser de alumínio fundido ou aço conformado) no casco através de parafusos que fazem o tensionamento.





Fonte: Yamaha (2023)

Bumbos são os maiores tambores percussivos e normalmente tem de 50 a 100 cm de diâmetro (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001). Os bumbos são produzidos em madeira ou material sintético e sua forma é similar à da caixa, apresenta duas membranas, aro e parafusos de tensionamento.

O bumbo possui tom abafado, com contribuições mais fortes na faixa de 100 Hz, é caracterizado por uma infinidade de parciais inarmônicos, alguns dos quais estão intimamente emparelhados (MEYER, 2009).

Os tímpanos possuem um mecanismo de tensionamento operado por pedal em composto de seis ou oito parafusos tensores ao redor da borda, conforme Figura 9. O pedal normalmente permite variar a tensão em uma faixa de 2:1, o que corresponde a um ajuste de cerca de uma quarta musical. O tímpano afinado soará uma nota principal forte mais dois ou

mais tons harmônicos. A nota principal é proveniente do modo (11) e os sobretons são uma quinta perfeita, uma sétima maior e uma oitava acima do tom principal (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).



Figura 9 - Tímpano

Fonte: Rossing et al. (2001)

Três efeitos contribuem para os modos inarmônicos de um tímpano serem maiores em relação harmônica, o modo de vibração (11), a quantidade de ar no interior do tímpano e a tensão na membrana, sendo que o primeiro fator é o maior responsável pela diminuição da frequência harmônica (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).

O modo fundamental (01) aparece muito mais forte quando o tambor é tocado no centro, isso pode ser visto na Figura 10. Esses modos desaparecem rapidamente, no entanto, então eles não produzem muito som de bateria. Bater o tambor no centro produz um som bastante surdo e estrondoso (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).

Figura 10 - Tímpano excitado no ponto normal (a) e excitado no centro (b)



Fonte: Adaptado de Rossing (2001)

No início dos anos 1900, as necessidades espaciais e sonoras das bandas levaram ao surgimento de um novo conceito, que envolvia um músico tocando o bumbo e caixa simultaneamente, normalmente tocados individualmente por duas ou mais pessoas (HARTENBERGER, 2016).

Um kit de bateria consiste em vários tambores percussivos de diferentes diâmetros e profundidades, conforme Figura 11. As características dimensionais dos tambores diferenciam os timbres de cada peça, quando o instrumento é tocado.



Figura 11 - Kit de bateria

Fonte: Pearl Musical Instrument (2023)

## 2.3.2 Membrana

Os tambores possuem membranas de pele de animal ou material sintético esticadas sobre uma forma de concha, gerando um espaço com ar entre a membrana superior e a membrana inferior (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).

Conforme Hartenberger (2016), preparar uma membrana e prendê-la com tensão suficiente para produzir um som agradável não é nada simples, requer muito conhecimento aplicado, em outras palavras, tecnologia.

Após a segunda guerra mundial, produtos sintéticos tornaram possíveis a fabricação das peles em poliéster. Esse fato não mudou apenas o som da bateria, mas também abriu o caminho para ritmos que exigissem mais resistência da membrana (HARTENBERGER, 2016).

Para ajustar o som de seus instrumentos, os músicos podem alterar a tensão ou a massa da membrana, a tensão pode ser ajustada usando os parafusos de afinação que posicionam as membranas sobre os cascos dos tambores, conforme Figura 12 (ALEXANDRAKI et al., 2023).



Figura 12 - Afinação da membrana

Fonte: Gatzen (2023)

Afinação do tambor não significa afinar o tambor para um tom, mas sim para o tom preferido pelo baterista. Se o aperto da membrana não for uniforme, o tom do tambor mudará dependendo de onde o tambor for atingido (YAMAHA CORPORATION, 2023).

## 2.3.3 Casco

O tom, sustentação e projeção de um tambor percussivo é afetado pela forma do casco, conforme Figura 13. Quanto maior o volume do corpo, menor a frequência, e mais fácil é ressoar na banda de frequência mais baixa, enquanto quanto menor o volume, mais fácil é ressoar na banda de frequência mais alta. Portanto quanto maior o diâmetro mais grosso e pesado é o tom, e quanto menor mais brilhante será o tom (YAMAHA CORPORATION, 2023).



Figura 13 - Casco do tambor

Fonte: Azzarto (2015)

As bordas das conchas da bateria podem impactar no som, alterando o timbre de forma bastante significativa, conforme Figura 14. As bordas dos rolamentos são apenas uma peça do quebra-cabeça ao escolher tambores para atender a determinadas aplicações. Você também deve considerar fatores como tamanhos de tambor, composição da carcaça, configuração de camadas (horizontal, vertical, diagonal, etc.), tipo de acabamento e peles de tambor (DRUMMER, 2014).



Figura 14 - Bordas das conchas

Fonte: Drummer (2014)

## 2.4 VIBRAÇÃO DA MEMBRANA

Uma membrana pode ser considerada como uma corda bidimensional em que a sua força restauradora é devida à tensão aplicada a partir da borda. A membrana, como uma corda, pode ser afinada alterando a tensão. As membranas, sendo bidimensionais, podem vibrar em muitos modos que normalmente não são harmônicos (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).

Os instrumentos de percussão geralmente usam um ou mais dos seguintes tipos básicos de vibradores: cordas, barras, membranas, placas, colunas de ar ou câmaras de ar. Os quatro primeiros são mecânicos, e os dois últimos são pneumáticos (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).

As membranas estão compreendidas na classe dos vibradores cujos modos de vibração não estão relacionados harmonicamente, assim, os tons harmônicos que eles soam não serão harmônicos do tom fundamental. Os tons desses vibradores complexos dão aos instrumentos de percussão características de timbres distintos (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).

Os primeiros 12 modos de vibração de uma membrana circular são mostrados na Figura 15. Acima da representação de cada esboço são mostrados o par de valores de m e n, que representam diâmetros nodais e círculos nodais, respectivamente. Abaixo está a representação da frequência de vibração para esse modo dividido pela frequência do modo mais baixo (frequência fundamental), que está representado por 01 (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).



Figura 15 - Modos de uma membrana ideal

Fonte: Rossing et al. (2001)

O modo de vibração de uma membrana varia com o raio, a tensão e a espessura. A fórmula para as frequências dos vários modos vibracionais de uma membrana ideal está demonstrada na Equação (12) (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).

$$f_{mn} = \frac{1}{2a} \sqrt{\frac{T_s}{\sigma}} \beta_{mn} \tag{12}$$

Onde:

a = raio da membrana (m)

Ts = tensão superficial aplicada à membrana (N/m)

 $\sigma$  = densidade de área (kg/m<sup>2</sup>)

 $\beta$ mn = valores para os quais a função de Bessel torna-se zero

#### 2.4.1 Modos de vibração da caixa

Na caixa há um comportamento de acoplamento entre a membrana batedora e a membrana vibratória, especialmente em baixa frequência. Este acoplamento pode ocorrer acusticamente através do ar fechado ou mecanicamente através da casca, e isso leva à formação dos modos de frequências (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).

Nos dois primeiros modos de vibração, as membranas batedora e vibratória se movem como no modo (0, 1) de uma membrana ideal, conforme Figura 16. Na frequência mais baixa do par, ambas as membranas se movem na mesma direção, e na frequência mais alta, elas se movem em direções opostas (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).

O terceiro e o quarto modos da Figura 16, nos quais as cabeças se movem como o modo de membrana (1,1), são mais difíceis de modelar. Na membrana superior do par (1,1), o ar se move em uma distância menor, portanto, a frequência é maior. Este membro resulta num ligeiro movimento de balanço da concha (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).

Figura 16 - As seis frequências vibracionais mais baixas de uma caixa



Fonte: Rossing et al. (2001)

Embora as vibrações da concha tenham uma amplitude muito menor do que as das membranas, elas podem influenciar o som da bateria. Alguns modos vibracionais de uma caixa sem membranas (a) e de um tambor completo (b) são mostrados nos interferogramas holográficos da Figura 17 (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).

Figura 17 - Interferogramas holográficos de uma caixa sem membranas (a), com membranas (b)



Fonte: Rossing et al. (2001)

Um modelo simples de duas massas, presentado na Figura 18, descreve bem os dois primeiros modos de vibração de uma membrana. A membrana batedora é representada por uma massa  $m_b$  e uma mola com uma constante elástica  $K_b$ , a membrana vibratória por uma massa

 $m_s$  e uma constante elástica  $K_s$ , a coluna de ar constitui uma terceira mola com  $K_c$  constante conectando as duas massas. Este sistema está apresentado na Equação (13) (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).

$$f^{2} = \frac{1}{2} (f_{b}^{2} + f_{s}^{2} + f_{cb}^{2} + f_{cs}^{2})$$

$$\pm \frac{1}{2} \sqrt{[(f_{b}^{2} + f_{cb}^{2}) - (f_{s}^{2} + f_{cs}^{2})]^{2} + 4f_{cb}^{2}f_{cs}^{2}}$$

$$f_{b}^{2} = \frac{1}{4\pi^{2}} \frac{K_{b}}{m_{b}}$$

$$f_{s}^{2} = \frac{1}{4\pi^{2}} \frac{K_{s}}{m_{s}}$$

$$f_{cb}^{2} = \frac{1}{4\pi^{2}} \frac{K_{c}}{m_{b}}$$

$$f_{cs}^{2} = \frac{1}{4\pi^{2}} \frac{K_{c}}{m_{b}}$$
(13)

Figura 18 - Representação dos modos de vibração através de um sistema massa-mola



Fonte: Rossing et al. (2001)
### 2.4.2 Modos de vibração do bumbo

O bumbo é um dos instrumentos percussivos que tem como característica a transmissão de tons indefinidos, muito se deve ao fato de ter duas membranas, que podem ser tensionadas de forma ligeiramente diferente (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).

O bumbo é capaz de emitir o som mais alto de todos os instrumentos da orquestra. A maioria dos bateristas afina a membrana batedora com uma tensão maior do que a membrana vibratória. A Figura 19 demonstra os espectros sonoros de um tambor de 82 cm de diâmetro com a membrana vibratória ajustado com uma tensão da membrana batedora (a) e com ambas as membranas na mesma tensão (b). Em ambos os casos, a parcial mais baixa, irradiada pelo modo (01) em que as duas cabeças vibram em fase, é a mais forte (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2001).

Figura 19 - Espectro sonoro de um bumbo



Fonte: Adaptado de Rossing (2001)

A baixa tensão das membranas mais o forte acoplamento através do ar fechado levam a uma grande diferença de frequência entre os dois modos associados ao movimento em fase e fora de fase das cabeças. As taxas de decaimento do som para a maioria dos modos são ligeiramente maiores quando as duas cabeças estão na mesma tensão (ROSSING, 1987).

## **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Com o objetivo de realizar a proposta deste trabalho, foram realizados testes experimentais aplicados a membranas de tambores percussivos, visando o entendimento do comportamento físico e mecânico do conjunto, comparando com a teoria apresentada neste trabalho.

Os dados experimentais foram extraídos usando equipamentos de gravação e processados no *software* Matlab, juntamente com uma metodologia de execução dos experimentos que permita a repetibilidade para todos as membranas analisadas.

#### 3.1 OS TAMBORES

Os tambores analisados fazem parte de um kit de bateria do modelo Roadshow da marca Pearl, conforme Figura 20. Os materiais e processos utilizados na construção desta bateira são os mesmos para quaisquer medidas de tambores desta mesma linha.



Figura 20 - Bateria Pearl Roadshow

Fonte: O autor (2024)

Os cascos dos tambores foram produzidos com seis lâminas de madeira *Asian White Poplar* totalizando sete milímetros de espessura, construídos pelo processo de prensagem com calor. Os cascos possuem uma aresta de assentamento da membrana conforme Figura 21, onde consiste em um chanfro de 45° a 2 mm da parte externa do casco.

Figura 21 - Aresta de assentamento do casco



Fonte: O autor (2024)

Os aros são produzidos em aço com espessura de 1,25 mm, conforme Figura 22. Os aros são responsáveis pelo tensionamento da membrana no casco do tambor percussivo, por meio dos seis parafusos que fixam o aro.





Fonte: O autor (2024)

O experimento consistiu na escolha de dois tambores de bateira, um denominado tom com medidas de 12 polegadas de diâmetro por 8 polegadas de profundidade (tambores menores geram um espectro com frequências mais elevadas) e outro denominado surdo com medidas de 16 polegadas de diâmetro por 16 polegadas de profundidade (tambores maiores geram um espectro com frequências mais baixas).

A escolha dos tambores aconteceu pela semelhança construtiva entre eles, ambos possuem mesma espessura de casco, mesma espessura de aro e mesma quantidade de parafusos de afinação, variando apenas os tamanhos de profundidade e diâmetro do casco. Os tambores citados tem outra característica em comum, ambos são excitados pelo músico através de uma baqueta, eliminando uma variável que outras peças que compõe a bateria poderiam apresentar nos experimentos, como o bumbo por exemplo (o bumbo é excitado através de um pedal com ponteira produzida em feltro, de dimensões superiores a baqueta de madeira).

O sistema de ajuste da membrana consiste em seis parafusos de rosca triangular M5 com comprimento de 50 mm e passo de 0,8 mm, conforme Figura 23. O aperto angular desses parafusos será essencial para o desenvolvimento deste trabalho, visto que é a peça fundamental para o tensionamento das membranas.



Figura 23 - Parafuso de afinação

Fonte: O autor (2024)

Os ajustes nos parafusos de afinação foram feitos através de uma chave de aperto específica para parafusos de ajuste de tambores, conforme Figura 24.





Fonte: O autor (2024)

#### 3.2 MONTAGEM DOS TAMBORES

As montagens dos tambores aconteceram seguindo alguns procedimentos para garantir os padrões de tensão uniforme antes do ajuste das membranas das frequências dos tambores escolhidos.

Este procedimento consistiu na montagem de ambas membranas no tambor através dos aros e dos parafusos, após foi necessário o tensionamento das membranas através dos parafusos de forma distribuída, caso contrário a membrana apresentaria ondulações, o que é sinal de que o aro não está distribuindo a tensão igualmente em toda a membrana, conforme Figura 25.





Fonte: O autor (2023)

Para tensionar as membranas de forma distribuída foram apertados os parafusos manualmente, ajustando um parafuso do lado oposto ao outro, até que tenham alguma resistência mecânica, imprimindo baixa força. A membrana da Figura 26 passou por esse procedimento de ajuste, onde podemos notar a homogeneidade, garantindo um tensionamento uniforme por toda a área, antes do processo de equalização descrito no capítulo 3.





Fonte: O autor (2023)

Para coleta dos dados foram necessários equipamentos de gravação que oferecessem qualidade e confiabilidade na recepção e processamento dos sinais obtidos através das vibrações das membranas. Os equipamentos de gravação consistem em microfone, cabo XLR e interface de áudio.

O microfone escolhido foi um condensador, modelo P170 da marca AKG, conforme Figura 27, responsável pela captura do sinal analógico. Este microfone tem um padrão polar cardioide e é focado principalmente na gravação de instrumentos acústicos.

Este microfone apresenta um diafragma pequeno (1/2" de diâmetro), além de possuir uma sensibilidade de 15 mV/Pa e uma frequência de resposta de 20 Hz a 20 kHz.



Figura 27 - Microfone condensador AKG P-170

Posteriormente ao microfone, foi usada uma interface para processamento do sinal analógico em sinal digital, modelo escolhido foi o MINIFUSE 1 da marca Arturia com resolução de gravação de 24 *bits*, conforme

Figura 28 onde o microfone vai enviar os sinais através de um cabo. A interface é essencial para obter um sinal digital de qualidade, entre o microfone e o computador.

Fonte: O autor (2024)

RESIDENCE OF BUILDER

Fonte: O autor (2024)

O cabo XLR foi montado a partir de um cabo Santo Ângelo modelo SC-30 de quatro metros de comprimento, este cabo é produzido em liga de cobre OFHC com bitola de 0,30 mm<sup>2</sup>. Os conectores do cabo são da marca Amphenol, modelos AC3F e AC3MM, conforme Figura 29.



Figura 29 - Cabo montado

Fonte: O autor (2024)



A interface foi conectada diretamente ao computador, onde o mesmo manipulou os arquivos vindos da interface através dos *softwares* de tratamento de áudio.

Para a experimentação dos tambores e consequente gravação dos sons por eles emitidos, foi desenvolvido um sistema de pivô com uma baqueta de madeira, onde a ponta da baqueta sempre atinja a membrana na posição escolhida.

O tambor de 12" foi apoiado em uma estrutura que mantenha o fundo livre, assim a membrana de resposta tem uma vibração livre, essa estrutura é chamada de estande, e está demonstrado na Figura 30. O tambor de 16" possui uma base que já propicia a pele de resposta vibrar livremente.

Caso os tambores ficassem apoiados em uma superfície, isso abafaria o comportamento vibracional da membrana de resposta.



Figura 30 - Base tambor 12"

Fonte: O autor (2024)

O sistema de pivô foi posicionado em um terço da medida total da baqueta, a partir da parte inferior da baqueta, garantindo que a ponta da baqueta adquira velocidade para tocar a membrana. Foi desenvolvido um encosto de referência no mecanismo, este encosto possui um ângulo de 30° com o eixo vertical, conforme Figura 31.





Fonte: O autor (2024)

# 3.4 MEMBRANAS

Para experimentação de ambos os tamanhos de tambores foram escolhidas membranas superiores e inferiores do mesmo modelo, conforme Figura 32, garantindo que a experimentação dos tambores tenha variação apenas pelas características dimensionais.



Figura 32 - Membranas

Fonte: O autor (2024)

A membrana superior escolhida foi da marca Evans do modelo EC2S. Essa membrana possui filme transparente duplo com espessura de 7 mil cada, totalizando 14 mil de espessura total (mil é a medida usual para espessuras de membranas de bateria e corresponde a um centésimo de polegada), a Figura 33 demonstra as características técnicas.



Figura 33 - Especificação das membranas EVANS EC2S

Fonte: O autor (2024)

As membranas inferiores dos tambores foram mantidas as originais dos tambores, elas possuem espessura de 5 mil e são de filme transparente simples. As membranas inferiores são também conhecidas como peles de resposta, e imprimem as características de sustentação ao timbre.

# 3.5 MÉTODO EXPERIMENTAL

Os métodos experimentais seguiram algumas diretrizes para garantir a repetibilidade das gravações, gerando o menor erro possível entre as medições. Os experimentos contemplaram os tamanhos dos tambores escolhidos.

### 3.5.1 Método de equalização das membranas superiores e inferiores

Antes do início das gravações, um passo importante nas experimentações das membranas foi a equalização, esse método permite analisar de forma prática se a tensão da membrana está distribuída uniformemente, garantindo as características de afinação ideal do tambor. O pré-tensionamento uniforme auxilia na etapa de afinação da membrana, visto que neste processo todos os parafusos serão apertados igualmente.

Essa experimentação consiste em excitar a membrana em diferentes posições ao longo de um diâmetro estabelecido de dois terços do diâmetro total da membrana. Traçou-se uma linha entre os parafusos opostos, passando pelo centro, conforme Figura 34.



Figura 34 - Posições definidas para equalização da membrana

Fonte: O autor (2024)

Após a identificação dos pontos de impacto das membranas superiores e inferiores dos tambores de 12" e 16", iniciou-se o processo de montagem dos tambores. Ambas membranas passaram pelo ajuste de membrana descrito na Seção 3.2 e após receberam uma tensão inicial de 180° através da chave de aperto, estando aptas a serem equalizadas posteriormente.

Posteriormente à montagem dos tambores foram dispostos os equipamentos necessários para obtenção dos dados. O microfone foi montado na direção vertical para baixo, exatamente no cento da membrana, com uma distância de 300 mm entre o diafragma do microfone e a membrana. O sistema de pivô necessitou de um posicionamento padrão para todas as medições no perímetro, essa posição consiste em elevar 50 mm o centro de giro do pivô em relação a membrana, com a baqueta atingido o ponto sinalizado conforme Figura 35.



Figura 35 - Posição microfone

Fonte: O autor (2024)

O cabo XLR foi conectado do microfone para a placa de áudio. Na placa de áudio foi ativado o botão de 48V, este botão ativa a alimentação necessária para os microfones condensadores.

Para gravação no *software* Reaper, selecionou-se o *driver* que a própria placa de áudio gerencia após a instalação do *software* da Arturia Minifuse no computador. A taxa de amostragem selecionada é de 44,1 kHz, conforme Figura 36.

REAPER Preferences	s	꾸	$\times$		
Device	Audio device settings				
MIDI Devices	Audio sustan: ASIO				
Buffering	Addio system. Asio				
Mute/Solo					
Playback	ASIO Driver: MiniFuse ASIO Driver ~				
Scrub/Jog	Fnable inputs:				
Seeking					
Recording	first 1: MIC/LINE/INST 1				
Loop/Lane Recording	last 4: LOOPBACK Right				
Rendering					
Appearance	Output range.				
Media Dealer (Mausterna	first 1: Output Left ~				
Peaks/waverorms	Last 4: LOOPBACK Bight				
Track Central Panels					
Track Meters	Request sample rate: 44100 Request block size: 256				
Zoom/Scroll/Offset					
Envelope Colors	ASIO Configuration				
Editing Behavior	Pre-zero output buffers, useful on some hardware (higher CPU use)				
Envelope Display	Ignore ASIO reset messages (needed for some buggy drivers)				
Automation					
Automation Items	Audio thread priority: ASIO Default / MMCSS Pro Audio / Time Critical V				
Mouse V Allow projects to override device sample rate					
< >	<ul> <li>Anow projects to override device satisfie rate</li> </ul>				
Find	OK Cance	el App	oly		

Figura 36 - Configurações do Reaper

Fonte: O autor (2024)

Alguns parâmetros de gravação foram ajustados no *software* Reaper, o volume de entrada do microfone em 0 dB e o volume geral de masterização em 0 dB. Outro aspecto é que os áudios gravados foram extraídos em formato WAV, para posterior análise no Matlab.

Na aquisição de dados de cada ponto da membrana, foram gravados e exportados arquivos individuais do ponto 1 ao ponto 6. A análise do espectro de frequências se deu por passo a passo, onde os arquivos dos seis pontos foram analisados graficamente através dos algoritmos apresentados no Apêndice E e após os parafusos correspondentes ajustados entre  $22,5^{\circ}$  a 90°, dependendo da intensidade de desbalanceamento das frequências em cada ponto, visando uma diferença de frequências menor que 0,5%.

A equalização descrita anteriormente foi feita primeiramente na membrana inferior, com a ausência da membrana superior, para depois ser feita na membrana superior. Assim ambas as membranas foram totalmente equalizadas para o procedimento seguinte.

Após a equalização foi feito uma análise recuando o parafuso 1 da pele superior e inferior de ambos os tambores em 180°, buscando o entendimento do espectro de frequências quando a membrana não estiver exatamente equalizada.

### 3.5.2 Ajuste da frequência baseada na referência

Na sequência do processo de equalização das membranas, foi feito o processo de ajuste das membranas superiores e inferiores, buscando o mesmo comportamento do espectro de frequências que o *sample* escolhido como referência.

Para esta metodologia foi necessário a escolha de um *sample* de bateria. O *sample* simula uma bateria de forma virtual, com sons de uma bateria real gravado em estúdio. O *sample* é usado em conjunto com o Reaper, onde criou-se uma faixa MIDI e interagiu-se com a bateria, tocando a tecla que corresponde a cada tamanho de tambor da bateria, conforme Figura 37.

A gravação de referência dos tambores de 12" e 16" são gravadas em formato WAV para posterior uso no Matlab. Inicialmente o volume do amplificador de mixagem foi mantido em 0 dB.

Posteriormente, iniciou-se a fase de experimentação dos tambores em busca da frequência de referência. Essa fase consistiu na mesma metodologia de posicionamento de microfone e pivô usada na fase de equalização das membranas, porém na fase de ajuste de frequências o alvo do impacto é exatamente o centro da membrana, pois buscou-se evidenciar

a frequência fundamental. O ajuste dos parafusos de afinação também ocorreu da mesma forma que na equalização das membranas, entre 22,5° e 90°.

📥 (i) 🖛 🛥 1	â III									
	• 🚿									
	<u> </u>	0:00.000								
	M S FX U	0 <sup>(1)</sup> M EX 01-	AIDI							
]										
						4 <u>4</u>				
							MIDI take: 01-MIDI			
							File Edit Navigate	Options View Co	ontents Actions	
Program 1					∨ + Param	2/48 out UI 🕠 🖂		🔻 🗟 🖉	🗌 Q 🍰 🏼 🗅	년 🗐
	NOTE		ARTICULATION IN S	SSD5						
								l		
	62 6#7	(58)	Ride Cuge			MIDILEARN		1 1.2		
🎃 Create	A2	(57)	Crash Right Edge			MIDI LEARN		-		
alla Edia	G#2	(56)	Crash Right Choke			MIDI LEARN				
	G2	(55)	Crash Left Edge			MIDI LEARN				
H Mix	F#2	(54)	Crash Left Choke			MIDI LEARN				
Ш Мар	F2	(53)	Ride Bell			MIDI LEARN		-		
서 Grooves	E2	(52)	Ride Bow Shank			MIDI LEARN		-		
	D#2	(51)	Ride Bow Tip			MIDI LEARN				
Q Settings	D2	(50)	Splash Edge			MIDI LEARN				
e 2 Free Dry'n Tigł	C#2	(49)	Splash Choke			MIDI LEARN				
	C2	(48)	Rack Tom 1 Center			MIDI LEARN	C3			
2058.1MB	B1	(47)	Rack Tom 2 Center			MIDI LEARN				
Mapping Mode	A#1	(46)	HI-Hat Tip CC Controlable	e		MIDI LEARN				
Notes	A1	(45)	Atra Rack Tom Center (n	iot loaded)		MIDI LEARN				
CC CC	G#1	(44)	Floor Tom 1 Center			MIDILEARN				
	61 F#1	(42)	Hi-Hat Tin Closed			MIDI LEARN				
	F1	(41)	Floor Tom 2 Center			MIDI LEARN	C2			
	E1	(40)	Snare Rimshot (stacked)	)		MIDI LEARN				
	D#1	(39)	Snare Rimclick (stacked)	)		MIDI LEARN		······		
	D1	(38)	Snare Center (stacked)			MIDI LEARN				
Classic	C#1	(37)	Snare Sidestick (stacked	i)		MIDI LEARN				
Rimshot	C1	(36)	Kick Center			MIDI LEARN	Velocity			
	В0	(35)	Kick Double			MIDI LEARN		0 0		1
© Clear	E	0			0	1		Grid: 1/32	v straight v Notes: Grid	✓ 🗌 Key snap (
Save	Factory Reset	Set as Default	PRESET NAME 55	SD5 Original	Save Preset	Load Preset				
<sup>30</sup> 🛛 🖬 🕥										
-42 TRIM										

Figura 37 - Interface MIDI

Fonte: O autor (2024)

A gravação do tambor foi feita e comparada com a referência, através do programa do Matlab presente no Apêndice E. Esse método de gravação e análise foi repetido inúmeras vezes até que as frequências de pico do tambor real estivessem próximas da frequência de pico da referência.

Um aspecto importante foi que a membrana superior e inferior foi ajustada de forma independente, ou seja, para cada passo do ajuste foram extraídos dados do áudio, para obter o entendimento de como as variações de tensão da membrana superior e inferior podem alterar as características do espectro de frequência.

#### 3.6 SOFTWARES

O *software* Reaper foi usado para a manipulação do sinal sonoro gerado através da placa de áudio e coletado através do microfone, posteriormente gerou um arquivo de áudio com a gravação. O Reaper também foi usado com a função de *sample*, que será descrito posteriormente.

As gravações feitas através do *software* Reaper foram usadas pelo *software* Matlab, manipulando os dados e aplicando a Transformada Rápida de Fourier para obtenção dos gráficos de frequência (Hz) por intensidade sonora (dB), e posterior análise de cada etapa da experimentação.

Para a análise de espectro de frequências foram necessários os desenvolvimentos de programas dentro do *software* Matlab, informando e manipulando dados de entrada e obtendo dados de saída, os programas desenvolvidos estão descritos no Apêndice E e no Apêndice F.

Para a obtenção do padrão de referência para afinação das membranas, foi usado um *sample* que sintetiza o som de um tambor real. O *sample* escolhido foi o Steve Slate Drums da versão 5.5, conforme Figura 38, usado através do *software* Reaper que posteriormente gerou os arquivos de áudio. O kit de bateria escolhido dentro dos disponíveis foi o Deluxe 2 Free Dry'n Tight.



Figura 38 - Sample Steve Slate Drums 5.5

Fonte: O autor (2024)

#### 4 **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Após a conclusão das análises, foram reunidos todos os resultados, entendendo seus significados e comportamentos, encontrando coerência entre os experimentos e a referência.

### 4.1 EQUALIZAÇÃO DAS MEMBRANAS

A etapa de equalização serviu para a obtenção de uma tensão uniforme em toda a membrana, tendo em vista que para o procedimento de ajuste das frequências a irregularidade na tensão superficial pode alterar de forma significativa os resultados.

O desenvolvimento do algoritmo do Matlab que lê as gravações está contido no Apêndice E, e foi utilizado para fazer as análises gráficas dos resultados, gerando os gráficos de frequência por pressão sonora, usando a Transformada de Fourier. O Matlab exibe o harmônico com maior intensidade sonora em 0 dB e os outros harmônicos com menor intensidade são nivelados a partir do harmônico mais intenso, garantindo a mesma escala entre os seis pontos de excitação da membrana.

A equalização das membranas inferiores ocorreu sem a presença da membrana superior, para posteriormente a membrana superior ser montada e equalizada nos tambores. Percebeu-se uma variação entre as frequências de pico obtidas no tambor montado apenas com a membrana inferior e com ambas membranas. Essa variação foi de 20,66% para o tambor de 16" e 7,74% para o tambor de 12", mostrando que existe influência da membrana inferior no comportamento do espectro de frequências em um mesmo tambor.

A Tabela 2 mostra os valores das frequências de pico encontradas durante a fase de equalização. Foram necessários alguns ajustes para que a diferença entre as frequências fosse menor que 0,5%.

Gravação	Ponto 1 (Hz)	Ponto 2 (Hz)	Ponto 3 (Hz)	Ponto 4 (Hz)	Ponto 5 (Hz)	Ponto 6 (Hz)		
	Membrana superior tambor 12"							
1	92,62	92,4	92,15	92,3	92,33	92,5		
2	92,62	92,4	92,3	92,3	92,33	92,5		
Membrana inferior tambor 12"								
1	85,93	85,89	85,97	85,9	85,78	85,71		
Membrana superior tambor 16"								
1	73,07	73,06	73	73,05	72,97	73		
Membrana inferior tambor 16"								
1	60,48	60,4	60,26	60,48	60,4	60,56		
2	60,48	60,4	60,56	60,48	60,4	60,56		

Tabela 2 - Frequências de pico da equalização

Fonte: O autor (2024)

Para a membrana superior do tambor de 12" foi necessário um ajuste apertando 10° o parafuso correspondente ao ponto 3, ajustando de 0,51% para 0,35% de diferença entre o maior e o menor valor. Para a membrana inferior do tambor de 16" também foi necessário ajuste apertando o parafuso do ponto 3 em 10°, ajustando de 0,5% para 0,26%.

Os gráficos do Apêndice A demonstram os valores de pico antes e depois do ajuste para as membranas ajustadas. No Apêndice A podemos ver o comportamento do espectro de frequências de todas as membranas experimentadas, evidenciando a frequência fundamental (que nesse caso foi a frequência de pico) e as demais frequências harmônicas de outros modos de vibração com intensidade menor.

Posteriormente a equalização, foram feitas análises do espectro recuando em 180° o parafuso 1 da membrana superior e inferior, para o tambor de 12" e 16". O algoritmo desenvolvido está descrito no Apêndice F e foi utilizado para geração dos gráficos e posterior análise.

Neste experimento buscou-se o entendimento de como o recuo de um dos parafusos do tambor afetaria o espectro de frequências, tendo em vista que nessa metodologia a membrana foi atingida ao centro.

A Figura 39 demonstra os três espectros de frequências plotados no mesmo gráfico, pode-se perceber que para os três casos o espectro se comporta de forma semelhante, porém além da diferença de frequência de pico existe uma diferença de intensidade de cerca de 5 dB entre a membrana equalizada e não equalizadas.



Figura 39 - Espectro de frequências tambor 16" equalizado e não-equalizado

Fonte: O autor (2024)

A frequência de pico encontrada para o tambor de 16" equalizado foi de 77,55 Hz, posteriormente recou-se 180 graus no parafuso 1 da membrana superior, onde obteve-se 73,85 Hz que corresponde a um decréscimo de cerca de 4,77%. Em seguida recuou-se o parafuso 1 relativo à membrana inferior, onde obteve-se um valor de 71,75 Hz, uma redução da frequência de pico de cerca de 7,5% para a membrana equalizada e cerca 2,85% para a desequalização da membrana superior.

Para o tambor de 12" a frequência de pico encontrada equalizada foi de 114,76 Hz, posteriormente recou-se 180 graus no parafuso 1 da membrana superior, onde obteve-se 108,8 Hz que corresponde a um decréscimo de cerca de 5,2%. Em seguida recuou-se o parafuso 1 relativo à membrana inferior, onde obteve-se um valor de 104,8 Hz, uma redução da frequência de pico de cerca de 8,7% para a membrana equalizada e cerca 3,7% para a desequalização da membrana superior.

A Figura 40 mostra um comportamento semelhante ao tambor de 16", onde além da diminuição da frequência de pico, ouve uma diminuição na intensidade em relação as membranas equalizadas.



Figura 40 - Espectro de frequências tambor 12" equalizado e não-equalizado

Fonte: O autor (2024)

Observou-se que na faixa entre 100 e 120 Hz para o tambor de 16" e 120 a 150 Hz no tambor de 12" as amplitudes de intensidade são maiores para as membranas não equalizadas, mostrando que as intensidades dos modos não fundamentais aumentam, promovendo uma maior instabilidade no espectro de frequências.

## 4.2 AJUSTE DAS FREQUENCIAS

Para os ajustes das frequências dos tambores foram inicialmente necessárias as medições das frequências da referência geradas através do *sample*, onde a frequência de pico das medições foi de 117,68 Hz para o tambor de 12" e 80,25 Hz para o tambor de 16".

O primeiro tambor a ser ensaiado foi o de 12", onde inicialmente ajustou-se apenas a membrana superior, para entendimento do comportamento em relação a frequência fundamental e seus harmônicos.

O comportamento dos avanços das gravações 1, 2, 3, 4 e 5 demonstrou que o aumento da tensão apenas da membrana superior aumenta a frequência fundamental significativamente, porém traz um acentuamento dos harmônicos na faixa entre 180 e 300 Hz, conforme Figura 41.



Figura 41 - Gravação 5 sem ajuste da membrana inferior

Fonte: O autor (2024)

Na Tabela 3 estão descritos os avanços dos parafusos da membrana inferior e superior, juntamente com a frequência de pico encontrada em cada gravação. No Apêndice B estão disponíveis os gráficos de todas as gravações, para complementar o entendimento.

Gravação	Avanço membrana superior	Avanço membrana inferior	Frequência de pico (Hz)
1	0	0	71,08
2	+90°	0	88,49
3	$+45^{\circ}$	0	95,47
4	+90°	0	110,78
5	$+45^{\circ}$	0	116,5
6	0	+90°	127,94
7	-45°	0	122,47
8	-45°	0	115,74
9	0	$+45^{\circ}$	121,55
10	0	$+45^{\circ}$	124,91
11	-22,5°	0	123,4
12	-22,5°	0	120,62
13	-22,5°	0	117,17

Tabela 3 - Avanços dos parafusos das membranas do tambor de 12"

Fonte: O autor (2024)

A gravação 6 ocorreu após o ajuste de 90° da membrana inferior, sendo que não havia sido ajustada ainda. Pode-se perceber que com o ajuste da membrana inferior a intensidade dos harmônicos reduziu substancialmente, além de contribuir com o aumento da frequência de pico, conforme Figura 42.

Gravação 5 -5 Referência -10 -15 -20 ĘВ -25 -30 -35 -40 -45 -50 10<sup>2</sup> 10 Frequencia (Hz)

Figura 42 - Gravação 6 com ajuste da membrana inferior

Fonte: O autor (2024)

Com o aumento da frequência fundamental que ocorreu através do ajuste da gravação 6, foi necessário reduzir a tensão da membrana superior com o intuito de reduzir a frequência fundamental, esse procedimento foi feito nas gravações 7 e 8 onde recuou-se os parafusos em 45° em cada, reduzindo a frequência fundamental de 127,94 Hz para 115,74 Hz.

Posteriormente foram feitas as gravações 9 e 10, onde avançou-se os parafusos referentes a membrana inferior em 45° cada, onde buscou-se o entendimento de como os harmônicos na faixa de 230 Hz se comportariam. A gravação 9 reduziu em 8 dB os harmônicos da faixa de 230 Hz em relação a gravação 8, o que foi positivo em relação ao espectro de frequência da referência. Já a gravação 10 não apresentou redução de intensidade significativa, obtendo então um perfil aceitável de harmônicos.

Segundo Bistafa (2018), o ouvido humano consegue perceber a diferença de 1 Hz. Para as gravações 11, 12 e 13 foram apenas recuados os parafusos da membrana superior em 22,5°, buscando a diferença de frequência fundamental menor que 1 Hz com relação a frequência fundamental da referência.

O espectro de frequências ajustado do tambor de 12", mostrado na Figura 43, apresentou uma frequência fundamental de 117,17 Hz, mostrando uma diferença menor a 1 Hz em relação a referência. Pode-se perceber que a curva de frequências de subida e descida para a fundamental tem comportamento diferente, onde no tambor experimentado acontece de forma mais suave.



Figura 43 - Espectro de frequências do tambor de 12" ajustado conforme referência

Fonte: O autor (2024)

A metodologia de ajuste do tambor de 16" ocorreu de forma semelhante ao tambor de 12", porém para esse tambor, os ajustes ocorreram na membrana superior e inferior, conforme Tabela 4. Isso foi feito pois entendeu-se que ajustando apenas a membrana superior os harmônicos ficam evidenciados no espectro de frequências.

Gravação	Avanço membrana superior	Avanço membrana inferior	Frequência de pico (Hz)
1	0	0	59
2	+90°	+90°	76,52
3	+45°	+45°	82,1
4	-22,5°	0	80,25

Tabela 4 - Avanços dos parafusos das membranas do tambor de 16"

Fonte: O autor (2024)

Desta forma percebeu-se um comportamento de elevação da frequência fundamental avançando os parafusos, além da presença de harmônicos controlados. No Apêndice C os gráficos evidenciam este comportamento das frequências, comparado com o espectro de referência.

Na gravação 4 foi necessário o recuo de 22,5° da membrana superior, para que a frequência fundamental diminuísse preservando a intensidade dos harmônicos, conforme Figura 44, e apresentasse uma diferença menor que 1 Hz, da mesma forma que para o tambor de 12".



Figura 44 - Espectro de frequências do tambor de 16" ajustado conforme referência

Fonte: O autor (2024)

### 4.3 MODOS DE VIBRAÇÃO

Após o ajuste do tambor de 16" foram feitas gravações visando o entendimento dos modos de vibração da membrana, essas gravações consistiram em excitar a membrana no centro e no ponto 1 em 2/3 do diâmetro total da membrana.

Na Figura 45 é possível ver que a amplitude dos harmônicos quando a membrana é excitada fora do centro aumenta de forma significativa, variando de 5 a 35 dB para o harmônico seguinte ao fundamental, na faixa entre 90 e 95 Hz. O gráfico no Apêndice D complementa a análise.

Um ponto importante observado foi que o pico de frequência deixou de ocorrer na frequência fundamental para ocorrer em um ponto mais avançado do espectro de frequências, demonstrando que atingir a membrana mais próximo a borda evidencia modos de vibração completamente diferentes aos evidenciados quando atingimos a membrana no centro.





Fonte: O autor (2024)

## 5 CONCLUSÃO

Cada percussionista busca a sonoridade e timbre específicos do instrumento conforme suas características próprias, expressando sua personalidade na forma de compor a música e os diferenciando dos demais. Existem diversos tipos de instrumentos percussivos, onde cada um possui suas características musicais diferentes onde fatores como forma, materiais, afinação e forma de tocar modificam significativamente a característica do som emitido.

O ajuste de frequências não é o único responsável pelo timbre da bateria, onde mesmo afinando o instrumento para a mesma frequência de uma referência, soam de formas diferentes. Isso se deve pela influência da frequência fundamental, dos harmônicos e das amplitudes, no timbre do instrumento.

Na etapa de equalização da membrana percebeu-se a forma como o espectro de frequências se comporta, sobretudo no que diz respeito ao aumento dos modos harmônicos quando a membrana não está equalizada. Também pode-se perceber que ambos tambores produzem frequências de magnitude diferentes quando usados com uma ou duas membranas.

O ajuste das frequências mostrou que quando ajustamos apenas a membrana superior, o espectro tende a evidenciar os harmônicos, sendo necessários os ajustes das duas membranas simultaneamente. A etapa de ajuste de frequências, onde a membrana foi atingida no centro, evidenciou o modo de vibração da frequência fundamental do tambor.

A mudança do local de impacto na membrana do centro para a porção mais próxima a borda evidenciou que os modos de vibração de uma membrana são altamente dependentes da posição, evidenciando modos de vibração que trazem frequências com amplitude maior que a amplitude da frequência fundamental.

Para instrumentos percussivos afinados, como o tímpano, a membrana é preferencialmente atingida próxima a borda, onde evidencia-se os modos buscados pelo músico, garantindo timbre e característica tonal desejada.

A dificuldade na determinação da tensão da membrana não permitiu o cálculo da frequência de cada modo de vibração, além de não ser possível determinar com exatidão quais são os modos de vibração e qual as intensidades de cada modo que ocorreram na excitação da membrana.

Sugere-se, como continuação deste trabalho, a determinação quantitativa da tensão que os parafusos exercem na membrana, buscando uma relação entre os modos de vibração e a tensão da membrana.

# **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALEXANDRAKI, Chrisoula *et al.* Inferring Drumhead Damping and Tuning from Sound Using Finite Difference Time Domain (FDTD) Models. **Acoustics**, [S.L.], v. 5, n. 3, p. 1-19, 23 ago. 2023. MDPI AG. <u>http://dx.doi.org/10.3390/acoustics5030047</u>.

AZZARTO, Fran. What You Need To Know About...Drum Shells. 2015. Disponível em: https://www.moderndrummer.com/2015/02/need-know-drum-shells/. Acesso em: 29 nov. 2023.

BISTAFA, Sylvio R. ACÚSTICA APLICADA AO CONTROLE DO RUÍDO. 3. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 2018. 437 p.

CAMPBELL, D. Murray. Evaluating musical instruments. **Physics Today**, [S.L.], v. 67, n. 4, p. 35-40, 1 abr. 2014. AIP Publishing. http://dx.doi.org/10.1063/pt.3.2347. Disponível em: https://pubs.aip.org/physicstoday/article/67/4/35/414680/Evaluating-musical-instrumentsScientific. Acesso em: 20 set. 2023.

CO., Pearl Musical Instrument. DRUM SET ROADSHOW. 2023. Disponível em: https://pearldrum.com/global/products/drum-sets/roadshow/roadshow. Acesso em: 25 nov. 2023.

DRUMMER, Modern. What You Need To Know About...Bearing Edges. 2014. Disponível em: https://www.moderndrummer.com/2014/12/need-know-bearing-edges/. Acesso em: 27 nov. 2023.

D. Murray Campbell; Evaluating musical instruments. *Physics Today* 1 April 2014; 67 (4): 35–40. <u>https://doi.org/10.1063/PT.3.2347</u>

EVEREST, F. Alton. **The master handbook of acoustics**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2001. 615 p.

FLETCHER, Neville H.; ROSSING, Thomas D.. **The Physics of Musical Instruments**. New York: Springer-Verlag, 1991. 620 p.

FLETCHER, Neville H.; ROSSING, Thomas D.. **The Physics of Musical Intruments**. 2. ed. New York: Springer-Verlag, 1998. 756 p.

FORDE, William; OLSEN, Kirk N.. **The Science and Psychology of Music**: from beethoven at the office to beyoncé at the gym. Santa Barbara: Greenwood, 2020. 340 p.

GATZEN, Bob. SURVIVAL GUIDE: tuning the toms. TUNING THE TOMS. 2023. Disponível em:

https://www.daddario.com/globalassets/pdfs/percussion/drumset\_survival\_guide-daddarioevans.pdf?dl=0&preview=EVBR\_DSSG18\_Drumset\_Survival\_Guide\_PRESS.pdf. Acesso em: 27 nov. 2023.

HARTENBERGER, Russell. **The Cambridge Companion to Percussion**. Cambridge: Cambridge University Press, 2016. 326 p.

HENRIQUE, Luís L.; ANTUNES, José. Optimal Design and Physical Modelling of Mallet Percussion Instruments. Acta Acustica United With Acustica. Porto, p. 948-963. 1 abr. 2003.

MACDONALD, Raymond; HARGREAVES, David J.; MIELL, Dorothy (org.). Handbook of Musical Identities. United Kingdom: Oxford University Press, 2017. 897 p.

MEYER, Jurgen. Acoustics and the Performance of Music: manual for acousticians, audio engineers, musicians, architects and musical instruments makers. 5. ed. Bergkirchen: Springer, 2009. 438 p.

PARNCUTT, Richard; MCPHERSON, Gary E. The Science & Psychology of Music **Performance: Creative Strategies for Teaching and Learning**. New York: Oxford University Press, Inc, 2002. 388 p.

ROSSING, Thomas D. Acoustical behavior of a bass drum. **J. Acoust. Soc. Am.** Illinois, p. 69-69. 1 nov. 1987.

ROSSING, Thomas D.; MOORE, Richard F.; WHEELER, Paul A. **The Science of Sound**. 3. ed. Harlow: Pearson Education, Inc, 2001. 764 p.

ROSSING, Thomas D. Science Of Percussion Instruments. 3. ed. Singapura: Word Scientific, 2000.

WORLAND, Randy. Drum tuning: an experimental analysis of membrane modes under nonuniform tension. **Proceedings Of Meetings On Acoustics**, Miami, v. 5, n. 1, p. 1-12, 10 nov. 2008. ASA. <u>http://dx.doi.org/10.1121/1.3138888</u>.

WORLAND, Randy; MIYAHIRA, William. Physics of musical drum head damping using externally applied products. **Proceedings Of Meetings On Acoustics**, Victoria, v. 35, n. 1, p. 1-10, 5 nov. 2018. ASA. <u>http://dx.doi.org/10.1121/2.0001011</u>.

YAMAHA CORPORATION. **How sound is produced**: the relationship between the diameter, depth, and tone. The relationship between the diameter, depth, and tone. 2023. Disponível em:

https://www.yamaha.com/en/musical\_instrument\_guide/drums/mechanism/mechanism003.ht ml. Acesso em: 25 set. 2023.

# APÊNDICE A – ESPECTROS DE FREQUÊNCIAS DAS EQUALIZAÇÕES DOS TAMBORES



Espectro de frequências dos 6 pontos da membrana inferior tambor 12"

Frequências de pico dos 6 pontos da membrana inferior do tambor 12"





Espectro de frequências dos 6 pontos da membrana superior tambor 12"

Frequências de pico dos 6 pontos da membrana superior do tambor 12" com ajuste do ponto 3





Espectro de frequências dos 6 pontos da membrana inferior tambor 16"

Frequências de pico dos 6 pontos da membrana inferior do tambor 16" com ajuste do ponto 3





Espectro de frequências dos 6 pontos da membrana superior tambor 16"

Frequências de pico dos 6 pontos da membrana superior do tambor 16"



# APÊNDICE B – ESPECTROS DE FREQUÊNCIAS DO AJUSTE DE FREQUÊNCIAS DO TAMBOR DE 12"



Gravações dos ajustes do tambor de 12"





# APÊNDICE C – ESPECTROS DE FREQUÊNCIAS DO AJUSTE DE FREQUÊNCIAS DO TAMBOR DE 16"



Gravações dos ajustes do tambor de 16"

# APÊNDICE D – ESPECTROS DE FREQUÊNCIAS TAMBOR ATINGIDO NO CENTRO E NA BORDA



Tambor de 16" excitado na borda e no centro

## APÊNDICE E – ALGORITMO DESENVOLVIDO NO MATLAB PARA A ETAPA DE EQUALIZAÇÃO DAS MEMBRANAS

```
function[]=TCC_FOURIER()
clc, close, clear all
%% leitura de audio
[audio_lido,taxa_lida] = audioread('tk1 - pf 1.wav');
tamanho_audio = length(audio_lido);
size_audio = size(audio_lido);
tempo_audio_segundos = tamanho_audio/taxa_lida;
sound(audio_lido,taxa_lida);
```

```
[audio_lido2,taxa_lida2] = audioread('tk1 - pf 2.wav');
tamanho_audio2 = length(audio_lido2);
size_audio2 = size(audio_lido2);
tempo_audio_segundos2 = tamanho_audio2/taxa_lida2;
sound(audio_lido2,taxa_lida2);
```

```
[audio_lido3,taxa_lida3] = audioread('tk1 - pf 3.wav');
tamanho_audio3 = length(audio_lido3);
size_audio3 = size(audio_lido3);
tempo_audio_segundos3 = tamanho_audio3/taxa_lida3;
sound(audio_lido3,taxa_lida3);
```

```
[audio_lido4,taxa_lida4] = audioread('tk1 - pf 4.wav');
tamanho_audio4 = length(audio_lido4);
size_audio4 = size(audio_lido4);
tempo_audio_segundos4 = tamanho_audio4/taxa_lida4;
sound(audio_lido4,taxa_lida4);
```

```
[audio_lido5,taxa_lida5] = audioread('tk1 - pf 5.wav');
tamanho_audio5 = length(audio_lido5);
size_audio5 = size(audio_lido5);
tempo_audio_segundos5 = tamanho_audio5/taxa_lida5;
sound(audio_lido5,taxa_lida5);
```

```
[audio lido6,taxa lida6] = audioread('tk1 - pf 6.wav');
tamanho audio6 = length(audio lido6);
size audio6 = size(audio lido6);
tempo audio segundos6 = tamanho audio6/taxa lida6;
sound(audio lido6,taxa lida6);
888
%figure(1) %%pontos
%grid on;
%hold on;
trecho1 = audio lido;
trecho2 = audio lido2;
trecho3 = audio lido3;
trecho4 = audio lido4;
trecho5 = audio lido5;
trecho6 = audio lido6;
%plot(trecho1);
%plot(trecho2);
%plot(trecho3);
%plot(trecho4);
%plot(trecho5);
%plot(trecho6);
%hold off;
```
```
tempo do trecho = length(trecho1)/taxa lida;
tempo do trecho2 = length(trecho2)/taxa lida2;
tempo do trecho3 = length(trecho3)/taxa lida3;
tempo do trecho4 = length(trecho4)/taxa lida4;
tempo do trecho5 = length(trecho5)/taxa lida5;
tempo do trecho6 = length(trecho6)/taxa lida6;
DT = tempo_do_trecho / (length(trecho1)-1);
DT2 = tempo_do_trecho2 / (length(trecho2)-1);
DT3 = tempo_do_trecho3 / (length(trecho3)-1);
DT4 = tempo_do_trecho4 / (length(trecho4)-1);
DT5 = tempo_do_trecho5 / (length(trecho5)-1);
DT6 = tempo do trecho6 / (length(trecho6)-1);
tempo = 0:DT:tempo do trecho;
tempo2 = 0:DT2:tempo_do_trecho2;
tempo3 = 0:DT3:tempo do trecho3;
tempo4 = 0:DT4:tempo do trecho4;
tempo5 = 0:DT5:tempo do trecho5;
tempo6 = 0:DT6:tempo do trecho6;
%% ajustes
Dt = DT;
y = trecho1;
y2 = trecho2;
y3 = trecho3;
y4 = trecho4;
y5 = trecho5;
y6 = trecho6;
%% FFT
Fs = 1/DT+1; % frequencia de referência para
L = length(y); % comprimento do vetor y.
NFFT = 2^nextpow2(L); % potência de 2 mais próxima acima do comprimento do
vetor y.
% L % NFFT % nextpow2(L) % 2^16 % 2^15
Y = fft(y,NFFT)/L ; % transformda rápida de Fourier.
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1); % eixo das frequências.
Fs2 = 1/DT2+1; % frequencia de referência para
L2 = length(y2); % comprimento do vetor y.
NFFT2 = 2<sup>nextpow2</sup>(L2); % potência de 2 mais próxima acima do comprimento
do vetor y.
% L % NFFT % nextpow2(L) % 2^16 % 2^15
Y2 = fft(y2,NFFT2)/L2 ; % transformda rápida de Fourier.
f2 = Fs2/2*linspace(0,1,NFFT2/2+1); % eixo das frequências.
Fs3 = 1/DT3+1; % frequencia de referência para
L3 = length(y3); % comprimento do vetor y.
NFFT3 = 2<sup>nextpow2</sup>(L3); % potência de 2 mais próxima acima do comprimento
do vetor y.
% L % NFFT % nextpow2(L) % 2^16 % 2^15
Y3 = fft(y3,NFFT3)/L3 ; % transformda rápida de Fourier.
f3 = Fs3/2*linspace(0,1,NFFT3/2+1); % eixo das frequências.
Fs4 = 1/DT4+1; % frequencia de referência para
```

```
L4 = length(y4); % comprimento do vetor y.
NFFT4 = 2<sup>nextpow2</sup>(L4); % potência de 2 mais próxima acima do comprimento
do vetor y.
% L % NFFT % nextpow2(L) % 2^16 % 2^15
Y4 = fft(y4,NFFT4)/L4 ; % transformda rápida de Fourier.
f4 = Fs4/2*linspace(0,1,NFFT4/2+1); % eixo das frequências.
Fs5 = 1/DT5+1; % frequencia de referência para
L5 = length(y5); % comprimento do vetor y.
NFFT5 = 2<sup>nextpow2</sup>(L5); % potência de 2 mais próxima acima do comprimento
do vetor y.
% L % NFFT % nextpow2(L) % 2^16 % 2^15
Y5 = fft(y5,NFFT5)/L5 ; % transformda rápida de Fourier.
f5 = Fs5/2*linspace(0,1,NFFT5/2+1); % eixo das frequências.
Fs6 = 1/DT6+1; % frequencia de referência para
L6 = length(y6); % comprimento do vetor y.
NFFT6 = 2<sup>nextpow2</sup>(L6); % potência de 2 mais próxima acima do comprimento
do vetor y.
% L % NFFT % nextpow2(L) % 2^16 % 2^15
Y6 = fft(y6,NFFT6)/L6 ; % transformda rápida de Fourier.
f6 = Fs6/2*linspace(0,1,NFFT6/2+1); % eixo das frequências.
%% gráficos da FFT
figure(2) % figura 2
hold on
plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)),'r','LineWidth',2) ; % gráfico do espectro de
frequencia.
plot(f2,2*abs(Y2(1:NFFT2/2+1)),'b','LineWidth',2) ; % gráfico do espectro
de frequencia.
plot(f3,2*abs(Y3(1:NFFT3/2+1)),'g','LineWidth',2); % gráfico do espectro
de frequencia.
plot(f4,2*abs(Y4(1:NFFT4/2+1)),'y','LineWidth',2) ; % gráfico do espectro
de frequencia.
plot(f5,2*abs(Y5(1:NFFT5/2+1)),'m','LineWidth',2) ; % gráfico do espectro
de frequencia.
plot(f6,2*abs(Y6(1:NFFT6/2+1)),'k','LineWidth',2) ; % gráfico do espectro
de frequencia.
legend(["Ponto 1", "Ponto 2", "Ponto 3", "Ponto 4", "Ponto 5", "Ponto 6"])
grid on; % grade.
axis([40 80 0 0.0004])
title('Amplitudes de v(t)')
xlabel('Frequencia (Hz)')
vlabel(' | Y(f) | ')
hold off
%% GRAFICOS FFT Hz / dB
Ymod = 2*abs(Y(1:NFFT/2+1));
Ymin = min(Ymod);
Ymax = max(Ymod);
Ymin;
Lp Ymod = 10 \times \log 10 (Ymod.^2/Ymin^2);
Lp Ymodx = 10*log10(Ymod.^2/Ymax^2);
Ymod2 = 2*abs(Y2(1:NFFT2/2+1));
Ymin2 = min(Ymod2);
Ymax2 = max(Ymod2);
Ymin2;
```

```
Lp Ymod2 = 10*log10(Ymod2.^2/Ymin2^2);
Lp Ymodx2 = 10*log10(Ymod2.^{2}/Ymax2^{2});
Ymod3 = 2*abs(Y3(1:NFFT3/2+1));
Ymin3 = min(Ymod3);
Ymax3 = max(Ymod3);
Ymin3;
Lp Ymod3 = 10*log10(Ymod3.^{2}/Ymin3^{2});
Lp Ymodx3 = 10*log10(Ymod3.^2/Ymax3^2);
Ymod4 = 2*abs(Y4(1:NFFT4/2+1));
Ymin4 = min(Ymod4);
Ymax4 = max(Ymod4);
Ymin4;
Lp Ymod4 = 10*log10(Ymod4.^2/Ymin4^2);
Lp Ymodx4 = 10*log10(Ymod4.^{2}/Ymax4^{2});
Ymod5 = 2*abs(Y5(1:NFFT5/2+1));
Ymin5 = min(Ymod5);
Ymax5 = max(Ymod5);
Ymin5;
Lp Ymod5 = 10*log10(Ymod5.^2/Ymin5^2);
Lp Ymodx5 = 10*log10(Ymod5.^2/Ymax5^2);
Ymod6 = 2*abs(Y6(1:NFFT6/2+1));
Ymin6 = min(Ymod6);
Ymax6 = max(Ymod6);
Ymin6;
Lp Ymod6 = 10*log10(Ymod6.^{2}/Ymin6^{2});
Lp Ymodx6 = 10*log10(Ymod6.^{2}/Ymax6^{2});
figure(3) % figura 3 gráfico escala logarítmica
semilogx(f,Lp Ymodx,'r','LineWidth',2) ; hold on;
semilogx(f2,Lp Ymodx2,'b','LineWidth',2);
semilogx(f3,Lp Ymodx3,'g','LineWidth',2);
semilogx(f4,Lp Ymodx4,'y','LineWidth',2);
semilogx(f5,Lp Ymodx5,'m','LineWidth',2);
semilogx(f6,Lp_Ymodx6,'k','LineWidth',2);
legend(["Ponto 1", "Ponto 2", "Ponto 3", "Ponto 4", "Ponto 5", "Ponto 6"])
axis([72.7 73.3 -0.2 0.2])
grid on; % grade.
%%title('Hx x dB')
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('dB')
[maxymodx,imodx] = max(Lp Ymodx); % valor maximo dentro do vetor e
seleciona a posição do valor máximo
[maxymodx2,imodx2] = max(Lp Ymodx2); % valor maximo dentro do vetor e
seleciona
[maxymodx3,imodx3] = max(Lp_Ymodx3); % valor maximo dentro do vetor e
seleciona a posição do valor máximo
[maxymodx4,imodx4] = max(Lp Ymodx4); % valor maximo dentro do vetor e
seleciona
[maxymodx5,imodx5] = max(Lp_Ymodx5); % valor maximo dentro do vetor e
seleciona a posição do valor máximo
[maxymodx6,imodx6] = max(Lp_Ymodx6); % valor maximo dentro do vetor e
seleciona
```

```
semilogx(f(1,imodx),maxymodx,
'or','MarkerEdgeColor','r','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',5,'LineWidth'
,0.1); hold on;
```

```
semilogx(f(1,imodx2),maxymodx2,
'or', 'MarkerEdgeColor', 'b', 'MarkerFaceColor', 'b', 'MarkerSize',5, 'LineWidth'
,0.1);
semilogx(f(1, imodx3), maxymodx3,
'or', 'MarkerEdgeColor', 'g', 'MarkerFaceColor', 'g', 'MarkerSize', 5, 'LineWidth'
,0.1);
semilogx(f(1, imodx4), maxymodx4,
'or', 'MarkerEdgeColor', 'y', 'MarkerFaceColor', 'y', 'MarkerSize', 5, 'LineWidth'
,0.1);
semilogx(f(1, imodx5), maxymodx5,
'or', 'MarkerEdgeColor', 'm', 'MarkerFaceColor', 'm', 'MarkerSize', 5, 'LineWidth'
,0.1);
semilogx(f(1, imodx6), maxymodx6,
'or', 'MarkerEdgeColor', 'k', 'MarkerFaceColor', 'k', 'MarkerSize', 5, 'LineWidth'
,0.1);
legend(["Ponto 1", "Ponto 2", "Ponto 3", "Ponto 4", "Ponto 5", "Ponto 6"])
figure(4) % figura 4 gráfico escala logarítmica 20Hz-20kHx
semilogx(f,Lp_Ymodx,'r','LineWidth',1.5) ; hold on;
semilogx(f2,Lp Ymodx2,'b','LineWidth',1.5);
semilogx(f3,Lp_Ymodx3,'g','LineWidth',1.5);
semilogx(f4,Lp Ymodx4,'y','LineWidth',1.5);
semilogx(f5,Lp_Ymodx5,'m','LineWidth',1.5);
semilogx(f6,Lp Ymodx6,'k','LineWidth',1.5);
legend(["Ponto 1", "Ponto 2", "Ponto 3", "Ponto 4", "Ponto 5", "Ponto 6"])
axis([50 250 -70 0])
grid on; % grade.
%%title('Hx x dB')
xlabel('Frequência (Hz)')
vlabel('dB')
[maxymodx,imodx] = max(Lp Ymodx); % valor maximo dentro do vetor e
seleciona a posição do valor máximo
[maxymodx2,imodx2] = max(Lp Ymodx2); % valor maximo dentro do vetor e
seleciona
[maxymodx3,imodx3] = max(Lp Ymodx3); % valor maximo dentro do vetor e
seleciona a posição do valor máximo
[maxymodx4,imodx4] = max(Lp Ymodx4); % valor maximo dentro do vetor e
seleciona
[maxymodx5,imodx5] = max(Lp Ymodx5); % valor maximo dentro do vetor e
seleciona a posição do valor máximo
[maxymodx6,imodx6] = max(Lp Ymodx6); % valor maximo dentro do vetor e
seleciona
semilogx(f(1,imodx),maxymodx,'or','MarkerEdgeColor','r','MarkerFaceColor','
r','MarkerSize',5); hold on;
semilogx(f(1,imodx2),maxymodx2,
'or', 'MarkerEdgeColor', 'b', 'MarkerFaceColor', 'b', 'MarkerSize',5);
semilogx(f(1, imodx3), maxymodx3,
'or', 'MarkerEdgeColor', 'g', 'MarkerFaceColor', 'g', 'MarkerSize',5);
semilogx(f(1, imodx4), maxymodx4,
'or', 'MarkerEdgeColor', 'y', 'MarkerFaceColor', 'y', 'MarkerSize',5);
semilogx(f(1, imodx5), maxymodx5,
'or', 'MarkerEdgeColor', 'm', 'MarkerFaceColor', 'm', 'MarkerSize',5);
semilogx(f(1, imodx6), maxymodx6,
'or', 'MarkerEdgeColor', 'k', 'MarkerFaceColor', 'k', 'MarkerSize',5);
legend(["Ponto 1","Ponto 2","Ponto 3","Ponto 4","Ponto 5","Ponto 6"])
```

## APÊNDICE F – ALGORITMO DESENVOLVIDO NO MATLAB PARA A DESEQUALIZAÇÃO

```
function[]=TCC FOURIER()
clc, close, clear all
%% leitura de audio
[audio lido,taxa lida] = audioread('tom com.wav');
tamanho audio = length(audio lido);
size audio = size(audio lido);
tempo audio segundos = tamanho audio/taxa lida ;
sound(audio lido,taxa lida);
[audio_lido2,taxa_lida2] = audioread('tom sem 180 sup.wav');
tamanho_audio2 = length(audio_lido2);
size audio2 = size(audio lido2);
tempo audio segundos2 = tamanho audio2/taxa lida2;
sound(audio lido2,taxa lida2);
[audio lido3,taxa lida3] = audioread('tom sem 180 inf 180 sup.wav');
tamanho audio3 = length(audio lido3);
size audio3 = size(audio lido3);
tempo audio segundos3 = tamanho audio3/taxa lida3;
sound(audio lido3,taxa lida3);
888
%figure(1) %%pontos
%grid on;
%hold on;
trecho1 = audio_lido;
trecho2 = audio_lido2;
trecho3 = audio_lido3;
%plot(trecho1);
%plot(trecho2);
%hold off;
tempo do trecho = length(trecho1)/taxa lida;
tempo do trecho2 = length(trecho2)/taxa lida2;
tempo do trecho3 = length(trecho3)/taxa lida3;
DT = tempo do trecho / (length(trecho1)-1);
DT2 = tempo do trecho2 / (length(trecho2)-1);
DT3 = tempo do trecho3 / (length(trecho3)-1);
tempo = 0:DT:tempo do trecho;
tempo2 = 0:DT2:tempo do trecho2;
tempo3 = 0:DT3:tempo do trecho3;
%% ajustes
Dt = DT;
y = trecho1;
y2 = trecho2;
y3 = trecho3;
%% FFT
Fs = 1/DT+1; % frequencia de referência para
L = length(y); % comprimento do vetor y.
NFFT = 2^nextpow2(L); % potência de 2 mais próxima acima do comprimento do
vetor y.
% L % NFFT % nextpow2(L) % 2^16 % 2^15
Y = fft(y,NFFT)/L ; % transformda rápida de Fourier.
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1); % eixo das frequências.
```

```
Fs2 = 1/DT2+1; % frequencia de referência para
L2 = length(y2); % comprimento do vetor y.
NFFT2 = 2<sup>nextpow2</sup>(L2); % potência de 2 mais próxima acima do comprimento
do vetor y.
% L % NFFT % nextpow2(L) % 2^16 % 2^15
Y2 = fft(y2,NFFT2)/L2 ; % transformda rápida de Fourier.
f2 = Fs2/2*linspace(0,1,NFFT2/2+1); % eixo das frequências.
Fs3 = 1/DT3+1; % frequencia de referência para
L3 = length(y3); % comprimento do vetor y.
NFFT3 = 2<sup>nextpow2</sup>(L3); % potência de 2 mais próxima acima do comprimento
do vetor y.
% L % NFFT % nextpow2(L) % 2^16 % 2^15
Y3 = fft(y3,NFFT3)/L3 ; % transformda rápida de Fourier.
f3 = Fs3/2*linspace(0,1,NFFT3/2+1); % eixo das frequências.
%% gráficos da FFT
figure(2) % figura 2
hold on
plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)),'r','LineWidth',2) ; % gráfico do espectro de
frequencia.
plot(f2,2*abs(Y2(1:NFFT2/2+1)),'b','LineWidth',2) ; % gráfico do espectro
de frequencia.
plot(f3,2*abs(Y3(1:NFFT3/2+1)),'g','LineWidth',2); % gráfico do espectro
de frequencia.
legend(["Equalizado", "-180° membrana superior", "-180° ambas membranas"])
grid on; % grade.
axis([40 80 0 0.0004])
title('Amplitudes de y(t)')
xlabel('Frequencia (Hz)')
ylabel('|Y(f)|')
hold off
%% GRAFICOS FFT Hz / dB
Ymod = 2*abs(Y(1:NFFT/2+1));
Ymin = min(Ymod);
Ymax = max(Ymod);
Ymin;
Lp Ymod = 10 \times \log 10 (Ymod.^2/Ymin^2);
Lp Ymodx = 10*log10(Ymod.^2/Ymax^2);
Ymod2 = 2*abs(Y2(1:NFFT2/2+1));
Ymin2 = min(Ymod2);
Ymax2 = max(Ymod2);
Ymin2;
Lp Ymod2 = 10 \times log10 (Ymod2.^2/Ymin2^2);
Lp Ymodx2 = 10*log10(Ymod2.^{2}/Ymax2^{2});
Ymod3 = 2*abs(Y3(1:NFFT3/2+1));
Ymin3 = min(Ymod3);
Ymax3 = max(Ymod3);
Ymin3;
Lp Ymod3 = 10*log10(Ymod3.^2/Ymin3^2);
Lp Ymodx3 = 10*log10(Ymod3.^{2}/Ymax3^{2});
figure(3) % figura 3 gráfico escala logarítmica
semilogx(f,Lp Ymodx,'r','LineWidth',2) ; hold on;
semilogx(f2,Lp_Ymodx2,'b','LineWidth',2);
```

```
semilogx(f3,Lp_Ymodx3,'g','LineWidth',2);
```

```
legend(["Equalizado", "-180° membrana superior", "-180° ambas membranas"])
axis([72.8 73.2 -0.2 0.2])
grid on; % grade.
%%title('Hx x dB')
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('dB')
[maxymodx, imodx] = max(Lp Ymodx); % valor maximo dentro do vetor
[maxymodx2,imodx2] = max(Lp Ymodx2); % valor maximo dentro do vetor
[maxymodx3, imodx3] = max(Lp Ymodx3); % valor maximo dentro do vetor
semilogx(f(1, imodx), maxymodx,
'or', 'MarkerEdgeColor', 'r', 'MarkerFaceColor', 'r', 'MarkerSize',5, 'LineWidth'
,0.1); hold on;
semilogx(f(1,imodx2),maxymodx2,
'or', 'MarkerEdgeColor', 'b', 'MarkerFaceColor', 'b', 'MarkerSize', 5, 'LineWidth'
,0.1);
semilogx(f(1,imodx3),maxymodx3,
'or', 'MarkerEdgeColor', 'g', 'MarkerFaceColor', 'b', 'MarkerSize', 5, 'LineWidth'
,0.1);
legend(["Equalizado","-180° membrana superior","-180° ambas membranas"])
figure(4) % figura 4 gráfico escala logarítmica 20Hz-20kHx
semilogx(f,Lp Ymodx,'r','LineWidth',2) ; hold on;
semilogx(f2,Lp Ymodx2,'b','LineWidth',2);
semilogx(f3,Lp_Ymodx3,'g','LineWidth',2);
legend(["Equalizado","-180° membrana superior","-180° ambas membranas"])
axis([70 300 -70 0])
grid on; % grade.
%%title('Hx x dB')
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('dB')
[maxymodx,imodx] = max(Lp Ymodx); % valor maximo dentro do vetor
[maxymodx2,imodx2] = max(Lp Ymodx2); % valor maximo dentro do vetor
[maxymodx3,imodx3] = max(Lp Ymodx3); % valor maximo dentro do vetor
semilogx(f(1,imodx),maxymodx,'or','MarkerEdgeColor','r','MarkerFaceColor','
r','MarkerSize',5); hold on;
semilogx(f(1, imodx2), maxymodx2,
'or', 'MarkerEdgeColor', 'b', 'MarkerFaceColor', 'b', 'MarkerSize',5);
semilogx(f(1, imodx3), maxymodx3,
'or', 'MarkerEdgeColor', 'g', 'MarkerFaceColor', 'g', 'MarkerSize',5);
legend(["Equalizado", "-180° membrana superior", "-180° ambas membranas"])
```