

Projeto de Graduação 2

**CARACTERIZAÇÃO METROLÓGICA
DE MICROFONE DE ELETRETO**

Vanderlino C. Barreto Neto

Brasília, Julho de 2015

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

Projeto de Graduação 2

**CARACTERIZAÇÃO METROLÓGICA
DE MICROFONE DE ELETRETO**

Vanderlino C. Barreto Neto

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia
Mecânica como requisito parcial para obtenção
do grau de Graduado*

Banca Examinadora

Prof. Alberto C. G. C. Diniz, ENM/UnB
Orientador

Prof. Mario Olavo Magno de Carvalho

Prof. Antonio Piratelli Filho

RESUMO

Este projeto apresenta a metodologia para caracterização de microfone de eletreto, com a finalidade de utilizá-lo para medição de flutuação de pressão. É apresentado o método de calibração por reciprocidade com comparação. Nesse método, a calibração é realizada utilizando um microfone já calibrado como sensor de referência (padrão).

O estudo das incertezas presentes no processo de calibração foi realizado, sendo elas relacionadas à qualidade da instrumentação utilizada e ao método de calibração. Com esse estudo é possível obter, depois de calibrado, um sensor confiável.

Foi realizado o ensaio de cavidade, que avalia a frequência natural da cavidade, bem como os ruídos externos para decidir se os demais ensaios seriam realizados com a cavidade aberta ou fechada. O ensaio para determinar a função resposta em frequência dos microfones também foi realizado, bem como o ensaio para determinar comportamentos não-lineares locais.

Por fim, foi realizado o ensaio de calibração, para obter a calibração final do microfone. Os resultados obtidos mostraram a eficiência da metodologia usada.

ABSTRACT

This work presents the methodology for characterizing electret microphone, in order to use it to pressure fluctuation measurement. The reciprocity calibration method with comparison is presented. In this method, the calibration is performed using an already calibrated microphone as a reference sensor, in which they will be excited by the same source of pressure fluctuation.

The study of the uncertainty present in the calibration process, related to the quality of the instrumentation and calibration method was conducted. With this study, and after calibration, a sensor with acceptable confidence value can be obtained. In this way, the standardization of the calibration process of the electret microphone in order to use it as a sensor for pressure fluctuation measurement was objectivized.

The cavity essay was performed, in order to evaluate the cavity natural frequency, as well as the external noise, to decide if the remaining essays would be performed with the cavity opened or closed. The frequency response essay was performed, as well as the essay to determine the local non-linearities. As last, de calibration essay was performed in order to obtain the final microphone calibration.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	SOM, PRESSÃO E INSTRUMENTAÇÃO	5
2.1	SOM	5
2.2	PRESSÃO	7
2.3	TRANSDUTORES ELETROACÚSTICOS	10
2.4	MICROFONE	10
2.4.1	MICROFONES PIEZELÉTRICOS	11
2.4.2	MICROFONE DE ELETRETO	13
2.5	CAVIDADE	15
3	CARACTERIZAÇÃO DE INSTRUMENTOS	16
3.1	ESTUDO METROLÓGICO	16
3.1.1	INCERTEZAS DE MEDIÇÃO	18
3.1.2	ANÁLISE DE RUÍDO	20
3.2	CARACTERIZAÇÃO DE MICROFONES	22
4	PROCEDIMENTOS E RESULTADOS	24
4.1	MONTAGEM DA BANCADA	24
4.2	LIMITES EXPERIMENTAIS	24
4.3	PROGRAMA DE PROCESSAMENTO DE DADOS	25
4.4	TESTE PARA CAVIDADE ABERTA E CAVIDADE FECHADA	28
4.5	ENSAIO PARA ANÁLISE DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA	30
4.6	ENSAIO PARA ANÁLISE EM 2000 Hz À 4000 Hz	33
5	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	36
5.1	CONCLUSÃO	36
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	37
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

LISTA DE FIGURAS

1.1	Desenho esquemático de um tubo de Pitot em um escoamento. [Cengel e Cimbala 2015]	1
1.2	Sensor de silício	2
1.3	Eletreto instalados em perfil aerodinâmico.	3
2.1	Deslocamento de uma onda sonora dado a movimentação de membrana.	5
2.2	Ciclo da propagação de um onda.[Nussenzveig 2001]	6
2.3	Representação do vetor normal do elemento, $\Delta\mathbf{S}$, [Halliday e Resnick 2008].	7
2.4	Deslocamento de uma onda para um tempo, $\Delta(t)$	8
2.5	Representação da intensidade sonora.	9
2.6	Transdutor eletromecânico. (F: força, v: velocidade, U: ddp , I: corrente elétrica) [Kuttruff 2007].....	10
2.7	Caracterização de funcionamento: Microfone de pressão, representação estrutural(a), representação elétrica(b); Microfone de gradiente de pressão, representação estrutural(c), Representação elétrica(d). [Eargle 2004]	11
2.8	Viga piezoelétrica, esquema.	12
2.9	Vista em corte de um microfone com membrana de diafragma.	12
2.10	Microfone piezoelétrico: Viga piezoelétrica(a); Vista em corte do microfone piezoelétrico(b). [Eargle 2004].....	13
2.11	Eletreto em um capacitor de placa plana.....	13
2.12	Desenho de esquema do circuito de alimentação	14
2.13	Microfone de eletreto, \varnothing 6 mm.	14
2.14	Estrutura do microfone de eletreto.....	14
2.15	Cavidade toda desmontada(a); Cavidade montada(b)	15
3.1	Sinais em função do tempo: a) sinal puro; b) sinal com ruído	21
3.2	Método da reciprocidade. Fonte sonora à esquerda, microfone \mathbf{M} (descalibrado) e microfone \mathbf{A} (calibrado) à direita	23
4.1	Diagrama da montagens da bancada experimental	25
4.2	Fluxograma do algoritmo para processamento de dados	27
4.3	FFTs dos sinal nas frequências de: 100 Hz(a); 500 Hz(b); 1000 HZ(c); 2000 Hz(d); 3000 Hz(e); 4000 Hz(f)	29
4.4	Diferença entre o valor da intensidade para cavidade aberta pela intensidade para cavidade fechada	30

4.5	Curva da resposta em frequência dos microfones	32
4.6	Incerteza de medição para os valores medidos	32
4.7	Diferença entre microfone de referência pela microfone de eletreto(Erro Sistemático).	33
4.8	Curva da resposta em frequência dos microfones	34
4.9	Diferença entre microfone de referência pela microfone de eletreto(Erro Sistemático).	34

LISTA DE TABELAS

3.1	Tabela com as Distribuições de Probabilidade	19
3.2	Grandezas da Avaliação de incerteza Tipo B	20
4.1	Especificação técnica do alto-falante.....	25
4.2	Especificação técnica do microfone.....	26
4.3	Incertezas do microfone B & K	31
4.4	Incertezas do microfone eletreto	31
4.5	Incertezas Expandida, U , do microfone de referência e de eletreto	31

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

Hz	Hertz	
F	Força	[N]
S	Elemento de área	[m]
P	Pressão	[Pa]
t	Tempo	[s]
v	Velocidade	[m/s]
I_{NIS}	Intensidade de nível de pressão sonora	
U	ddp	
I_o	Intensidade sonora de referência	
dB	Decibel	
L	Comprimento da seção de propagação do som	
n	Número harmônico	
I_{TBi}	Varição de incerteza padrão Tipo B	
I_{TA}	Varição de incerteza padrão Tipo A	
I_{CB}	Incerteza combinada	
I_{ex}	Incerteza expandida	
k	Fator de abrangência	
V_{eff}	Grau de Liberdade	
P_{som}	Função da pressão sonora	
FFT	Transformada rápida de Fourier	
V	Tensão	

Símbolos Gregos

ρ	Densidade	[m ³ /kg]
λ	Comprimento de onda	
σ_A	Sensibilidade do microfone de referência	

Subscritos

<i>ex</i>	expandida
<i>NIS</i>	Intensidade de nível de pressão sonora

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Um escoamento sobre uma superfície provoca zonas de gradiente de pressão adverso de baixa intensidade. Essa flutuação de pressão produz esforços alternados sobre a estrutura que a suporta, podendo causar uma falha por fadiga, danificando a estrutura ou produzindo fissuras na superfície, mesmo sendo de baixa intensidade.

A flutuação de pressão em pás de turbina, pode produzir uma vibração nestas, causando deslocamentos em direções não desejadas. Esses deslocamentos podem danificar o rotor da turbina, causar perda de carga na hélice ou aumentar o arrasto nas pás, diminuindo a eficiência das pás.

Para monitorar esses esforços ou vibrações, com a finalidade de evitar a ocorrência de danos ou para reverter a diminuição da eficiência, utiliza-se de sensores para medição da flutuação de pressão, possibilitando ações corretiva.

Atualmente existem sensores que são capazes de realizar a medição da flutuação de pressão, com a finalidade de identificar as ocorrências citadas, porém com algumas restrições de funcionamento. O tubo de Pitot e o sensor de pressão de silício são os sensores mais comuns na medição da flutuação de pressão.

O tubo de Pitot, Fig.1.1, mede a pressão estática e a pressão de estagnação de um escoamento, sabendo que a pressão estática é a exercida pelo fluido considerando-se que o mesmo está em repouso e a pressão de estagnação é a pressão total exercida pelo escoamento do fluido.

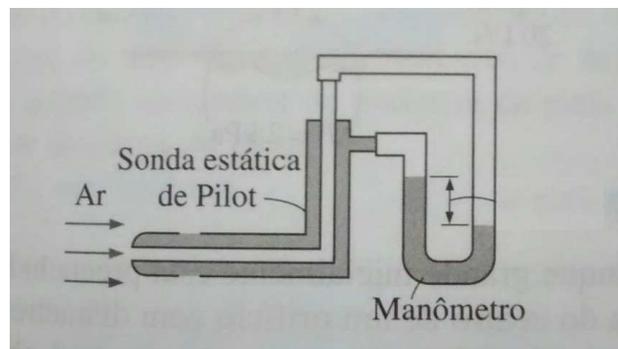


Figura 1.1: Desenho esquemático de um tubo de Pitot em um escoamento. [Cengel e Cimbala 2015]

Utilizando-se da definição de pressão do escoamento da mecânica dos fluidos e levando-se em conta a forma construtiva do sensor, é possível determinar a pressão dinâmica a partir da pressão de estagnação e da pressão estática medidas pelo sensor, como representado na equação 1.1. Onde a variação da pressão dinâmica, em função do tempo, descreve a flutuação de pressão provocada por um escoamento.

$$P_{stg} = P_{dim} + P_{est} \rightarrow P_{dim} = P_{stg} - P_{est} \quad (1.1)$$

onde:

- P_{dim} : pressão dinâmica;
- P_{stg} : pressão de estagnação;
- P_{est} : pressão estática.

Utilizando-se de vários tubos é possível realizar medições simultâneas, medindo-se a flutuação de pressão provocada por um escoamento, sobre toda a superfície de um corpo. No caso de um ensaio, onde a análise deve ser realizada simultaneamente em posições distintas, porém próximas, é difícil utilizar de tubos de Pitot para a medição. Como é necessário um tubo para cada ponto de medição, é possível que o espaço requerido para a instalação de todos os tubos não seja suficiente. Assim, tem-se que realizar o ensaio em partes ou com dificuldade para o manuseio dos equipamentos.

O sensor de silício, figura 1.2, pode ser utilizado para mensurar uma flutuação de pressão, devido a sua característica piezorresistiva. Materiais piezorresistivos são aqueles que ao sofrerem esforços mecânicos mudam sua resistência interna, comportamento presente em alguns materiais semicondutores [Patsko 2006].



Figura 1.2: Sensor de silício

Inicialmente, peças de silício foram utilizadas como material transdutor para sensores de pressão, somente para medições de pressão estática, [Patsko 2006]. Com o desenvolvimento do silício, como material transdutor, as suas características estruturais foram melhoradas e começou-se a utilizá-lo na medição de flutuação de pressão [Hurault, Kouidri e Bakir 2012] .

O sensor de silício, contudo, tem uma limitação quando utilizado para medir uma flutuação de pressão com um pequeno gradiente. Pode ocorrer que a variação de pressão não seja correspondente a sensibilidade do sensor. Outra restrição na utilização do sensor de silício, é na utilização para medição quando a frequência da flutuação de pressão é baixa, [Hurault, Kouidri e Bakir 2012]. O silício, em razão da sua característica elétrica, possui um tempo de resposta baixo, não sendo adequado para medir lentas flutuações de pressão.

Mesmo sendo sensores conhecidos e confiáveis, o tubo de Pitot e o sensor de silício têm características que dificultam a realização de algumas formas de medição. Partindo das restrições de uso dos sensores descritas acima, propõe-se neste trabalho a utilização do microfone de eletreto para a medição da flutuação de pressão.

A escolha do microfone de eletreto é dada pelo fato deste sensor ter baixa sensibilidade, identificando pequenos gradientes de flutuações de pressão. Adicionalmente, por ser um microfone, seu tempo de resposta é adequado para medições de flutuações de baixa frequência e requer pouco espaço para sua instalação e para manutenção.

A figura 1.3 apresenta uma situação, onde foram instalados 6 microfones na parte inferior e parte superior do perfil aerodinâmico, totalizando 12 microfones instalados.



Figura 1.3: Eletreto instalados em perfil aerodinâmico.

Porém, para o microfone de eletreto ser utilizado para mensurar flutuação de pressão, o mesmo deve ser calibrado. Com isso, propõe-se aqui um método consistente para a calibração de microfones de eletreto, especificando-se as condições para sua utilização, de modo que este trabalhe nas condições de maior exatidão.

Este relatório inicia-se com o estudo sobre o som, a pressão e os fundamentos físicos que regem a medição destes, buscando-se utilizar uma base teórica consistente. Apresenta-se, em seguida, um

estudo da instrumentação, a descrição do processo de caracterização juntamente com o estudo de incerteza, necessários para realizar a calibração do microfone.

O relatório apresenta os resultados dos ensaios, sendo composto pelas informações da caracterização do microfone de eletreto, adequada para que seja possível utilizá-lo como sensor para medição de flutuação de pressão.

Uma conclusão apresenta evidências de que o microfone de eletreto tem um comportamento similar ao microfone de referência utilizado para calibração.

Capítulo 2

SOM, PRESSÃO E INSTRUMENTAÇÃO

Neste capítulo são apresentadas os conceitos de som, pressão e onda, necessários para o desenvolvimento do projeto, utilizando como referências [Nussenzweig 2001], [Fahy 2008] e [Milhomem 2008]. Também são descritas as definições de transdutor e sensores acústicos e as características de funcionamento desses sensores, seguindo as referências [Eargle 2004] e [Kuttruff 2007].

2.1 Som

O som é uma onda mecânica longitudinal que depende de um meio elástico, que pode estar no estado gasoso, líquido ou sólido, para se propagar. Como exemplo consideramos a movimentação de uma membrana de alto-falante, esquematizado na figura 2.1, onde esta tomando-se como referência, é linha de maior espessura e as ondas sonoras as linhas mais finas.

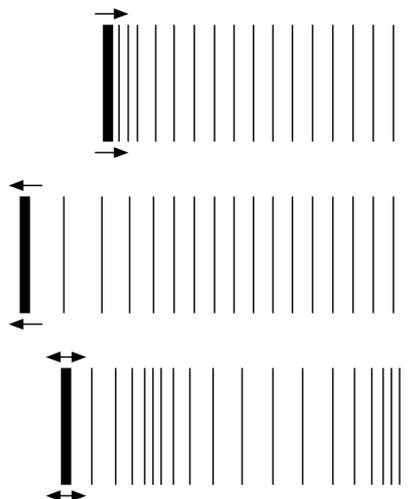


Figura 2.1: Deslocamento de uma onda sonora dado a movimentação de membrana.

Quando ocorre a movimentação da membrana para a direita, como mostrado na parte superior da figura 2.1, parte do ar será deslocado para a direita, pressionando secções de ar próximas.

Quando a membrana estiver movimentando-se no sentido contrário, o corpo produz uma pressão inferior à do ar próximo, fazendo a expansão das secções de ar mais próximas, como mostrado na parte central da mesma figura.

Quando essa movimentação ocorre de maneira repetitiva, ou seja, a membrana desloca-se para direita e para esquerda de forma cíclica, ocorrem secções de compressão e expansão alternadas, como representado na parte inferior da figura 2.1. O resultado dessa oscilação é um som ou onda sonora.

Assim, define-se que a onda sonora pode ser produzida a partir de uma perturbação de pressão ou um deslocamento de uma secção, de uma determinada região de uma meio elástico.

O som promove o deslocamento das partículas do ar que em seguida causam uma mudança na densidade desse meio, produzindo uma variação de pressão e que por sua vez, produz novamente um deslocamento nas partículas de ar da sua vizinhança. Assim, tem-se a propagação do som, como representada na figura 2.2.

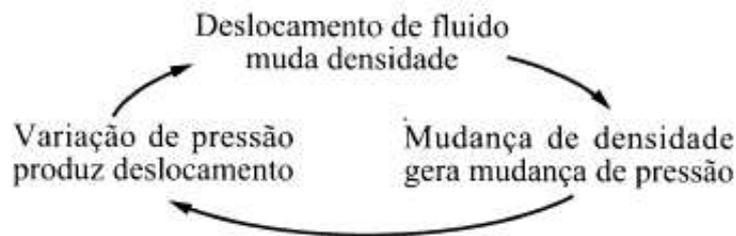


Figura 2.2: Ciclo da propagação de um onda.[Nussenzveig 2001]

A propagação do som é o deslocamento de uma frente de onda, de forma difusiva. Neste projeto, é estudada a variação de pressão que ocorre devido a propagação do som, dando possibilidade de mensurá-la.

As características importantes das ondas sonoras para este projeto de graduação são: a intensidade da onda e as frequências do som. As frequências de uma onda sonora são divididas em 3 bandas de frequência.

A banda que define as frequências sonoras audíveis pelo homem, é compreendida, aproximadamente, entre as frequências de 16 Hz e 20000 Hz, onde a sigla Hz refere-se a unidade de medida hertz, em homenagem ao físico Heinrich Hertz. O hertz define o número de ciclos por segundo.

A banda para as frequências com valor inferior à audível é denominado de banda de frequências infra-sônicas e quando as frequências são superiores a 20000 Hz, essa é a banda das frequências ultra-sônicas. Quando a frequência sonora extrapola 1 GHz, ou 10^9 Hz, usa-se a denominação de banda de frequências hiper-sônicas.

2.2 Pressão

Quando movimenta-se um corpo imerso em um fluido, há uma pressão atuante sobre o corpo, devido as características de interação fluido-estrutura, promovendo um esforço sobre a superfície. A força resultante do somatório desses esforços, na parte inferior e superior da superfície do corpo, é denominado de empuxo dinâmico. Onde o empuxo estático ocorre apenas pela diferença de densidade do corpo e do fluido.

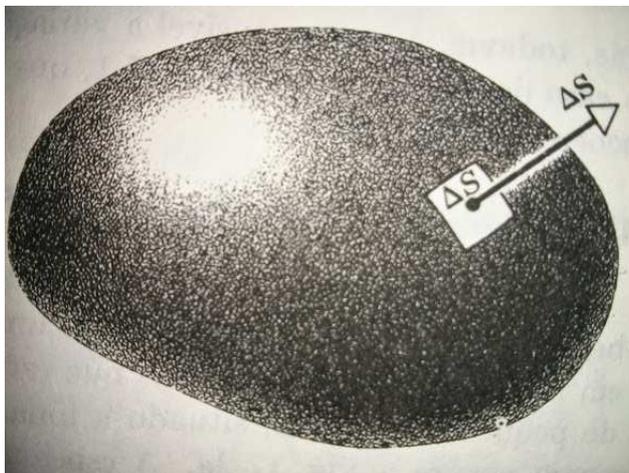


Figura 2.3: Representação do vetor normal do elemento, $\Delta\mathbf{S}$, [Halliday e Resnick 2008].

Uma das formas de calcular a pressão sobre a superfície do corpo é utilizando a Equação 2.1, porém, o vetor \mathbf{F} e o vetor normal ao elemento de área $\Delta\mathbf{S}$, devem estar na mesma direção.

$$P = \frac{\Delta\mathbf{F}}{\Delta\mathbf{S}} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (2.1)$$

A pressão resultante da movimentação do corpo em um fluido, é ligada a velocidade deste deslocamento e a massa específica do fluido. Caso a velocidade se mantenha constante ou não ocorra variação das propriedades físicas do fluido ou algum efeito de turbulência, a pressão sobre a superfície se manterá constante. Porém, caso haja variação na velocidade ou ocorra alguma mudança no escoamento, a pressão não se manterá mais constante.

Assegurando que o elemento de superfície se mantenha constante, no momento que houver a variação da pressão, em um tempo, t , na direção x , existirá uma variação nos esforços sobre a superfície. Reescrevendo a equação 2.1 em função da variação da força, tem-se.

$$\Delta\mathbf{F} = \Delta\mathbf{P}(\mathbf{x},t)S = (\mathbf{P}(x + \Delta x, t) - \mathbf{P}(x, t))S \quad (2.2)$$

Fazendo uma manipulação algébrica na equação acima, com finalidade de avaliar a variação de pressão para intervalo Δx , é obtido a representação da variação da força, $\Delta\mathbf{F}$, em função do diferencial da pressão, $\delta p/\delta x$ e da variação da velocidade de propagação, $\Delta\mathbf{V}$.

$$\Delta \mathbf{F} = A \Delta x \left(\underbrace{\frac{(p(x + \Delta x, t) - p(x, t))}{\Delta x}}_{\frac{\delta p}{\delta x}} \right) = \Delta V \frac{\delta p}{\delta x} \quad (2.3)$$

A força exercida pelo som se propaga por conta da onda de pressão, tendo a mesma frequência característica da onda sonora que a origina e se deslocando com a velocidade da onda de pressão, Fig.2.4 .

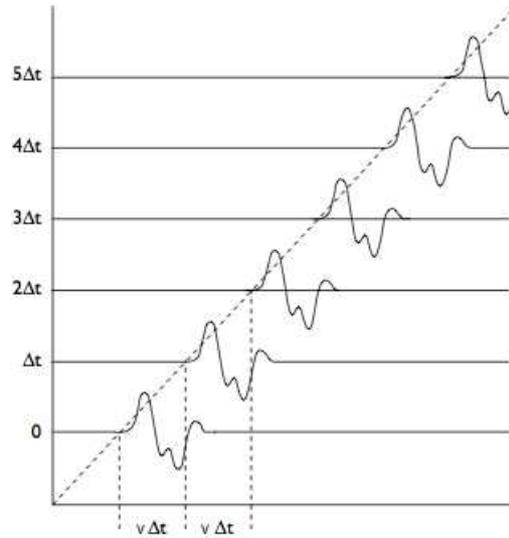


Figura 2.4: Deslocamento de uma onda para um tempo, $\Delta(t)$.

A quantidade de energia sonora, que desloca um volume de material, por conta da variação de pressão é mensurável e representa a intensidade sonora, sendo exemplificado na Figura 2.2. A intensidade sonora é conhecida como volume do som, quanto maior for o volume, maior será a energia que uma onda consegue deslocar.

Matematicamente, a intensidade sonora, \vec{i} , é um vetor que desloca -se no sentido da propagação do som. Sua magnitude está relacionada a variação de pressão e a velocidade em que ocorre essa variação, pois, a força que desloca o volume de material é proporcional à secção de área, dS , e à pressão, P .

$$\vec{i} = P\vec{v} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.4)$$

Para calcular o nível da intensidade sonora, I_{NIS} , é adotado como intensidade sonora de referência, I_0 , o limiar de audibilidade, $I_0 = 10^{-12} W/m^2$. Dessa forma, o nível de intensidade sonora, I_{NIS} , é calculado pela seguinte equação.

$$I_{NIS} = 10 \log \left(\frac{i}{I_0} \right) [dB] \quad (2.5)$$

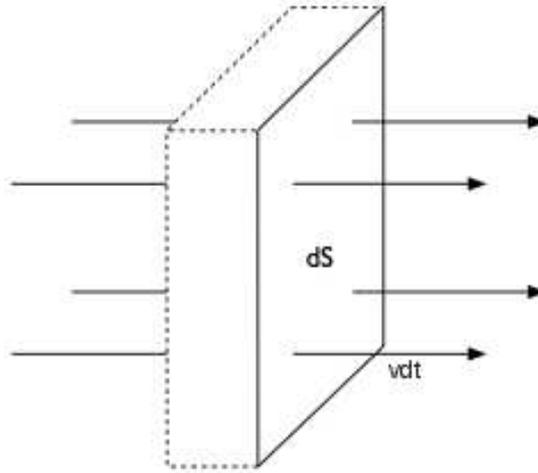


Figura 2.5: Representação da intensidade sonora.

A unidade de medida utilizada na medição do nível de intensidade sonora é o *bel*, recebendo esse nome em homenagem ao cientista Alexander Graham Bell, o qual, fez grandes acréscimos no estudo da acústica e no desenvolvimento de transdutores nesta mesma área. O usual é utilizar o termo decibel e a sigla utilizada é o dB. Um decibel representa um decimo de bel, ou 0,1 bel. Assim, com base na equação 2.7, um nível de intensidade de 20 dB representa uma variação de pressão medida 10 vezes maior que o limite mínimo audível.

A intensidade é proporcional ao quadrado da média da variação de pressão, obtém-se a igualdade abaixo.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{P_1^2}{P_2^2} \quad (2.6)$$

Outro modo de avaliar o som é a partir do nível de pressão sonora. A medição é a relação entre a variação de pressão atuante com um nível de variação mínimo. Os níveis de variação pressão ou pressão sonora são escolhidos a partir dos limites de percepção do ouvido.

A menor pressão sonora perceptível por um ser-humano é próxima de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, e o limite auditivo máximo é na ordem de $20Pa$, sendo esse último chamando de limite de dor. Para mensurar o nível de intensidade sonora, usa-se como referência o limite mínimo da audição humana, $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa, com isso, dado que a referência é a sensibilidade da audição humana, que compreendendo seis ordens da magnitude de pressão, é empregado uma relação logarítmica na medição do nível de intensidade sonora. Partindo da equação 2.5 e utilizando a relação 2.6, é possível representar o nível de pressão sonora, I_{NPS} .

$$I_{NIS} = 10 \log \left(\frac{i}{I_0} \right) \quad [dB]$$

$$I_{NPS} = 10 \log \left(\frac{P^2}{P_0^2} \right) = 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad [dB] \quad (2.7)$$

2.3 Transdutores eletroacústicos

Os transdutores são materiais que ao sofrerem algum tipo de excitação, produzem uma resposta elétrica, ou seja, são dispositivos capazes de transformar um sinal em outro. Onde o sinal de saída, posteriormente, é processado, transmitido ou armazenado.

O estudo de sinais acústicos ou o processamento de ondas sonoras, para transmiti-las ou gravá-las de maneira eficiente, foi possível quando descoberto os primeiros materiais que tinham a capacidade de converter esforços mecânicos em em respostas elétricas utilizáveis. Materiais com essa característica são denominado de transdutores eletromecânicos, no contexto da acústica, esses materiais são chamado de transdutores eletroacústicos.

A relação de conversão para transdutores eletroacústicos relaciona, de maneira análoga, uma força de excitação com a diferença de potencial na saída e uma velocidade ou aceleração com a corrente elétrica gerada.

Exemplificado na Figura 2.6

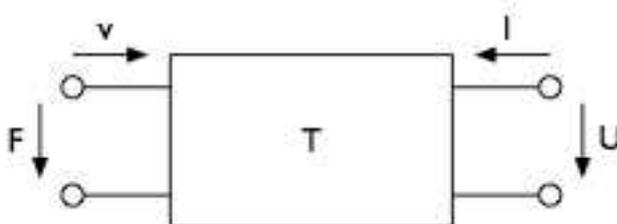


Figura 2.6: Transdutor eletromecânico. (F: força, v: velocidade, U: ddp , I: corrente elétrica) [Kuttruff 2007]

2.4 Microfone

Microfones são sensores eletroacústicos com a capacidade de converter vibrações acústicas ou mecânicas em sinais elétricos. De uma forma mais prática, quando o som atinge a membrana flexível do sensor, ele produz uma força (causada pela diferença da pressão do ar que define o próprio som) que faz a membrana flexível vibrar, gerando sinais elétricos. Esses instrumentos são compostos por um sistema mecânico para captar forças alternadas incidentes, sendo diferentes para cada tipo de transdutor. A partir de um circuito elétrico ou características eletrostáticas do transdutor, é produzida uma tensão ou corrente elétrica análoga à excitação incidentes.

Inicialmente, o microfone foi inventado com a finalidade de captar ondas sonoras. Depois, dado a sua utilidade, o microfone foi utilizado em outras invenções, como pro exemplo, o fonógrafo e o telefone, dos inventados por Thomas Edison e Alexander Graham Bell respectivamente. O funcionamento desses equipamentos foi possível, pois utilizavam de um microfone que tinha a capacidade de gerar pulsos elétricos análogos à onda sonora incidente. Esse pulso elétrico era

gravado ou transmitido para outro equipamento que o reproduziria.

Os microfones são caracterizados por dois modos de funcionamento, o microfone de pressão e os microfones de gradiente de pressão, Fig 2.7.

No microfone de pressão, a membrana desloca-se com a variação da pressão de uma onda sonora, sem a necessidade que uma única frente de onda produza um gradiente de pressão. Com o deslocamento promovido pela onda sonora, o material transdutor do microfone é utilizado para produzir um único polo, que varia conforme for o deslocamento da membrana. O polo elétrico produzido é utilizado para produzir o sinal elétrico de saída.

Por sua vez, no microfone de gradiente de pressão, a membrana é projetada de forma a movimentar-se, somente, quando a onda sonora incidente produzir um gradiente de pressão no material transdutor. Assim, a onda incidente produz um esforço alternado no transdutor que produz dois polos. A partir desse bipolo, é produzido um sinal elétrico sem a necessidade de baterias ou ímãs para o seu funcionamento.

Neste projeto de graduação, optou-se por utilizar o microfone de pressão, em especial, o microfone piezoelétrico e o microfone de eletreto, que são descritos nas seções seguintes.

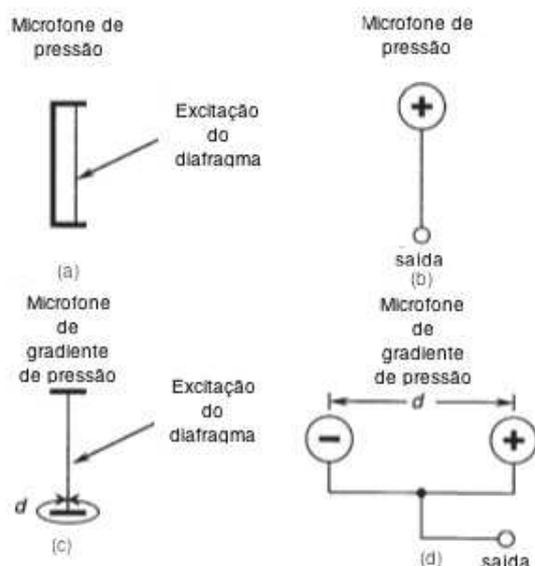


Figura 2.7: Caracterização de funcionamento: Microfone de pressão, representação estrutural(a), representação elétrica(b); Microfone de gradiente de pressão, representação estrutural(c), Representação elétrica(d). [Eargle 2004]

2.4.1 Microfones Piezoelétricos

Os materiais inteligentes recebem essa denominação por conta da capacidade de interagir de maneira similar dois domínios físicos, sem a necessidade de algum equipamento externo, como baterias ou ímãs. Quando o material trabalha nos domínios térmico e mecânico é denominado

termomecânico, nos domínios térmico e elétrico, termoelétrico, e nos domínios elétrico e mecânico é denominado eletromecânico.

Materiais eletromecânicos são comumente utilizados em relógios, acelerômetros e microfones. O piezoelétrico ou transdutor piezoelétrico é um tipo de material inteligente eletromecânico.

Esse material pode trabalhar de duas maneiras. A primeira, com uma diferença de potencial no seu corpo, o material expande ou contrai, dependendo do sentido da corrente elétrica, vibrando caso seja uma fonte alternada, sendo chamado de efeito inverso. Já a segunda, chamada efeito direto, o material gera uma corrente elétrica quando submetido a uma deformação mecânica, no qual a resposta elétrica é análoga a excitação.

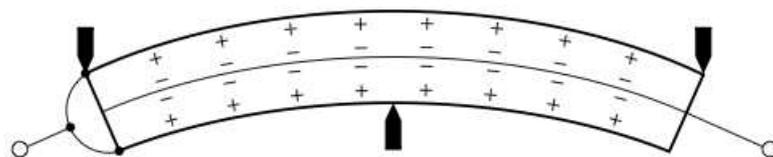


Figura 2.8: Viga piezoelétrica, esquema.

Quando o microfone usa de transdutor piezoelétrico, utilizando da característica capacitiva do material, o microfone é classificado como de condensação. E quando se utiliza a característica piezoelétrica, em que o material transdutor é deformado mecanicamente, denomina-se microfone piezoelétrico.

Estruturalmente, existem duas opções para microfones piezoelétricos, ou a viga piezoelétrica é fixada junto ao diafragma ou o próprio diafragma é de material piezoelétrico. A última é pouco utilizada, já que existem poucas opções de membranas de captação com material piezoelétrico, pois, cerâmicas piezoelétricas têm baixa tenacidade, sofrendo fissuras facilmente caso o som provoque um grande deslocamento na membrana, o que diminui a vida útil do equipamento.

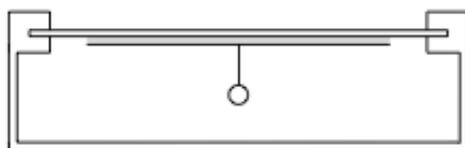


Figura 2.9: Vista em corte de um microfone com membrana de diafragma.

O funcionamento do microfone piezoelétrico ocorre quando a onda sonora incide na membrana, deslocando-a e exercendo um esforço no transdutor, que está em contato com a membrana. Esse esforço é convertido em uma corrente elétrica, pelo material piezoelétrico. Esse sinal elétrico será transmitido e posteriormente tratado, para depois ser utilizado.

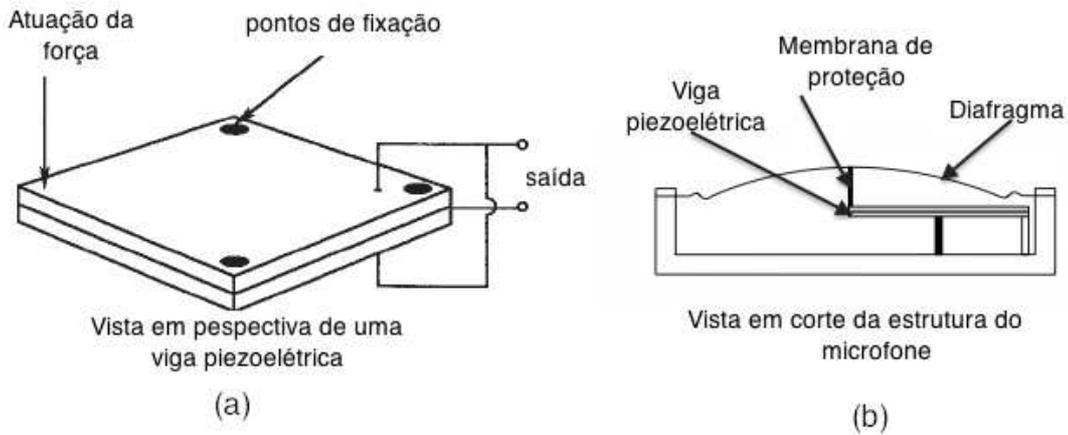


Figura 2.10: Microfone piezoelétrico: Viga piezoelétrica(a); Vista em corte do microfone piezoelétrico(b). [Eargle 2004]

2.4.2 Microfone de Eletreto

Os polímeros são materiais que acrescentaram muito no desenvolvimento de equipamentos e sensores, um desses foi o politetrafluoretileno, popularmente conhecido como teflon. Esse polímero tem a capacidade de ser carregado eletrostaticamente, apresentando grande resistência a perda de carga e gerando um campo magnético resistente. O politetrafluoretileno estando carregado eletrostaticamente e eletrizado fortemente é chamado de eletreto.

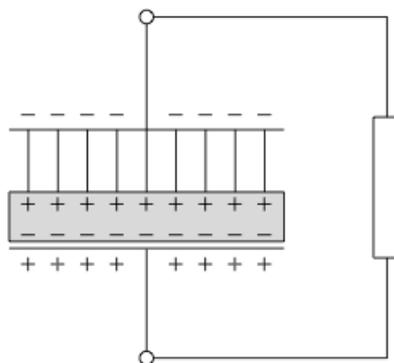


Figura 2.11: Eletreto em um capacitor de placa plana.

Dado a sensibilidade a ações externas, o eletreto é utilizado como material transdutor. Contudo, para que o eletreto possa servi de transdutor de um microfone, é necessário que o mesmo seja alimentado juntamente a um circuito protetor, pois, a corrente induzida produzida pelo eletreto é de baixa intensidade.

Mesmo necessitando de um circuito externo de alimentação, o eletreto pode ser fabricado em diversos tamanhos, podendo ter tamanhos bem reduzidos, variando de 4,5 mm a 10 mm de

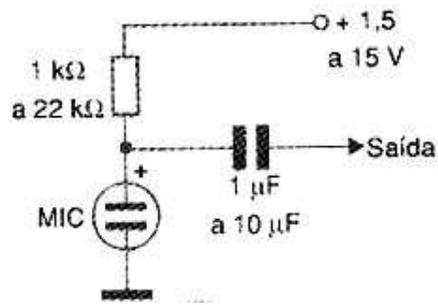


Figura 2.12: Desenho de esquema do circuito de alimentação

diâmetro. O que auxilia na montagem em superfícies estreitas, Fig 1.3. O equipamento utilizado neste projeto de graduação tem tamanho reduzido, possuindo 6 mm de diâmetro, Fig 2.13.

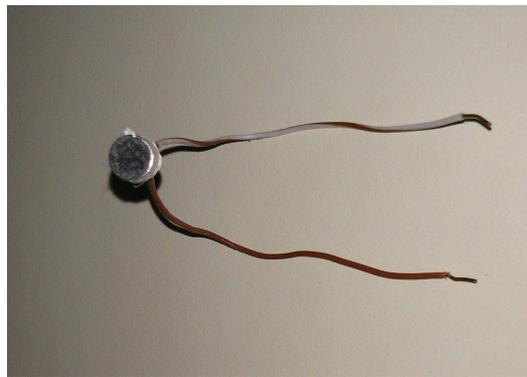


Figura 2.13: Microfone de eletreto, \varnothing 6 mm.

O funcionamento de um microfone de eletreto é simples, o diafragma, carregado eletricamente e posicionado perto do eletreto, ao se movimentar, devido a ação de uma onda sonora, gera no conjunto um campo elétrico induzido. Como o eletreto tem grande resistência eletrostática, a membrana muda de carga, conforme sua movimentação, produzindo uma corrente induzida. O formato dessa corrente gerada é análoga a excitação incidente. A figura 2.14, faz um representação simplificada da estrutura de um microfone de eletreto.

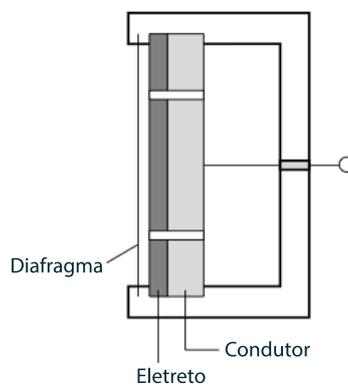


Figura 2.14: Estrutura do microfone de eletreto

2.5 Cavity

Os experimentos que estudam ou mensuram fenômenos físicos, são susceptíveis a presença de ruídos externos, provavelmente sendo produzidos pela propagação da vibração de algum suporte, pelo som produzido por equipamentos próximos e por pessoas presentes no laboratório. Para diminuir os ruídos, são adotados alguns cuidados para conseguir medições mais limpas e precisas, como o isolamento acústico do laboratório ou utilização de tubos e de cavidades que possibilitem o isolamento, diminuindo a incidência de interferências na medição.

Neste projeto de graduação, para a diminuição de possíveis ruídos, foi utilizado uma cavidade, dado a dificuldade de se isolar acusticamente o laboratório e a presença de som produzido pelo ar-condicionado e pelo estabilizador da rede elétrica do laboratório. À cavidade instalada para diminuição dos ruídos foi dada outra função: a de garantir o posicionamento dos equipamentos em todos os ensaios.



(a)



(b)

Figura 2.15: Cavity toda desmontada(a); Cavity montada(b)

Capítulo 3

CARACTERIZAÇÃO DE INSTRUMENTOS

Neste capítulo são abordados os conhecimentos metrológicos utilizados nos ensaios, na realização das medições, do cálculo da incerteza de medição e no processo de calibração, seguindo a terminologia técnica do Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia, VIM, [INMETRO 2012] e o Guia para cálculo de Incerteza, conhecido como ISO-GUM [INMETRO 2008].

Os ensaios são realizados com a finalidade de comparar a resposta em frequência do microfone Brüell&Kjaer com o microfone de eletreto. Analisando a curva da resposta em frequência do microfone de eletreto, é possível determinar os intervalos da frequência que o microfone pode ser usado sem prejudicar o processo de medição.

Conhecidos esses intervalos, é possível determinar as faixas de flutuação de pressão mensuráveis para as respectivas faixas de frequência.

3.1 Estudo Metrológico

Apresenta-se aqui o método utilizado para o processo de calibração e as correções necessárias para o uso do microfone de eletreto.

Inicialmente, é relevante apresentar alguns conceitos utilizados, definidos pelo Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia [INMETRO 2012].

- Mensurando: grandeza específica submetida a medição;
- Medição: Processo de obtenção experimental de um ou mais valores que podem ser, razoavelmente, atribuídos a uma grandeza.;
- Exatidão: Grau de concordância entre o resultado da medição e o valor verdadeiro convencional da grandeza medida;

- Incerteza de medição: Estimativa caracterizando a faixa dos valores dentro da qual se encontra o valor verdadeiro da grandeza medida. A incerteza da medição compreende, em geral, muitos componentes. Alguns destes componentes podem ser estimados com base na distribuição estatística dos resultados das séries de medições, e caracterizados por um desvio padrão experimental. A estimativa dos outros componentes somente pode ser avaliada com base na experiência ou em outras informações;
- Valor verdadeiro: Valor que caracteriza uma grandeza perfeitamente definida nas condições existentes quando ela é considerada. O valor verdadeiro de uma grandeza é um conceito ideal e, em geral, não pode ser conhecido exatamente. Na verdade, efeitos quânticos podem excluir a existência de um único valor verdadeiro;
- Valor convencional: Valor de uma grandeza que, para um determinado objetivo, pode substituir o valor verdadeiro. Um valor verdadeiro convencional é, em geral, considerado como suficientemente próximo do valor verdadeiro para que a diferença seja insignificante para o determinado objetivo;
- Processo de calibração: Conjunto de operações que estabelece, em condições específicas, a correspondência entre o estímulo e a resposta de um instrumento de medir, sistema de medição ou transdutor de medição. O resultado de uma calibração pode permitir a determinação de um ou mais parâmetros da curva característica que relaciona o estímulo à resposta ou os valores de grandezas correspondentes às divisões de escalas indefinidas de um instrumento de medir;
- Processo de medição: Todas as informações, equipamentos e operações relativas a uma dada medição. Este conceito abrange todos os aspectos relativos à execução e à qualidade da medição. Inclui, por exemplo, princípio, método, procedimento, valores das grandezas de influência e padrões;
- Erro sistemático: Componente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível.
- Erro aleatório: Componente do erro da medição que varia de uma forma imprevisível, quando se efetuam várias medições da mesma grandeza;
- Repetitividade: Grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de uma mesma grandeza, efetuadas com a totalidade das seguintes condições: mesmo método de medição; mesmo observador; mesmo instrumento de medir; mesmo local; mesmas condições de utilização; e repetição em curto período de tempo.

No processo de calibração é avaliada a repetitividade dos resultados de medição, de forma a preservar a concordância dos resultados e a compensar os possíveis erros aleatórios. A repetitividade dos resultados é garantida se as condições das medições são mantidas. Tais condições envolvem o procedimento adotado, o tempo entre as medições, o local, entre outros.

No caso deste trabalho, o valor da medição de uma flutuação de pressão é um valor aproximado do valor real. Para que essa medição contemple resultados mais próximos ao valor verdadeiro do mensurando, o resultado é seguido do valor de incerteza. A metodologia para quantificação da incerteza de medição é detalhado a seguir.

3.1.1 Incertezas de medição

A incerteza de medição é um atributo quantificável das dúvidas sobre a exatidão dos procedimentos e dos resultados obtidos, sendo necessária a avaliação da representatividade dessa dúvida em relação ao valor da grandeza medida. São avaliadas, ainda, a influência das aproximações e suposições incorporadas à metodologia, no resultado de uma medição, Além das variações nas observações repetidas da grandeza sob condições aparentemente idênticas.

O uso da metodologia do Guia para Expressão da Incerteza de Medição [INMETRO 2008] como orientação para o cálculo da incerteza, envolve as etapas: discretização das equações de medição, escolha dos parâmetros para avaliação de incerteza, cálculo das avaliações de incerteza e incerteza combinada e o cálculo da incerteza expandida.

Inicia-se afirmando que o valor final da medição (Variável de saída), Y , é calculada em função das medições (Variáveis de entrada), x_i .

$$Y = f(x_1 + x_2 + \dots x_n) \quad (3.1)$$

A incerteza-padrão avalia a dispersão dos valores a partir da série de resultados obtidos nas medições, atendendo as condições da repetitividade. De forma numérica, a incerteza-padrão é representada pelo desvio padrão das medições, x_i , sendo calculada a partir da fórmula:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots x_n}{n} \quad (3.2)$$

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3.3)$$

Existem duas formas de avaliação de incerteza: a avaliação Tipo A e a avaliação Tipo B. O propósito da classificação é indicar as formas como os componentes da incerteza são determinados. Ambos são baseados em distribuições de probabilidade, com os componentes de incerteza resultantes quantificados por variâncias ou desvios padrão.

A avaliação Tipo A é o método que determina o nível de incerteza utilizando uma abordagem estatística, dado os efeitos randômicos nas medições. Ela indica a distribuição dos resultados. A avaliação Tipo A é representada pelo desvio padrão da média:

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}}$$

$$u(x) = s(\bar{x}) \quad (3.4)$$

A avaliação do Tipo B é determinada usando as informações disponíveis dos equipamentos utilizados nos ensaios: o erro instrumental, resolução, especificações do fabricante e classe do equipamento.

O cálculo é realizado utilizando-se as características metrológicas do equipamento, a_i , e a distribuição de probabilidade, q , que melhor se aplique, conforme a fórmula apresentada:

$$u(x) = \frac{a_i}{\sqrt{q}} \quad (3.5)$$

Tabela 3.1: Tabela com as Distribuições de Probabilidade

Distribuição de Probabilidade	Valor Associada(1/q)
triangular	1/6
quadrada	1/4
retangular	1/3

A avaliação do tipo B é calculada a partir das grandezas referentes a resolução do equipamento de aquisição, ao intervalo de aquisição, a incerteza de calibração do microfone de referência e o passo da frequência no processamento de dados. A incerteza de calibração do microfone de referência somente foi utilizada no cálculo da avaliação Tipo B do microfone de referência.

A incerteza referente a resolução é determinada pelo programa de aquisição, sendo fornecido pelo programa de aquisição. A incerteza do intervalo de aquisição é determinada em função da precisão do equipamento de aquisição e o número de amostras requerida.

A incerteza do passo da frequência é determinada a partir do valor do passo de frequência calculado no processamento de dados, ao realizar a Transformada Rápida de Fourier dos sinais.

A tabela 3.2 apresenta as grandezas utilizadas para determinar a avaliação Tipo B, juntamente com as respectivas distribuições de probabilidade.

A relação de todas as incertezas resulta na incerteza combinada, assim, representando a influência dos erros ou falta de exatidão na grandeza final dos resultados medidos. Representando de forma algébrica, a incerteza combinada é calculada a partir da variável de saída, Y , utilizando, na sua forma reduzida, a fórmula:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (3.6)$$

As derivadas parciais $\partial f / \partial x_i$ são iguais em todas as avaliações de incerteza, para as variáveis de entrada x_i com relação a mesma variável de saída y , dessa forma, podendo aproximar o valor da derivada parcial ao valor de uma constante c_i . Assim, reescreve-se a equação 3.6 como:

Tabela 3.2: Grandezas da Avaliação de incerteza Tipo B

Grandeza	Distribuição de probabilidade	Instrumento
Resolução	Retângular	Microfone de referência e Microfone de eletreto
Aquisição	Retângular	Microfone de referência e Microfone de eletreto
Incerteza de calibração	Retângular	Microfone de referência
Variação da frequência	Triangular	Microfone de referência e Microfone de eletreto

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (3.7)$$

A incerteza que compreende uma parte da distribuição dos valores que são atribuídos ao mensurando é chamada de incerteza expandida, U Sendo calculada pela multiplicação da incerteza combinada, u_c , por um fator de abrangência, k , conforme apresentado a seguir.

$$U = k * u_c \quad (3.8)$$

O valor de k é definido em função da confiança escolhida para a calibração e do número de graus de liberdade existentes no processo de medição, sendo determinado utilizando-se a tabela *t-Student*, para distribuição bilateral.

Para todos os procedimentos de ensaio deste trabalho, adotou-se uma confiança de 95% e, no caso do grau de liberdade, ν_{eff} , o seu valor é calculado utilizando-se a fórmula:

$$\nu_{eff} = \frac{I_{CB}^4}{\sum \frac{I_i^4}{\nu_i}} \quad (3.9)$$

Sabendo-se o grau de liberdade efetivo da medição, é determinado o fator de abrangência k . Calculado o valor da incerteza expandida, é possível representar o resultado da medição, X expresso pelo intervalo do valor verdadeiro convencional, x , com a incerteza expandida, U .

$$Y = y \pm U \quad (3.10)$$

3.1.2 Análise de Ruído

As medições de sinais, de alguns tipos de mensurando, são susceptíveis à ruídos, seja na aquisição do sinal ou como no processamento de dados.

O ruído é qualquer tipo de informação que se sobrepõe a uma informação útil, como exemplifica a figura 3.1, onde há um sinal puro e um sinal sobre influência de um ruído. O ruído, dependendo da sua intensidade, pode distorcer o sinal original, impossibilitando sua utilização ou pode ser corrigido utilizando filtros ou tratamentos de sinal. Os ruídos podem ser susceptíveis na captação de algum mensurando, no processamento de um sinal ou pode ser gerado por causa de algum componente interno.

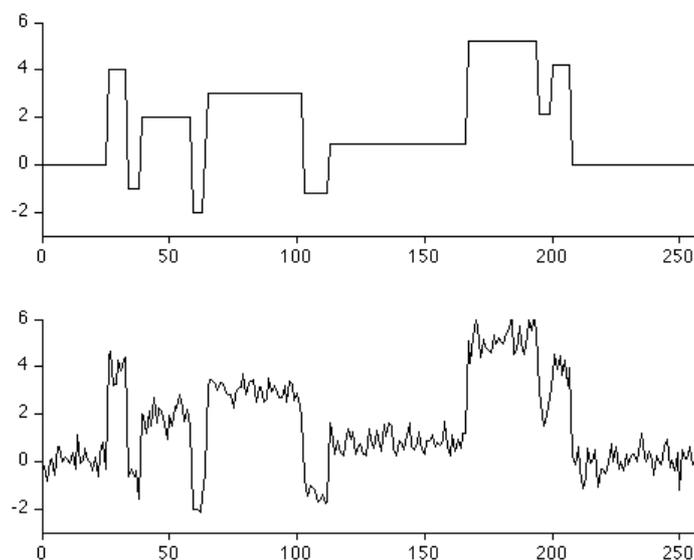


Figura 3.1: Sinais em função do tempo: a) sinal puro; b) sinal com ruído

Na acústica é mais frequente a ocorrência de ruídos durante a captação de um som útil, no qual, o ruído é produzido pelo som de um agente externo. O ruído com essa origem é chamado de ruído ambiente. Também pode ocorrer outro modo de interferência, causado por algum componente elétrico, como por exemplo, o circuito responsável por alimentar o microfone.

Neste experimentos, os principais tipos de ruídos são o ruído de origem elétrica e o ruído ambiente, proveniente do sistema de aquisição de dados e o ruído ambiente, som produzido por agentes externos ao experimento.

O ruído elétrico está associado à frequência da rede elétrica do laboratório e a estática dos equipamentos. A frequência da inversão de sentido da corrente elétrica, no Brasil, é de 60 Hz . Mesmo depois de convertida em corrente contínua, pela fonte dos equipamentos de aquisição, ainda há um pulso de 60 Hz que provoca interferências nos sinais lidos.

Para amenizar a influência desse tipo de ruído nas leituras, é possível utilizar filtros digitais no programa de aquisição de dados, mas há a possibilidade de perda de informação.

Neste projeto de graduação, para amenizar a influência desta interferência, o processamento de dados não é realizado simultaneamente à aquisição. Foram utilizados dois programas, um para aquisição e um para processamento de dados, sendo eles o LabView e o Matlab respectivamente.

Os ruídos ambiente são originados do som proveniente do aparelho de ar-condicionado, dos exaustores dos computadores e dos barulhos externos aleatórios. Para diminuir a intensidade dessas interferências acústicas no som utilizado para a calibração, são utilizadas espumas para auxiliar no isolamento acústico e realizar os ensaios utilizando cavidades acústicas.

As espumas foram colocadas sobre a bancada experimental e em torno dos microfones, de modo a diminuir a propagação da vibração da fonte sonora nos suportes de fixação dos microfones e isolar sons externos, sem interferir no som produzido pelo alto-falante. Também foram desligados o máximo de equipamentos irrelevantes para o experimento que poderiam gerar ruídos e o procedimento de calibração ocorrem em horários com menor circulação de pessoas no laboratório.

3.2 Caracterização de Microfones

A caracterização instrumental tem como objetivo avaliar e calibrar um sensor, determinando em quais condições o sensor atuará de forma precisa, para a sua melhor utilização. Para caracterizar o microfone de eletreto foram realizados testes com o objetivo de estudar a resposta em frequência do microfone e calibrá-lo.

A calibração do microfone de eletreto, neste projeto, tem o propósito de determinar a sensibilidade do sensor em converter o sinal de tensão em sinal de pressão. Também é determinando as faixas de frequência em que o sensor pode ser usado e os limites de intensidade da flutuação de pressão.

Para este projeto, o método de calibração escolhido foi o da reciprocidade com comparação, pois, esse método possibilita que o sensor seja calibrado, mesmo não se conhecendo as características da fonte do sinal. A calibração é realizada por comparação do sinal de saída do microfone descalibrado com o sinal de saída do microfone calibrado .

A Figura 3.2 exemplifica, de forma ilustrativa, o método da reciprocidade de calibração, com a fonte sonora representada à esquerda e os microfones à direita. O microfone **M** representa o microfone descalibrado enquanto o microfone **A** representa o microfone calibrado ou microfone de referência.

Utilizando do método da reciprocidade, é possível garantir que os dois microfones captem o mesmo sinal sonoro. Dessa forma, o microfone **M** e o microfone **A** produzem um sinal de tensão análogo à excitação sonora incidente, U_1 e U_2 respectivamente. Como o microfone de referência é calibrado, o valor da sua sensibilidade é fornecido pelo fabricante.

Neste projeto é utilizado, como microfone de referência, o microfone da fabricante Brüel & Kjaer, modelo 4189-L-001. Na carta de calibração do microfone estão presentes as informações necessárias para a realização dos experimentos: a sensibilidade e a incerteza do microfone .

Descrevendo a sensibilidade do microfone de referência, σ_A , em função da tensão pela pressão, obtém-se a relação.

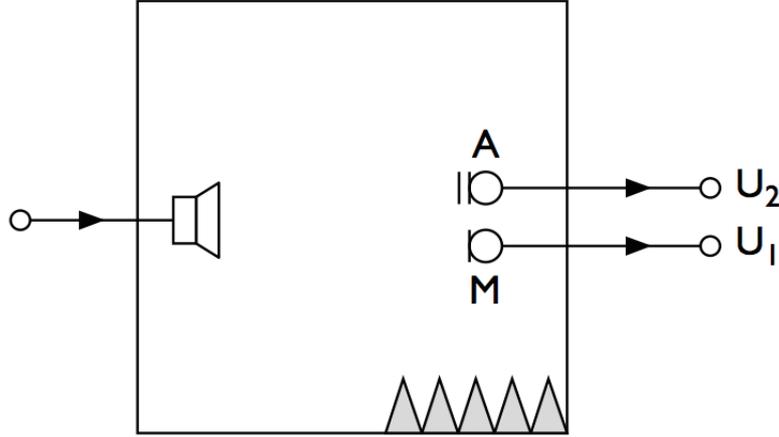


Figura 3.2: Método da reciprocidade. Fonte sonora à esquerda, microfone **M** (descalibrado) e microfone **A** (calibrado) à direita

$$\sigma_A = \frac{U_2}{P_{som}} \left[\frac{mV}{Pa} \right] \quad (3.11)$$

Deixando a igualdade em função da pressão sonora, P_{som} .

$$P_{som} = \frac{U_2}{\sigma_A} [Pa] \quad (3.12)$$

Descrevendo a sensibilidade do microfone **M** em termos da tensão e pressão, de forma similar a equação 3.11.

$$\sigma_M = \frac{U_1}{P_{som}} \left[\frac{mV}{Pa} \right] \quad (3.13)$$

A forma que o experimento é montado garante que o som produzido pelo alto-falante chegue com as mesmas características nos dois microfones, possibilitando assim, afirmar que a pressão sonora será igual nos dois microfones. Partindo-se dessa afirmação, substitui-se o termo em função da pressão, eq. 3.12, na equação 3.13, obtendo-se a nova relação da sensibilidade para o microfone **M**:

$$\sigma_M = U_1 \frac{\sigma_A}{U_2} \left[\frac{mV}{Pa} \right] \quad (3.14)$$

A partir dessa nova relação, é possível calcular a sensibilidade do microfone de eletreto em função das tensões mensuráveis e da sensibilidade do microfone de referência, ou seja, é possível determinar a sensibilidade do microfone de eletreto utilizando de informações conhecidas.

Capítulo 4

Procedimentos e Resultados

Neste capítulo serão descritos os ensaios de forma detalhada, seguidos dos resultados intermediários e o resultado final do ensaio de calibração. As etapas que compõem os procedimentos são descritos justificando as decisões tomadas e os resultados vão expor os dados adquiridos nos ensaios e os valores do cálculo de incerteza.

4.1 Montagem da bancada

Em um processo de calibração deve-se ter as etapas bem organizadas para se ter controle dos ensaios, reduzindo a possibilidade de descartes de dados e levando a resultados mais confiáveis para os cálculos da calibração

Os ensaios foram organizados nas seguintes etapas: montagem da bancada experimental; verificação dos equipamentos; ensaio de calibração e processamento de dados. Esse conjunto de etapas determina o procedimento para caracterização.

A bancada experimental é composta por: um alto-falante 52V2A Selenium de 5"; um gerador de forma de onda HP 33120A; um microfone B & K, modelo 4120; um amplificador de sinal NEXUS B & K; conjunto de aquisição de dados composto por uma mesa de aquisição, NI cDaq-9174, e uma placa de aquisição NI 9234.

A figura 4.1 esquematiza a bancada experimental montada para os ensaios. Os microfones são ligados à placa de aquisição e a mesa de aquisição é conectada ao computador, que fará o processamento dos dados. O alto falante e os microfones são montados na cavidade. O alto falante é colocado na parte inferior da cavidade e os dois microfones são encaixados na tampa da cavidade.

4.2 Limites experimentais

Os valores que determinam os limites das medições experimentais são definidos pelas características estruturais e os limites de funcionamento dos equipamentos. Essas informações são encontradas nos manuais e cartas de especificação técnica.

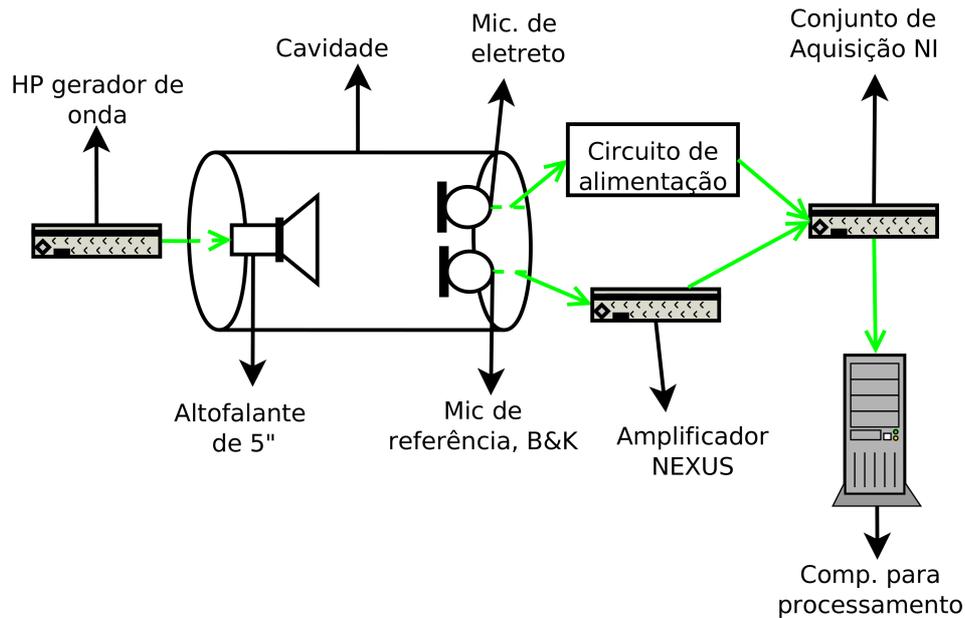


Figura 4.1: Diagrama da montagem da bancada experimental

Os intervalos de frequência utilizados nos experimentos foram determinados a partir das características de funcionamento do microfone de referência e do alto-falante. Parte dessas informações sobre o alto-falante e o microfone de referência seguem nas tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente.

Tabela 4.1: Especificação técnica do alto-falante

Especificações técnicas	Unidade	52V2A
Impedância	Ω	4
Potência RMS	W	50
Sensibilidade	dB SPL	86
Resposta de frequência	Hz	90 a 20.000

O microfone de referência consegue captar frequências a partir de 20 Hz, porém a menor frequência que o alto-falante consegue produzir é de 90 Hz. Já o microfone não consegue captar ondas com frequência superior à 4000 Hz de forma precisa. Então para garantir a qualidade dos resultados, definiu-se o intervalo de frequência para análise entre 100 Hz e 4000 Hz.

4.3 Programa de processamento de dados

Os dados adquiridos usando o Labview foram processados usando o programa Matlab. O processamento de dados foi usado para determinar a função de resposta em frequência do microfone de eletreto e para o cálculo da estimativa das incertezas de medição.

Tabela 4.2: Especificação técnica do microfone

Especificações técnicas	Unidade	B & K
Resposta de frequência	Hz	20 a 5000
Impedância	Ω	4
Sensibilidade	mV/Pa	55,5
Incerteza(95%)	dB	0,2

Foi elaborada uma rotina em Matlab para carregar os sinais de tensão gravados pelo programa Labview. A partir desses sinais foram determinadas as funções de resposta em frequência usando a Transformada Rápida de Fourier (FFT, no inglês) gerando um espectro do sinal.

Os sinais do microfone de eletreto e do microfone de referência foram alocados em arrays: Sinal-MIC e SinalBEK, respectivamente. A partir desses dois vetores foram realizados todos os cálculos para a calibração do microfone, dessa forma os dados originais não foram acessados repetidamente, preservando-se os mesmos.

Para cada frequência do sinal de entrada, ou seja, a flutuação de pressão produzida pelo alto-falante, foram realizadas 20 medições, então tem-se 20 **FFTs** para cada frequência de excitação.

A rotina programada no Matlab segue como referência os procedimentos de cálculo de incertezas proposto na ISO-GUM [INMETRO 2008] e seguindo roteiros de calibração [Link 1997]. As etapas para o cálculo da incerteza são:

- Calcular o desvio-padrão nas 20 medições para cada frequência;
- Realizar a Avaliação do Tipo A da incerteza a partir do desvio-padrão;
- Definir os termo para Avaliação do Tipo B da incerteza e a distribuição adequada para cada termo;
- Calcular a Incerteza Combinada;
- Calcular o Grau de Liberdade a partir da Incerteza Combinada e da Avaliação do Tipo A;
- Determinar o coeficiente de abrangência para 95% de confiança e o grau de liberdade encontrado;
- Calcular a incerteza expandida da medição;

A ordem dessas etapas são exemplificadas no fluxograma da figura 4.2.

Finalizado a análise de incerteza foram traçadas as curvas de resposta em frequência para os dois microfones. Utilizando métodos analíticos, foi determinado os intervalos onde é possível realizar a calibração e obter valor de sensibilidade confiável

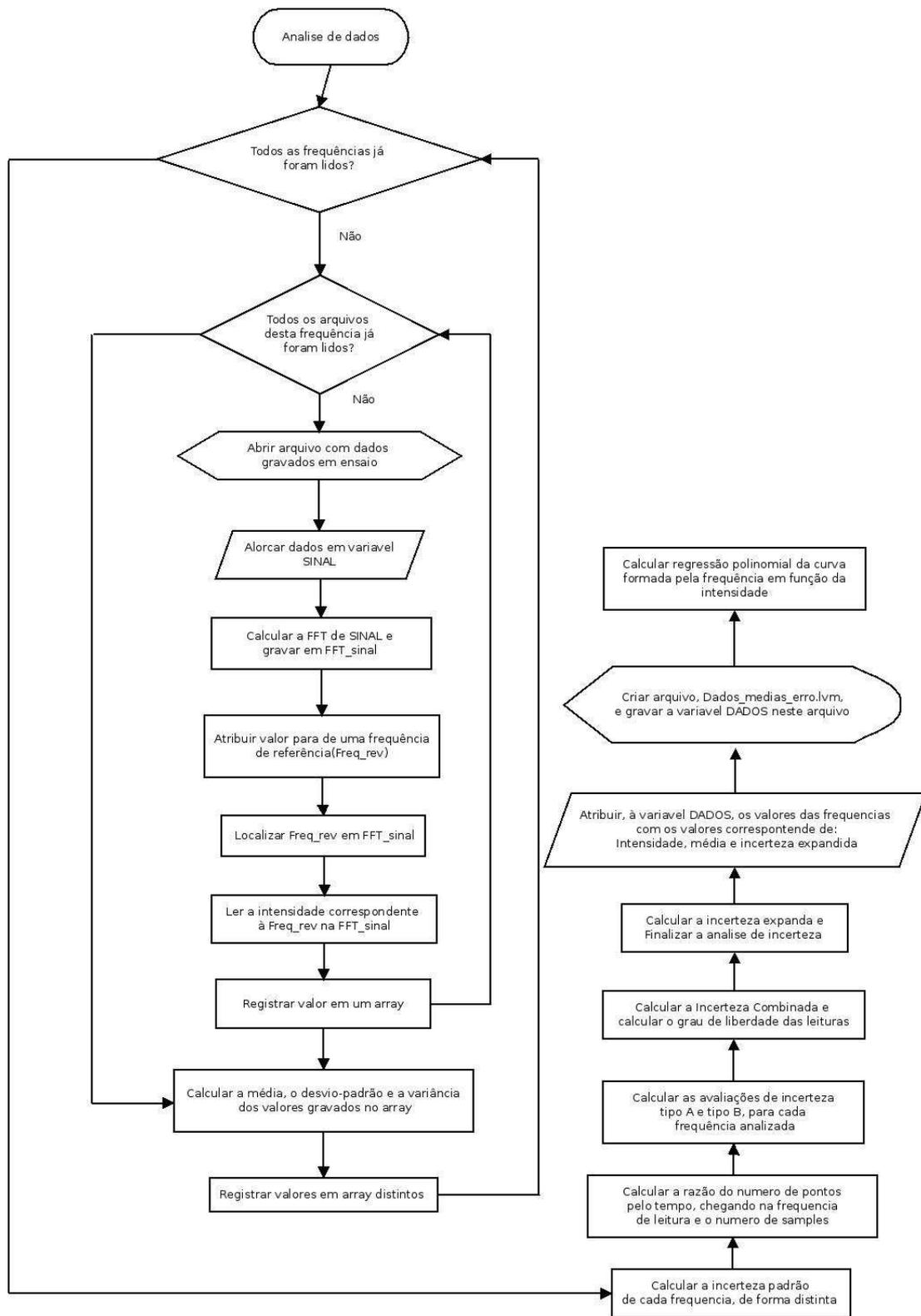


Figura 4.2: Fluxograma do algoritmo para processamento de dados

4.4 Teste para cavidade aberta e cavidade fechada

Este ensaio é realizado com a finalidade de avaliar a interferência da frequência natural da cavidade e dos ruídos externos na captação do som produzido pelo alto-falante e, dessa forma, decidir se os ensaios serão realizado com a cavidade fechada ou aberta.

No ensaio são realizados dois experimentos, no primeiro experimento, a cavidade utilizada está totalmente fechada, para aumentar o isolamento acústico. No segundo experimento, é retirada a tampa da cavidade e posicionado os microfones à frente da abertura da cavidade. É realizado a leitura das frequência de 100 Hz à 4000 Hz, com passo de medição de 100 Hz.

Para a cavidade fechada a tensão do sinal de alimentação do alto-falante é fixada em 1 V e para cavidade aberta a tensão do sinal é fixada em 4 V, sendo essas as características da rotina do experimento. A tensão do sinal de alimentação é aumentada, no experimento da cavidade aberta, para garantir que o som chegue nos microfones de forma nítida, pois há a dispersão do som no ambiente.

Neste ensaio foi utilizado somente o microfone de referência nas medições, pois esse é calibrado e com as características de funcionamento definidas. Os dois experimentos seguirão os procedimentos de montagem, método de medição e processamento dos dados, descritos na seção 4.1.

Na figura 4.3 são apresentadas as **FFTs** dos sinais de saída do microfone de referência. As curvas em vermelho mostram os resultados do experimento com a cavidade fechada e as curvas em azul mostram os resultados do experimento com a cavidade aberta.

Os gráficos foram organizados em pares, sendo que cada par é referente a uma frequência de excitação, do lado direito os resultados do experimento com a cavidade aberta e do lado esquerdo os resultados com a cavidade fechada.

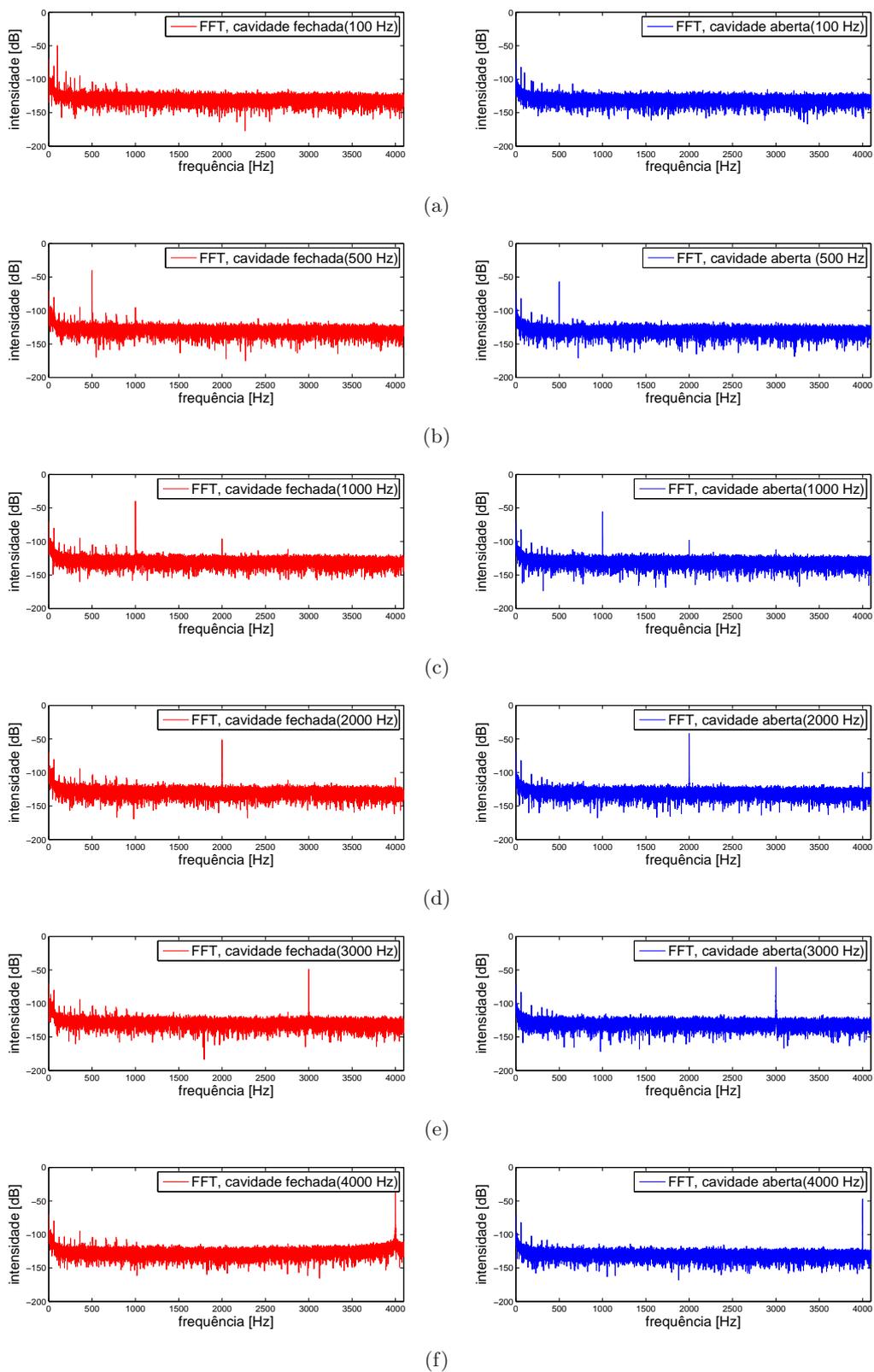


Figura 4.3: FFTs dos sinal nas frequências de: 100 Hz(a); 500 Hz(b); 1000 HZ(c); 2000 Hz(d); 3000 Hz(e); 4000 Hz(f)

Analisando os gráficos da figura 4.3, é notado que para as frequências inferiores à 1000 Hz, a intensidade sonora captada pelo microfone é menor com a cavidade aberta, sendo justificável por causa da dispersão do som no ambiente. Porém, na cavidade fechada, há a presença de picos de intensidade em algumas frequências que não são as frequência de excitação.

Nas frequências acima de 1000 Hz, a diferença dos valores das intensidades diminui consideravelmente. Essas análises ficam mais claras ao realizar a diferença entre as intensidades, subtraindo o valor da intensidade para cavidade aberta pelo valor para cavidade fechada, Fig. 4.4.

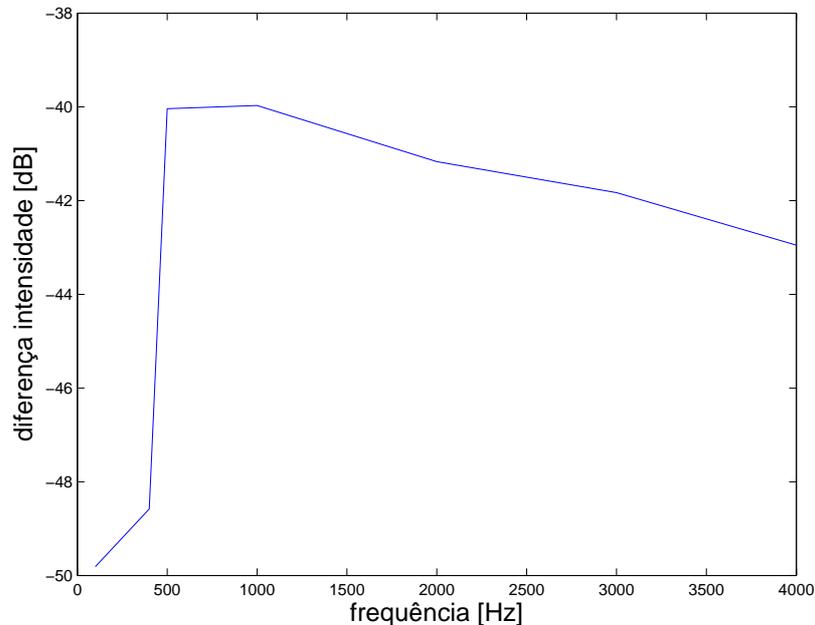


Figura 4.4: Diferença entre o valor da intensidade para cavidade aberta pela intensidade para cavidade fechada

Por questão de controle dos ensaios, os experimentos serão realizados com a cavidade aberta, pois, caso houver algum problema durante o experimento, com a cavidade aberta, algum som irregular é perceptível, podendo assim tomar alguma ação corretiva ou suspender o ensaio de forma antecipada.

4.5 Ensaio para análise da resposta em frequência

Este ensaio tem como objetivo determinar a curva de resposta em frequência dos dois microfones, juntamente com as incertezas das medições, afim de conseguir determinar o melhor intervalo de frequência para realizar a calibração.

O procedimento para montagem do experimento segue o roteiro descrito no seção 4.1. O ensaio foi realizado no intervalo de frequências de 100 Hz à 4000 Hz, com o passo de 100 Hz, num total de 41 frequências medidas, sendo realizadas vinte repetições para cada frequência.

A tensão do sinal será de 4 volts para a alimentação do alto-falante, pois os ensaios foram

realizados com a cavidade aberta.

As tabelas 4.3 e 4.4 apresentam as informações utilizadas para o cálculo da incerteza expandida do microfone de referência e do microfone de eletreto respectivamente. Nas tabelas são apresentadas quais as grandezas utilizadas para o cálculo (variáveis de entrada), juntamente com as respectivas distribuição de probabilidade e incerteza padronizada.

A incerteza expandida é calculada junto com o processamento de dados no programa Matlab, o algoritmo foi escrito seguindo a metodologia do GUM [INMETRO 2008]. Os valores da incerteza expandida de algumas medições são apresentados na tabela 4.5.

Tabela 4.3: Incertezas do microfone B & K

Grandeza	Avaliação	Distribuição de probabilidade	Incerteza Padronizada	Incerteza $i_i(y)$	Grau de liberdade
Indicação do padrão	Tipo A	Normal	$s(x_{B\&K})$	$s(x_{B\&K})$	19
Resolução	Tipo B	Retângular	0,001	0,0006	∞
Incerteza	Tipo B	Retângular	0,2	0,12	∞
Aquisição	Tipo B	Retângular	0,0005	0,0003	∞

Tabela 4.4: Incertezas do microfone eletreto

Grandeza	Avaliação	Distribuição de probabilidade	Incerteza Padronizada	Incerteza $i_i(y)$	Grau de liberdade
Indicação do padrão	TipoA	Normal	$s(x_{ELE})$	$s(x_{ELE})$	19
Resolução	TipoB	Retângular	0,001	0,0006	∞
Aquisição	Tipo B	Retângular	0,0005	0,0003	∞

Tabela 4.5: Incertezas Expandida, U , do microfone de referência e de eletreto

Frequência (Hz)	$U_{B\&K}$	$U_{Eletreto}$
100	0,022	0,132
500	0,0138	0,044
1000	0,0008	0,004
2000	0,00011	0,006
3000	0,0035	0,25
4000	0,0038	0,112

Com os valores das médias das medições e os valores das respectivas incertezas são traçadas as curvas de resposta em frequência dos dois microfones. A curva em vermelho representa a resposta do microfone de referência(B&K) e a curva em azul a resposta do microfone de eletreto. As duas curvas foram traçadas juntas, Fig. 4.5, pois dessa forma é mais fácil interpretar os dados e ter uma compreensão melhor dos seus comportamentos para compara-las.

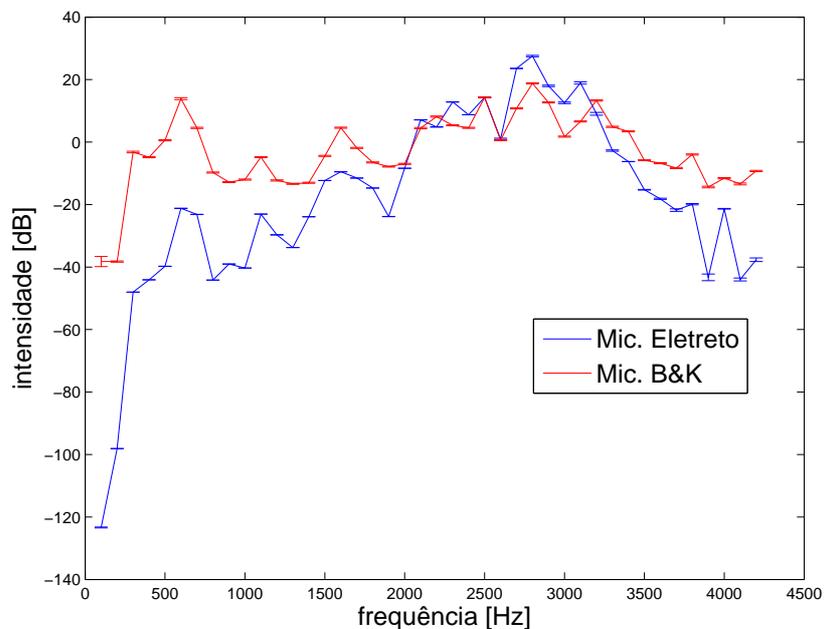


Figura 4.5: Curva da resposta em frequência dos microfones

Analisando os valores da incerteza expandida, tabela 4.5, verifica-se que a ordem da incerteza é inferior em até quatro ordens em comparação com as médias das medições, dessa forma, as barras que determinam o intervalo da incerteza chegam a parecer linhas, porém, estão presentes.

Analisando o intervalo de 3500 Hz à 4000 Hz da figura 4.5, pode-se verificar melhor a proporção entre o intervalo da incerteza de medição e o valor medido.

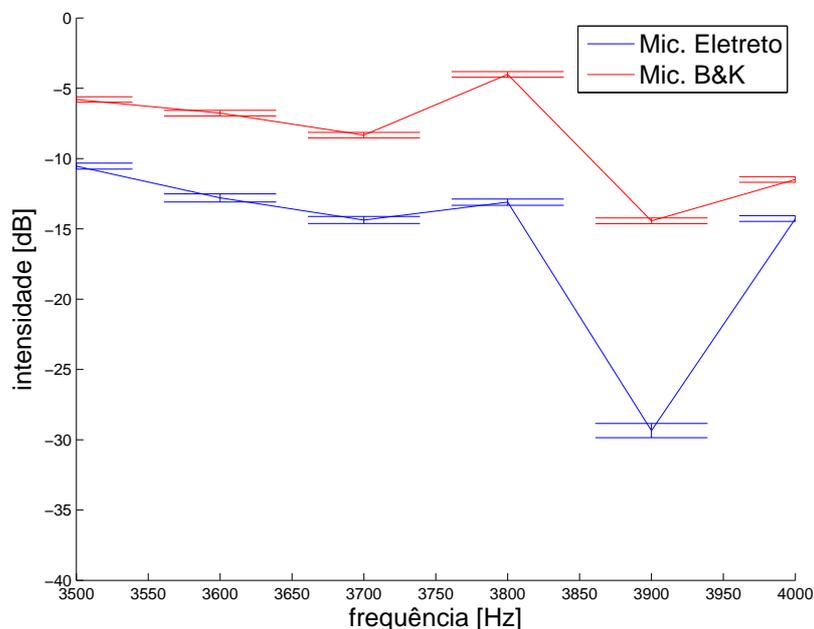


Figura 4.6: Incerteza de medição para os valores medidos

O valor da incerteza associada à frequência é igual para todas as medições, pois seu valor é determinado a partir do método de cálculo da **FFT** dos sinais e como o método não mudou entre medições, o passo da frequência foi constante e igual à 0.85 Hz.

O espaço entre o sinal do microfone de eletreto e o sinal do microfone de referência representa o quanto de intensidade o microfone de eletreto não correspondeu ao valor real. Os resultados da diferença entre os sinais representam as correções dos valores de saída, para que o sinal do microfone de eletreto corresponda ao valor real de medição. Esses valores representam o erro sistemático da medição.

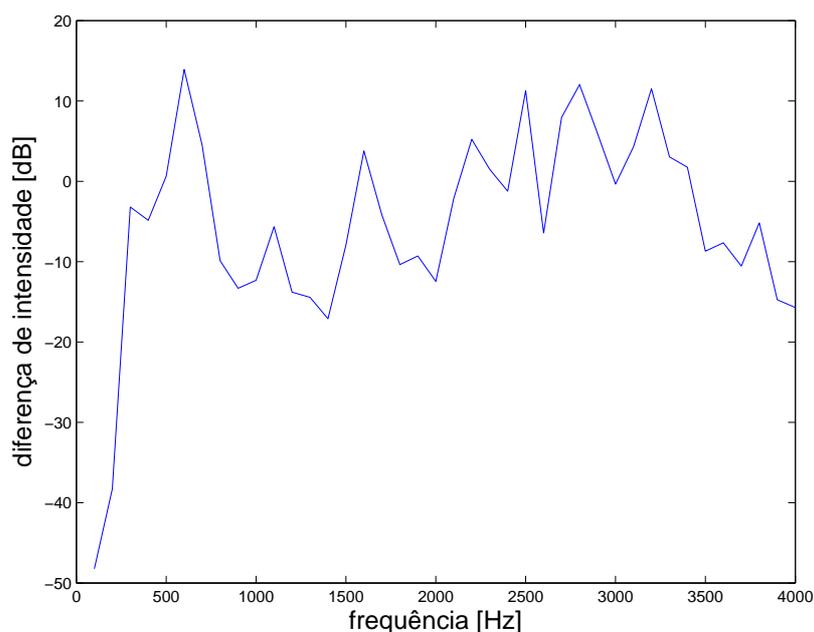


Figura 4.7: Diferença entre microfone de referência pela microfone de eletreto(Erro Sistemático)

Analisando as curvas de resposta em frequência, Fig. 4.5, e o gráfico do erro sistemático, Fig.4.7, na faixa de 300 Hz à 800 Hz, as curvas têm comportamento aparentemente similar. O erro sistemático sobe conforme a frequência aumenta.

No intervalo de 2000 Hz à 3500 Hz, o erro sistemático flutua em torno do zero, apresentando o que, possivelmente, é uma boa faixa para realizar um ensaios mais detalhado.

4.6 Ensaio para análise em 2000 Hz à 4000 Hz

Este ensaio analisa o intervalo de frequência onde a resposta do microfone de eletreto mais se aproximou da curva de resposta do microfone de referência.

As frequências avaliadas neste experimento serão no intervalo de 2000 Hz à 4000 Hz, com um passo de 50 Hz e 20 medições por frequência. Dessa forma, é possível obter uma resolução melhor da curva de resposta em frequência dos microfones, resultando em uma análise mais refinado.

Repetindo o mesmo procedimento utilizado no seção 4.5, são traçadas as curvas de resposta em frequência dos microfones. As curvas, novamente, são expostas juntas, onde a curva em vermelho representa a resposta do microfone de referência(B&K) e a curva em azul a resposta do microfone de eletreto. O gráfico é apresentado na figura 4.6.

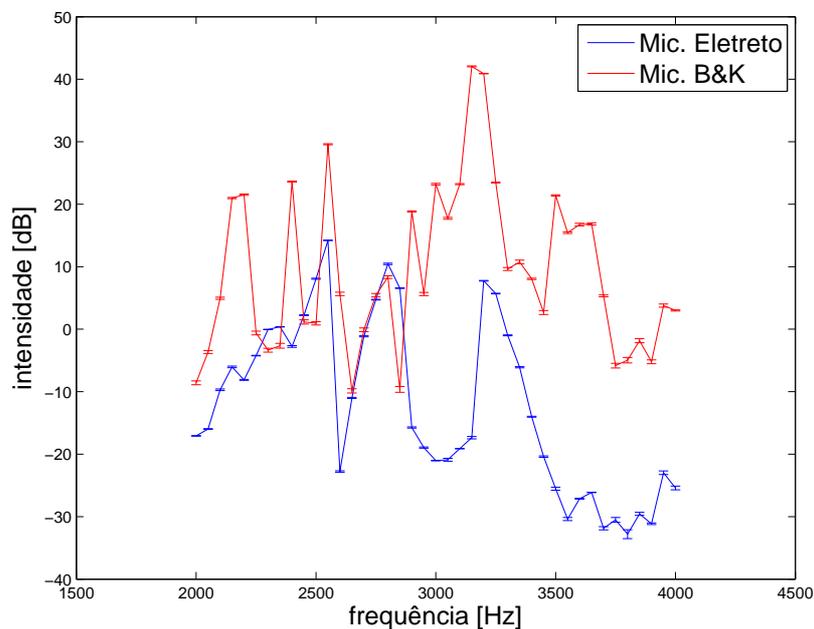


Figura 4.8: Curva da resposta em frequência dos microfones

Mesmo com as curvas de resposta em frequência com a disposição um pouco similar, tanto o sinal do microfone de eletreto quanto o do microfone de referência flutuam, com grande variação de intensidade, impossibilitando uma análise consistente. Então é realizada a diferença entre o sinal do microfone de referência pela sinal do microfone de eletreto, resultando no erro sistemático do sinal do microfone de eletreto. Os valores do erro sistemático são apresentados na figura 4.6.

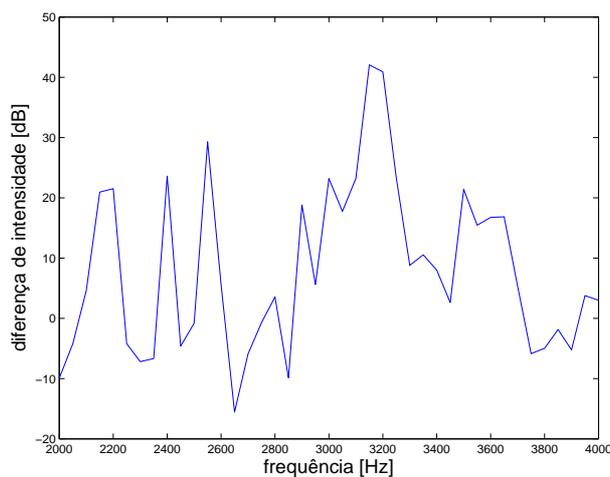


Figura 4.9: Diferença entre microfone de referência pela microfone de eletreto(Erro Sistemático)

Analisando o comportamento do erro sistemático, para o intervalos de 2000 Hz à 3300 Hz, os valores flutuam com uma variação superior à 3 dB, ou seja, acima do dobro da intensidade. Assim, dificultando afirmar que neste intervalo é confiável realizar o procedimento de calibração.

O microfone de referência foi utilizado dentro da sua zona de precisão, ou seja, trabalhou dentro do seu intervalo de comportamento linear. Os dados obtidos pelo microfone de referência são válidos, representando o comportamento real da fonte.

Como a curva de resposta em frequência do microfone de referência teve um comportamento com muitas flutuações e com variações de intensidades consideráveis, responsabiliza-se a fonte sonora pelo comportamento instável do som.

O alto-falante utilizado não conseguiu reproduzir uma excitação sonora de qualidade, para que dessa forma seja possível construir uma curva de resposta em frequência estável dos microfones, impossibilitando uma análise conclusiva de forma a determinar um intervalo confiável para a calibração.

Capítulo 5

CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusão

Com a realização deste trabalho foi possível adquirir grande conhecimento sobre microfones, bem como sobre instrumentação de medidas. Ainda foi possível aprofundar conhecimentos na área de aeroacústica e de vibrações, bem como muito da área de metrologia.

Como resultado dos ensaios, definiu-se que a calibração deve ser realizada com a cavidade aberta, por motivo de ressonância da cavidade. Também se constatou o comportamento não linear do alto-falante, o que gerou algumas distorções nos resultados. Já o resultado obtido com o microfone de eletreto foi similar ao microfone de referência, porém disforme em algumas partes.

Por fim, como resultado final, a banda de frequência onde é possível calibrar o microfone é de 2000 Hz à 4000Hz sendo que não foi possível aplicar regressões lineares, justamente pelo fato do alto-falante não apresentar comportamento linear.

Mesmo realizando os ensaios seguindo o método de calibração por comparação utilizando um excelente microfone de referência (Brüel & Kjaer), as curvas de resposta em frequências não trouxeram informações consistentes para realizar a calibração. Dessa forma, é notado a importância de uma boa fonte sonora para realização dos experimentos, pois deve-se garantir a fonte produza banda de trabalho linear e que o som produzido chegue com as mesmas características nos microfones.

Com esses resultados não foi possível calibrar o microfone de eletreto, para uma banda definida de maneira a obter medidas válidas. Assim, ao fim do projeto, o uso de microfones de eletreto, aparentemente, pode-se apresentar como uma alternativa válida de instrumento de medição de flutuação de pressão, bem como o método proposto para a calibração.

Contudo este projeto de graduação permitiu o desenvolvimento de uma metodologia de calibração, o levantamento das grandezas de influência e a ordem de grandezas das incertezas das mesmas. O trabalho permitiu ainda, identificar os problemas na realização dos experimentos para

que seja proposto aperfeiçoamentos, visando viabilizar a calibração dos microfones de eletreto em trabalhos futuros.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

A primeira etapa antes de dar continuidade aos ensaios de calibração é melhorar a bancada experimental afim de evitar interferências externas provenientes de ruídos e melhorar a qualidade dos dados.

Substituir o alto-falante por um de melhor qualidade, se possível uma acompanhe sua carta de caracterização, com a curva de resposta em frequência e seus limites de trabalho. Dessa forma, tornando mais fácil determinar os intervalos de frequência para os ensaios, para assim obter resultados mais precisos.

Uma outra melhoria para bancada experimental é isolar acústico do laboratório, diminuindo a influência de ruído externo no experimento, para conseguir uma confiabilidade maior nos resultados.

Com essas alterações é possível repetir a coleta de dados e espera-se que os resultados sejam melhores para refinamento da incerteza e validação do sistema de avaliação de pressão via sonora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Cengel e Cimbala 2015]CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Mecânica dos fluidos-3*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2015.
- [Eargle 2004]EARGLE, J. *The Microphone Book*. [S.l.]: Taylor & Francis, 2004.
- [Fahy 2008]FAHY, F. J. *Foundations of engineering acoustics*. [S.l.]: Academic Press, 2008.
- [Halliday e Resnick 2008]HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos de física**. In: *Fundamentos de Física*. [S.l.]: Companhia Editorial Continental, 2008.
- [Hurault, Kouidri e Bakir 2012]HURAUULT, J.; KOUIDRI, S.; BAKIR, F. **Experimental investigations on the wall pressure measurement on the blade of axial flow fans**. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Elsevier, v. 40, p. 29–37, 2012.
- [INMETRO 2012]INMETRO. **Vocabulário internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (VIM 2008)**. *Inmetro e SENAI, 2ª ed., Brasília, SENAI/DN*, 2012.
- [INMETRO 2008]INMETRO, G. **Guia para Expressão da Incerteza de Medição**. *Edição Brasileira do "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement-ISO*, 2008.
- [Kuttruff 2007]KUTTRUFF, H. *Acoustics: An introduction*. [S.l.]: Taylor & Francis, 2007.
- [Link 1997]LINK, W. **Metrologia mecânica expressão da incerteza de medição**. Programa RH Metrologia, 1997.
- [Milhomem 2008]MILHOMEM, T. A. B. **Técnica para calibração de microfones de meia polegada por reciprocidade em campo livre**. 2008.
- [Nussenzveig 2001]NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor*. [S.l.]: Edgard Blucher, 2001.
- [Patsko 2006]PATSKO, L. **Aplicações, Funcionamento e Utilização de Sensores**. *Maxwell Bohr Instrumentação Eletrônica e Pesquisa e Desenvolvimento de Produtos*, v. 200, 2006.