

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

OCTÁVIO GIOCONDO NETO
RICARDO CORDOVA GROSZEWICZ

**COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE MEDIÇÃO
DE POTÊNCIA SONORA EM AMBIENTE REVERBERANTE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

OCTÁVIO GIOCONDO NETO
RICARDO CORDOVA GROSZEWICZ

**COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE MEDIÇÃO
DE POTÊNCIA SONORA EM AMBIENTE REVERBERANTE**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. MSc. Samuel Soares Ansay

CURITIBA

2016

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA SONORA EM AMBIENTE REVERBERANTE", realizado pelos alunos OCTÁVIO GIOCONDO NETO e RICARDO CORDOVA GROSZEWICZ, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. MSc. Samuel Soares Ansay

DAMEC, UTFPR.

Orientador

Prof. Dr. Márcio Henrique de Avelar Gomes

DAMEC, UTFPR.

Avaliador

Prof. Dr. Nilson Barbieri

DAMEC, UTFPR.

Avaliador

Curitiba, 16 de novembro de 2016.

RESUMO

GIOCONDO NETO, Octávio, GROSZEWICZ, Ricardo Cordova. COMAPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA SONORA EM AMBIENTE REVERBERANTE, 106 f. Trabalho de Conclusão de Curso – TCC2 (Engenharia Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

O ruído está cada vez mais presente no cotidiano das pessoas, assim como os problemas causados por ele. Então, torna-se de suma importância o entendimento do nível de potência sonora emitido por equipamentos, ficando a cargo da mecânica acústica o desenvolvimento de normas para tal aferição. Neste trabalho, foram utilizadas as metodologias propostas na ISO 3744:2010 referente ao método da pressão sonora e a ISO 9614-1:1993 referente ao método da intensidade sonora para as medições de potência sonora de um aspirador de pó em uma sala reverberante, com diferentes níveis de ruído de fundo. Foi utilizado como forma de geração de dados o método experimental, posteriormente foram feitas análises e discussões com os resultados obtidos, através da comparação entre os métodos. Os resultados obtidos em ambos os métodos convergem para o mesmo valor.

Palavras-chave: medições de potência sonora, sala reverberante, pressão sonora, intensidade sonora.

ABSTRACT

GIOCONDO NETO, Octávio, GROSZEWICZ, Ricardo Cordova. COMPARISON BETWEEN SOUND POWER LEVEL MEASUREMENTS METHODS IN REVERBERANT ROOM, 106 f. Trabalho de Conclusão de Curso – TCC2 (Engenharia Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Currently the noise is a lot present in the life of people, as well as the problems it causes. So, the understanding of sound power level of equipments becomes extreme important, this has been studied and developed by mechanical acoustics. This present study used two different methodologies found in ISO 3744:2010, relating to method of sound pressure and ISO 9614-1:1993, relating to method of sound intensity for the sound power measurements of a vacuum cleaner in reverberant room with two different background noises. For this study was used the experimental methodology, after the measurements, the datas were analyzed and discussed, by comparing the methods. Results obtained in both methods converge to the same value.

Key-words: sound power level measurements, reverberant room, sound pressure level, sound intensity level.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ondas Longitudinais e Transversais	16
Figura 2 - Frequências Alta e Baixa	17
Figura 3 - Amplitude de uma Onda	18
Figura 4 - Fonte Sonora Esférica	20
Figura 5 - Fonte Sonora Omnidirecional Dodecaédrica	21
Figura 6 - Fonte Cilíndrica	21
Figura 7 - Nível de Pressão Sonora x Log distância	23
Figura 8 - Propagação da Onda Esférica	24
Figura 9 - Ruído Contínuo Estacionário	25
Figura 10 - Ruído Flutuante.....	26
Figura 11 - Ruído flutuante.....	26
Figura 12 - Ruído Branco	27
Figura 13 - Onda ruído branco	27
Figura 14 - Ruído marrom (vermelho).....	28
Figura 15 - Onda ruído marrom (vermelho).....	28
Figura 16 - Ruído rosa	29
Figura 17 - Onda ruído rosa	29
Figura 18 - Curvas de Ponderação A e C	31
Figura 19 - Padrões polares dos microfones.....	35
Figura 20 - Pré-amplificador	36
Figura 21 - Calibrador acústico	37
Figura 22 - Câmara Anecóica.....	38
Figura 23 - Reverberação.....	39
Figura 24 - Exemplo de Superfície de Medição.....	40

Figura 25 - Superfície de uma semi-esfera	42
Figura 26- Superfície cilíndrica	43
Figura 27 - Banda de freqüência de uma oitava e de um terço de oitava	53
Figura 28 - Energia transportada através da área dA na direção r.....	54
Figura 29 - Fonte Sonora : Aspirador de pó	65
Figura 30 - Especificações técnicas do aspirador	66
Figura 31 - Selo Ruído do Aspirador	66
Figura 32 - A/B: Superfície de Referência para Medição	67
Figura 33 - Fonte de ruído dodecaédrica	68
Figura 34 - A: Calibrador CAL 21; B: Detalhe Calibrador	69
Figura 35 - Pedestal	69
Figura 36 - Montagem microfones de Medição	70
Figura 37 - Extensor.....	72
Figura 38 - Módulo dB4.....	72
Figura 39 - Microfone Capacitivo MCE 212.....	74
Figura 40 - Medidor Integrador.....	74
Figura 41 - Posicionamento da superfície de medição.....	77
Figura 42 - Posição Fonte Dodecaédrica	78
Figura 43 - Medição de pressão sonora.....	80
Figura 44 - Malha da Superfície de Medição.....	81
Figura 45 - Sequência de Medição.....	82
Figura 46 - Medição de potência sonora	83
Figura 47 - Tempo de Reverberação	84
Figura 48 - Nível de Potência Sonora sem fonte de ruído dodecaédrica	89
Figura 49 - Nível de Potência Sonora com fonte de ruído dodecaédrica	89

Figura 50 - Espectro sem Ruído.....	90
Figura 51 - Espectro com Ruído.....	91
Figura 52- Segunda medição de nível de Potência Sonora	93
Figura 53 - Valores de Potência e suas Incertezas	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Coeficiente de absorção sonora médio do ambiente	48
Tabela 2 - σ_{omc} das Famílias de Máquinas.....	50
Tabela 3 - Desvio Padrão da Reprodutibilidade - σ_{RO}	50
Tabela 4 - Fator C	61
Tabela 5 - Ações para aumentar a grade de confiança.....	61
Tabela 6 - Desvio Padrão Aceitável no Método do da Intensidade	64
Tabela 7 - Espaçadores versus frequências de análise	71
Tabela 8 - Equipamentos de Medição.....	82
Tabela 9 - Fator de correção do ambiente K_2	85
Tabela 10 - Nível Médio de Pressão Sonora.....	85
Tabela 11 - Ruído de Fundo do Ambiente	86
Tabela 12 - Fator de correção do Ruído Ambiente	86
Tabela 13 - Nível de Pressão Sonora	87
Tabela 14 - Nível de Potência Sonora pelo método da Pressão Sonora	87
Tabela 15 - Nível de Potência Sonora pelo método da Pressão Sonora com Incerteza	88
Tabela 16 - Nível de Potência Sonora pelo método da Intensidade Sonora	90
Tabela 17 - Nível de Potência Sonora pelo método da Intensidade Sonora com Incerteza	91
Tabela 18 - Potência sonora: Resultados primários.....	92
Tabela 19 - Segunda Medição pelo Método da Pressão Sonora	93
Tabela 20 - Potência sonora: Resultados Secundários.....	94
Tabela 21 - Comparação entre pressões e métodos	96

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Caracterização do Problema	13
1.2	Objetivos	14
1.3	Justificativa	14
1.4	Conteúdo ou etapas do trabalho	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Ondas Mecânicas e Eletromagnéticas	16
2.1.1	Ondas Mecânicas Longitudinal e Transversal	16
2.1.2	Comprimento ,Amplitude, Freqüência e Velocidade de uma Onda	17
2.2	Som	18
2.2.1	Intensidade Sonora	18
2.2.2	Potência Sonora	19
2.2.3	Espectro de Freqüência	19
2.3	Fonte Sonora	19
2.3.1	Fontes Esféricas ou Pontuais	20
2.3.2	Fontes Cilíndricas	21
2.4	Campo Sonoro	22
2.4.1	Classificação de campos sonoros quanto à sua distância da fonte	22
2.4.2	Classificação de campos sonoros quanto à sua refletividade das ondas propagadas no seu interior	22
2.5	Propagação de ondas sonoras	23
2.5.1	Propagação da Onda Esférica	24
2.6	Ruído	24
2.6.1	Classificação dos Ruídos Quanto ao Nível de Pressão	25
2.6.2	Ruídos de teste	27
2.7	Medição Acústica	30
2.7.1	Curvas de Ponderação	30
2.7.2	Tipos de Medição Acústica	31
2.7.3	Aparelhos de Medição Acústica	33
2.7.4	Ambientes para Medição Acústica	37
2.7.5	Superfície de Medição	40
2.7.6	Incertezas das medições	44
2.7.7	Medição de Potência Acústica	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS	65

3.1	Materiais de uso geral	65
3.1.1	Fonte sonora utilizada para a medição	65
3.1.2	Ambiente de Medição	67
3.1.3	Superfície de Referência para Medição	67
3.1.4	Fonte de Ruído Dodecaédrica	68
3.1.5	Calibrador	68
3.1.6	Pedestal	69
3.1.7	Trena Métrica	70
3.2	Materiais de uso para medição de Intensidade Sonora	70
3.2.1	Microfones	70
3.2.2	Pré-amplificadores	71
3.2.3	Espaçadores	71
3.2.4	Extensor	72
3.2.5	Módulo dB4	72
3.2.6	Computador	73
3.2.7	Software	73
3.3	Materiais de uso para medição de Pressão Sonora	73
3.3.1	Microfone	73
3.3.2	Medidor Integrador	74
3.3.3	Tratamento dos dados	74
4	METODOLOGIA DE MEDIÇÃO	75
4.1	Preparação para o Experimento	75
4.1.1	Medição das Dimensões do Ambiente de Medição	75
4.1.2	Medição das Dimensões do Aspirador	75
4.1.3	Determinação da Superfície de Referência de Medição	76
4.1.4	Posicionamento da Superfície de Medição na Sala	77
4.1.5	Posicionamento da Fonte de Ruído Dodecaédrica na Sala	78
4.1.6	Calibração dos Microfones	78
4.1.7	Medição do Tempo de Reverberação da Sala	79
4.1.8	Medição do Ruído do Ambiente	79
4.1.9	Medição de Pressão Sonora	79
4.1.10	Medição de Intensidade Sonora	80
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	84
5.1	Método da Pressão Sonora	84
5.1.1	Fator de correção do Ambiente K_{2A}	84
5.1.2	Nível Médio de Pressão Sonora $\overline{L'_{P(ST)}}$	85
5.1.3	Fator de correção do Ruído de Fundo K_1	86

Fonte: Autoria própria	86
5.1.4 Nível de Pressão Sonora L_p	86
5.1.5 Nível de Potência Sonora L_{WA}	87
5.1.6 Cálculo das incertezas do Método de Medição de Pressão Sonora	87
5.2 Método da Intensidade Sonora L_{IA}	88
5.2.1 Nível de Potência Sonora L_{WA}	88
5.2.2 Cálculo das incertezas do Método de Medição de Intensidade Sonora	91
5.3 Análise Primária dos Resultados	92
5.4 Análise dos resultados	92
5.5 Análise Secundária dos Resultados	94
5.5.1 Diferenças entre as Medições	95
5.5.2 Diferenças entre o valor Nominal e os valores obtidos	95
5.6 Levantamento no Nível de Pressão Sonora através do procedimento de medição de Intensidade Sonora	96
6 CONCLUSÕES	98
7 REFERÊNCIAS	100

1 INTRODUÇÃO

O ruído é um som indesejado que emana de diferentes fontes, ele pode ser irritante e interferir em conversas, no trabalho, sono e ou lazer. Em casos extremos, pode causar danos físicos e psicológicos (ABO-QUDAIS, ABU-QDAIS, 2004).

Segundo a Organização Mundial da Saúde (2016), o ruído ocupa o terceiro lugar entre os agentes insalubres que mais afetam a saúde do homem. Nas últimas décadas, a problemática do ruído tem assumido especial relevância na vida cotidiana, à medida que o nível sonoro do ruído ambiente se eleva e torna-se insuportável, sobretudo, para os que habitam ambientes próximo a fontes de ruído. O controle do ruído nas cidades é um problema internacionalmente conhecido por suas dificuldades e tem sido estudado intensamente ao redor do planeta (BELOJEVIC E JAKOVLJEVIC, 1997).

Para adoção de uma política de combate ao ruído, é necessário que sejam conhecidos alguns aspectos relacionados à emissão e à medição sonora (TEKATLIAN, 1996), dentre eles, o tipo e a potência da fonte emissora, a propagação do ruído, tipo do ambiente em que este se encontra, o método mais eficaz para medição da potência desta fonte de ruído. Intervenções na fonte emissora, sobre a propagação, ou sobre o trabalhador ou ainda uma combinação destas intervenções, podem minimizar os efeitos do ruído no ambiente (MATOS E SANTOS, 1996).

Foram utilizadas duas metodologias distintas, propostas pelas ISO 9614 - 1:1993 e ISO 3744:2010, sendo que a primeira trata do método da intensidade sonora e a segunda sobre o método da pressão sonora.

1.1 Caracterização do Problema

A existência de dois métodos distintos de medição de potência sonora viabilizam a discussão e comparação dos resultados obtidos por estes, quando aplicados a um mesmo equipamento e sob as mesmas condições ambientais. A partir disto o estudo realizado abordou a comparação entre as duas metodologias descritas na normativa.

1.2 Objetivos

O objetivo do presente trabalho é comparar os valores de potência sonora obtidos através medições realizadas no mesmo equipamento, utilizando as metodologias propostas pelas normas ISO 9614-1:1993, que descreve a determinação dos níveis de potência sonora de fontes de ruído, utilizando o método da intensidade sonora e ISO 3744:2010, que descreve da determinação dos níveis de potência sonora e dos níveis de energia de fontes de ruído através do uso do método da pressão sonora.

Para essa análise, será medido o nível de potência sonora de um aspirador de pó em uma sala reverberante, com dois níveis de ruído de fundo diferentes. Assim espera-se poder verificar a convergências dos resultados obtidos através das normas, fazendo uma comparação entre as metodologias empregadas em cada uma das mesmas, bem como a avaliação do ruído de fundo e tempo de reverberação, que caracterizam o ambiente de medição, pois deve-se conhecer esses parâmetros para uma maior eficácia no aferimento da metodologia proposta pelas normas.

O objetivo secundário será a verificação da possibilidade de utilização dos equipamentos de medição da intensidade sonora para o levantamento do nível de pressão sonora do equipamento, uma vez que tal equipamento fornece este dado.

1.3 Justificativa

No trabalho realizado por Betinni (2013) foram realizadas medições em câmaras reverberantes de dois equipamentos, uma furadeira e um aspirador de pó. Em sua metodologia foi abordada somente o descrito na norma ISO 3744:2010, referente à determinação dos níveis de pressão sonora, baseado na emissão da fonte e nos fatores de correção de ruído de fundo e ambiental.

Assim, uma outra abordagem pode ser utilizada para um maior entendimento sobre níveis de potência sonora, através da metodologia empregada na ISO 9614-1:1993 sobre método da intensidade através de medições por pontos discretos, uma vez que a universidade dispõe dos equipamentos necessários e adequados para a realização deste tipo de medição.

Portanto, a partir do momento em que se realizam medições com diferentes níveis de ruído de fundo, utilizando duas metodologias diferentes para abordar o nível de potência sonora, a eficácia na aferição através da comparação entre elas reduz o grau de incerteza das medições.

1.4 Conteúdo ou etapas do trabalho

O trabalho possui 6 capítulos:

O capítulo 1 tem por objetivo elucidar a importância do conhecimento do nível de potência sonora de ruídos no dia a dia das pessoas. Outro aspecto abordado é a importância de conhecer a incerteza das medições através de utilização de dois métodos distintos proposto pelas normas.

O capítulo 2 trata do profundo conhecimento dos métodos da intensidade e método da pressão, através do que é fundamentado nas normas e em artigos científicos já publicados.

O capítulo 3 descreve os métodos que foram utilizados, equipamentos e locais usados para o levantamento dos dados.

O capítulo 4 descreve o passo a passo da metodologia, ou seja, toda a preparação, fundamentação e as medições propriamente ditas.

No capítulo 5 são descritos os dados obtidos nas medições pelos dois métodos propostos, e a análise dos mesmos levando em consideração o que se esperava obter e o que de fato foi levantado.

O capítulo 6 apresenta a discussão dos dados, assim como o que pode-se concluir com o presente trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ondas Mecânicas e Eletromagnéticas

Ondas Mecânicas são ondas que necessitam de um meio material para se propagar, ou seja, sua propagação envolve o transporte de energia cinética e potencial e depende da elasticidade do meio. Por isto não é capaz de propagar-se no vácuo. Alguns exemplos são os que acontecem em molas, cordas, sons e em superfícies de líquidos (HALLIDAY,1960).

Ondas Eletromagnéticas são ondas geradas por cargas elétricas oscilantes e sua propagação não depende do meio em que se encontram, podendo propagar-se no vácuo e em determinados meios materiais. Alguns exemplos são as ondas de rádio, de radar, os raios-x e as microondas. Todas as ondas eletromagnéticas tem em comum a sua velocidade de propagação no vácuo, próxima a 300.000km/s.

2.1.1 Ondas Mecânicas Longitudinal e Transversal

Ondas longitudinais são ondas causadas por vibrações com mesma direção da propagação, como as ondas sonoras. Nas ondas transversais o distúrbio é perpendicular à direção de propagação, como, por exemplo, na propagação de uma onda em uma corda (HALLIDAY, 1960). A Figura 1 ilustra os tipos de ondas.

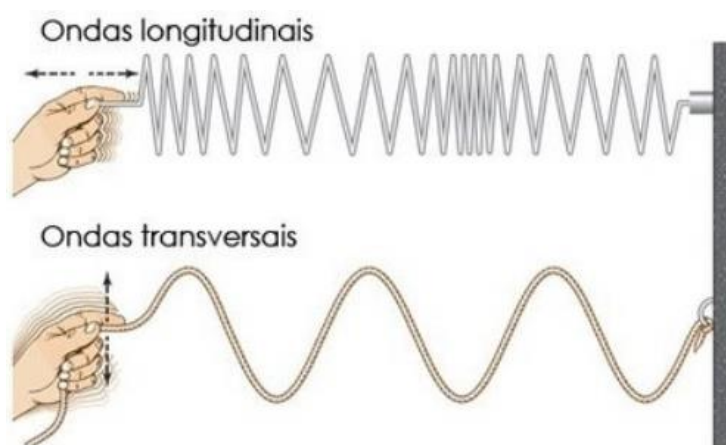


Figura 1 - Ondas Longitudinais e Transversais

Fonte: HALLIDAY,1960

2.1.2 Comprimento ,Amplitude, Freqüência e Velocidade de uma Onda

O som apresenta quatro características fundamentais, a freqüência, a amplitude, e o comprimento e a velocidade.

Freqüência: refere-se ao número de ciclos que as partículas materiais realizam em um segundo, ou o número de vibrações por unidade de tempo, é medida pela unidade chamada Hertz (Hz). É dada pela Equação 1.

$$F = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Onde T é o período definido como o tempo para um ciclo completo .

Na Figura 2 tem-se ilustrado a freqüência:

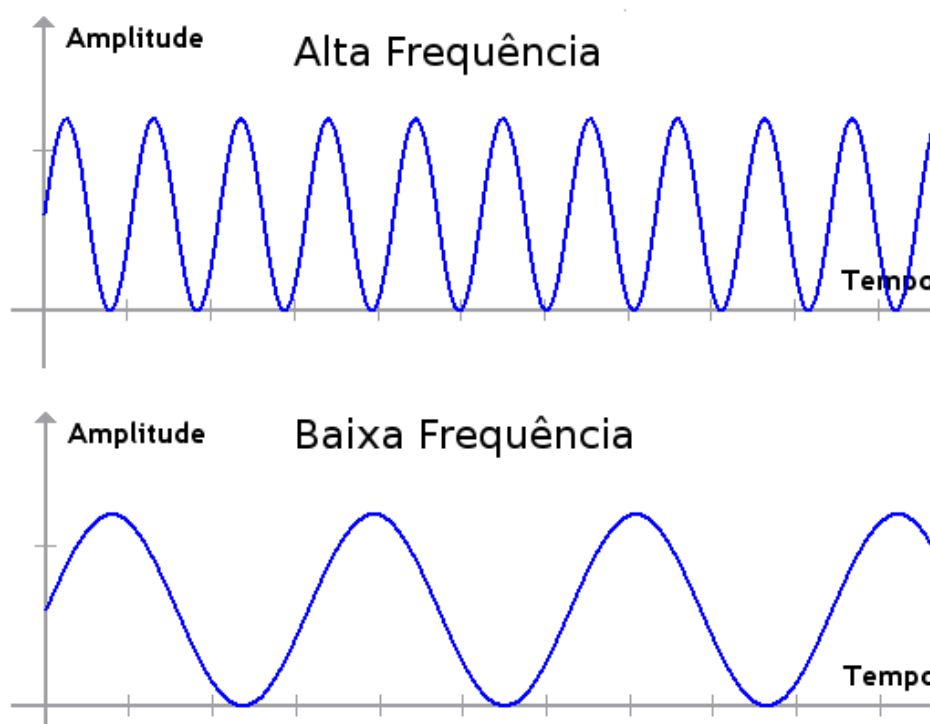


Figura 2 - Freqüências Alta e Baixa

Fonte: SOARES, 2007

A Amplitude de uma onda é definida por Halliday como a medida da magnitude de um distúrbio em um meio durante um ciclo de onda, ou seja, é a metade da altura total que uma onda possui, conforme ilustrado na Figura 3 .

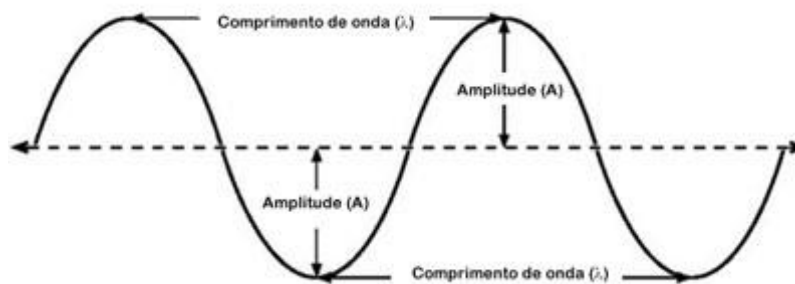


Figura 3 - Amplitude de uma Onda

Fonte: HALLIDAY, 1960

A Velocidade de uma onda é a relação entre seu comprimento e período conforme Equação 2:

$$v = \lambda \cdot \frac{1}{T} \quad (2)$$

Onde λ é o comprimento de onda em metros.

2.2 Som

Ondas sonoras são perturbações oscilatórias compressivas que se propagam num fluido. As ondas envolvem moléculas do fluido que se deslocam para trás e para frente na direção de propagação (sem fluxo de fluido), acompanhada por alterações na pressão, densidade e temperatura. Segundo Gerges (1992), o som se propaga, teoricamente, na forma de ondas esféricas a partir de uma fonte pontual e existem duas situações que podem dificultar esse modelo simples:

- i) a presença de obstáculos na trajetória de propagação;
- ii) em campo aberto, a não conformidade causada por ventos e/ou gradientes de temperatura.

2.2.1 Intensidade Sonora

É a quantidade de energia sonora que atravessa uma unidade de área, levando-se em conta que o som é tridimensional. Essa quantidade de energia é

chamada de intensidade sonora, que mede a densidade de potência de um som que se propaga em uma direção particular (DINATO, 2011).

2.2.2 Potência Sonora

É a razão da energia acústica total que uma fonte emite pela unidade de tempo, sua unidade é o watt. A potência total emitida por uma fonte é a multiplicação da intensidade sonora pela área total abrangida por esta (MASIERO, 2007).

2.2.3 Espectro de Frequência

Qualquer forma de onda, independente da sua origem, é um somatório de ondas de diferentes frequências, amplitudes e fases, como provado pelo matemático J. Fourier no século XVII (DINATO, 2011). Como as frequências se repetem periodicamente, as frequências de componentes harmônicas estão sujeitas a se repetirem apenas em valores múltiplos da frequência fundamental da onda, que é a mais baixa da série. As demais frequências, múltiplas da fundamental são chamadas de harmônicas (DINATO, 2011).

A predominância de uma faixa de frequências audíveis, sejam elas baixas, médias ou altas, acabam por caracterizar o som como grave, médio ou agudo (NEPOMUCENO, 1994).

2.3 Fonte Sonora

Fonte sonora é definida como qualquer dispositivo que emita som, tais como um instrumento musical, a voz, sons gerados por máquinas. Uma fonte sonora, pode ser considerada um transdutor, porque ela é capaz de transformar um tipo de energia em som. As fontes sonoras podem ser classificadas quanto a sua forma de irradiação (NEPOMUCENO, 1994).

2.3.1 Fontes Esféricas ou Pontuais

Segundo Nepomuceno (1994) uma fonte esférica, também chamada de pontual, irradia ondas sonoras esféricas e concêntricas, apresentando igual intensidade em todas as direções. Portanto, trata-se de uma fonte isotrópica, neste tipo de fonte sonora ocorre um decréscimo de 6 dB no nível de pressão sonora cada vez que se dobra o raio ao afastar-se da fonte. A Figura 4 mostra um cortador de grama representando uma fonte esférica:

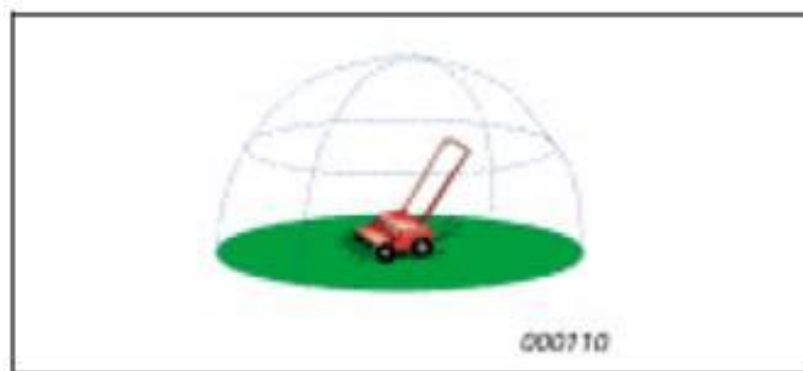


Figura 4 - Fonte Sonora Esférica

Fonte: GROM 2016

Para uma melhor obtenção nas medições acústicas, a fonte sonora deve irradiar som igualmente em todas as direções para se obter repetitividade e aferições confiáveis. Desta maneira, as normas para medições acústicas indicam para uma melhor obtenção nos dados o uso de uma fonte omnidirecional (BRUEL E KJAER, 2016).

As fontes omnidirecionais, utilizam de um grupo de 12 alto-falantes em uma configuração dodecaédrica que irradia som igualmente em uma distribuição esférica. Os alto-falantes estão conectados em série e paralelo para garantir que todos trabalhem em fase e com uma impedância que corresponda com a do amplificador. A montagem deste tipo de fonte é leve e, normalmente, vem com tripé que não interfere nas medições (BRUEL E KJAER, 2016). A Figura 5 mostra um exemplo de fonte omnidirecional.



Figura 5 - Fonte Sonora Omnidirecional Dodecaédrica
Fonte: GROM 2016

2.3.2 Fontes Cilíndricas

Uma fonte cilíndrica é caracterizada pela emissão sonora uniforme segundo a forma de um cilindro. São diferentes das fontes esféricas, uma vez que apresentam uma redução de 3 dB no nível de pressão sonora, de acordo com a relação de dobro da distância da fonte sonora (NEPOMUCENO, 1994). Um exemplo de fonte cilíndrica é uma rodovia com carros em movimento, conforme mostra a Figura 6.

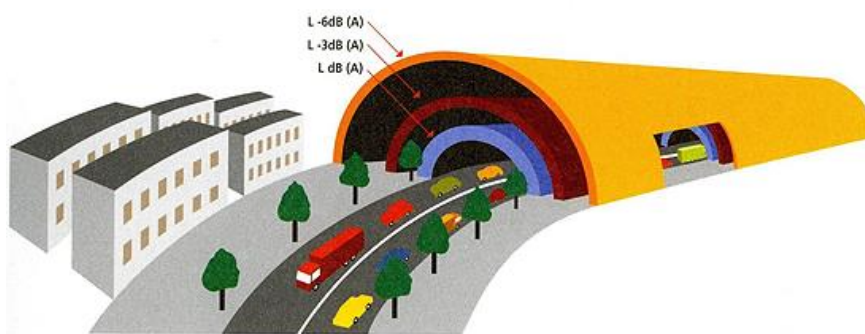


Figura 6 - Fonte Cilíndrica
Fonte: Almada 2007

2.4 Campo Sonoro

Campo o sonoro é definido como o meio em que o som é transmitido, ou seja, através de perturbações nas variáveis que descrevem o meio. Em um meio fluido, essas variáveis são a temperatura, energia interna, pressão e densidade. A pressão, em um meio fluido, é a variável que melhor pode descrever esse campo uma vez que resulta em valores escalares e é facilmente medida não precisando mais que uma aferição (BIES E HANSEN, 2002).

2.4.1 Classificação de campos sonoros quanto à sua distância da fonte

2.4.1.1 Campo Sonoro Próximo

O campo sonoro próximo é uma região próxima à fonte sonora, em que a pressão acústica e a velocidade de propagação da onda estão fora de fase. É limitado a uma distância da fonte igual a cerca de um comprimento de onda de som ou igual a três vezes a dimensão da fonte sonora. (HANSEN, 2002)

2.4.1.2 Campo Sonoro Remoto

Inicia-se onde o campo sonoro próximo termina e se estende até o infinito. Devido a essa grande distância, à pressão sonora e à velocidade, estarão sempre em fase (HANSEN, 2002).

2.4.2 Classificação de campos sonoros quanto à sua refletividade das ondas propagadas no seu interior

2.4.2.1 Campo Sonoro Reverberante

O campo sonoro no interior de uma câmara reverberante em regime permanente, é uma combinação do som que provém direto da fonte com o som que é refletido pelas superfícies que delimitam a câmara (KINSLER, FREY, COPPENS E SANDERS, 1982).

2.4.2.2 Campo Sonoro Livre

Campo onde não existe obstáculo próximos da fonte, só há reflexão no chão, a potência sonora é distribuída igualmente em todas as direções. Dificilmente encontra esse tipo de campo, em uma câmara semi-anecóica pode reproduzir esse campo (BRUEL E KJAER, 1984).

A Figura 7 mostra o comportamento da pressão sonora em função do logaritmo da distância, nota-se que o campo próximo tem uma grande oscilação em função de uma diferença de fase entre a velocidade de propagação e a pressão acústica, a partir do limiar do campo distante começa a existir a tendência de haver a convergência dessa fase.

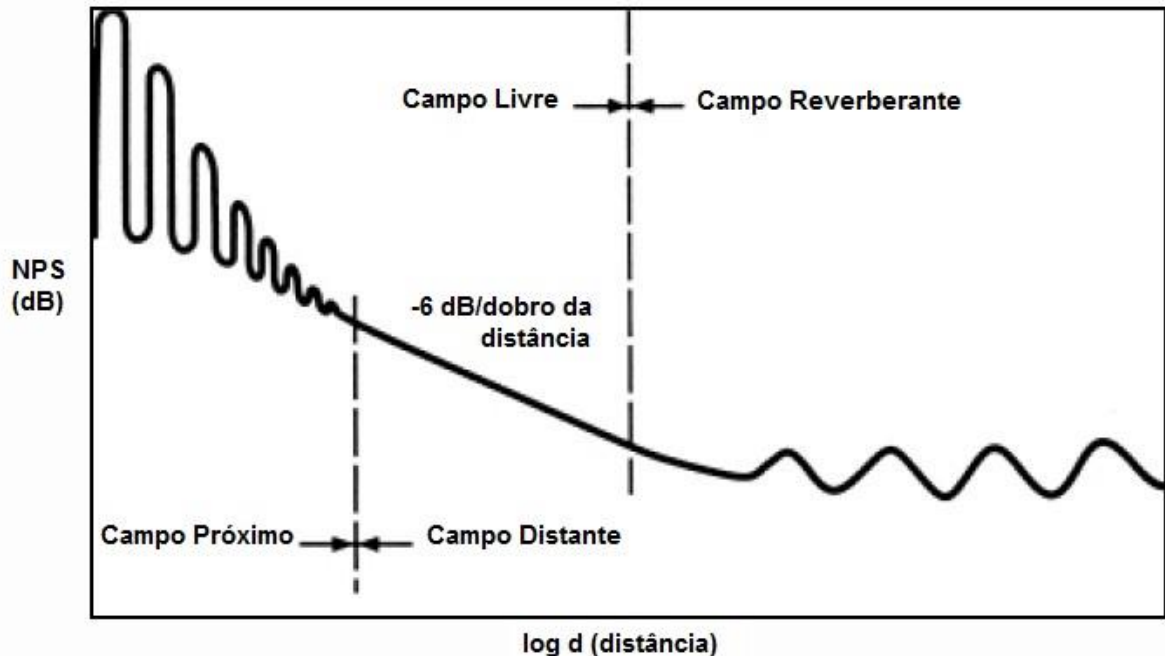


Figura 7 - Nível de Pressão Sonora x Log distância

Fonte: LOOKLINE 2016

2.5 Propagação de ondas sonoras

A propagação das ondas sonoras se dá em meios materiais, sejam eles sólidos, líquidos ou gasosos. Estes meios podem ser unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais (LAZZETA 2012). A propagação é do movimento e

não das partículas do meio e estas, por sua vez, apenas oscilam próximas à posição de repouso.

A propagação da onda sonora estudada neste trabalho será a propagação esférica, que é o modo mais comum de propagação das ondas sonoras.

2.5.1 Propagação da Onda Esférica

O mecanismo de propagação das ondas esféricas se dá pelas frentes de onda que, segundo Perosi (2000), é o lugar onde a onda se situa após ter transcorrido um determinado tempo após a saída da fonte. A propagação das ondas geradas por uma fonte pontual será esférica se o meio for isotrópico e homogêneo. As frentes de onda são perpendiculares aos raios de propagação, conforme mostra a Figura 8.

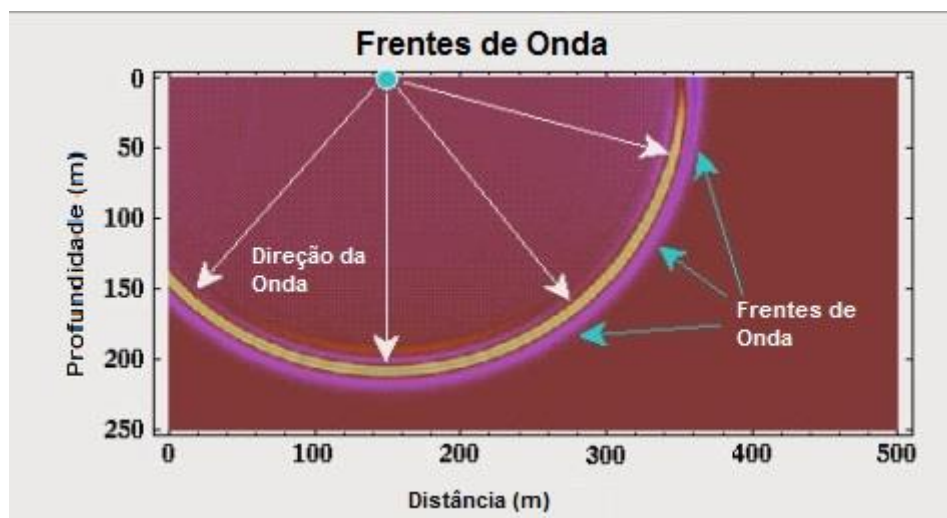


Figura 8 - Propagação da Onda Esférica
 Fonte: Adaptado de Boyd (1999) apud Perosi (2000)

2.6 Ruído

O ruído é um sinal acústico aperiódico, o qual se origina da superposição de vários movimentos de vibração, com diferentes frequências e que estas não apresentam relação entre si (RUSSO, 1993). O ruído pode ser caracterizado como

qualquer distúrbio sonoro que interfere com aquilo que se quer ouvir (SANTOS E MATOS, 1996).

2.6.1 Classificação dos Ruídos Quanto ao Nível de Pressão

O nível de pressão sonora é utilizado para classificar o ruído, como descrito na Norma ISO 2204/1973. Dentre eles:

- i) Ruído Contínuo Estacionário: Caracterizado pelas variações de níveis desprezíveis durante a observação como por exemplo um ventilador ligado;
- ii) Ruído Contínuo Não Estacionário: Caracterizado pelo nível variação significativo durante a observação como visto em um tráfego de automóveis;
- iii) Ruído Contínuo Flutuante: Caracterizado pela variação contínua do nível de pressão sonora durante a observação.



Figura 9 - Ruído Contínuo Estacionário

Fonte: Fernandes (2005)



Figura 10 - Ruído Flutuante

Fonte: Fernandes (2005)

iv) Ruído Intermitente: Ruído cujo nível de pressão sonora cai ao valor igual ao ruído de fundo várias vezes durante o processo. Este tempo de duração pode durar por segundos ou até mais. Pode ser assumido como contínuo, para se enquadrar à norma;

v) Ruído de Impacto ou Impulsivo: E este tipo de ruído se caracteriza por possuir picos de energia acústica que duram geralmente menos do que um segundo (NETO, 2007). Seus intervalos não possuem um tempo de duração definido, durando geralmente mais do que um segundo.

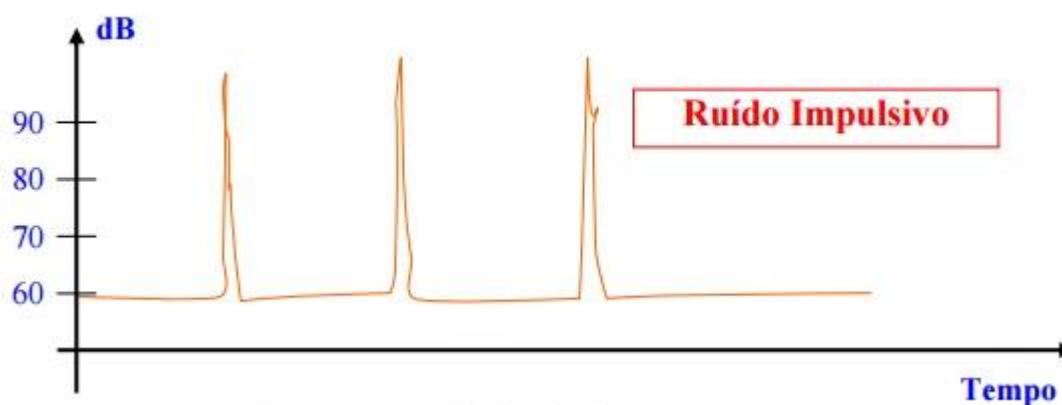


Figura 11 - Ruído flutuante

Fonte: Fernandes (2005)

2.6.2 Ruídos de teste

Ruídos artificiais que simulam situações naturais são utilizados para fazer testes em ambientes específicos. O ruído se classifica através do espectro de frequência como:

i) Ruído Branco: O sinal tem potência igual em todas as unidades de frequência bandas de frequência, como por exemplo o ruído da estática da televisão (BRAGA, 2011). apresenta igual energia em todas as frequências contidas no seu envelope de espectro na faixa de frequência de 100-10000Hz (RUSSO E SANTOS 1993). Nota-se um maior destaque para as frequências agudas, pois estas são mais facilmente perceptíveis pelo ouvido humano.

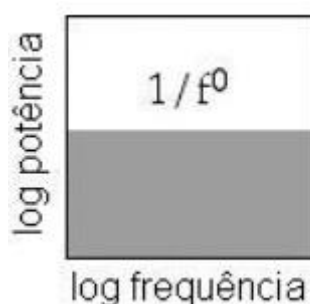


Figura 12 - Ruído Branco

Fonte: Adaptado de Gilden Lab (2013)

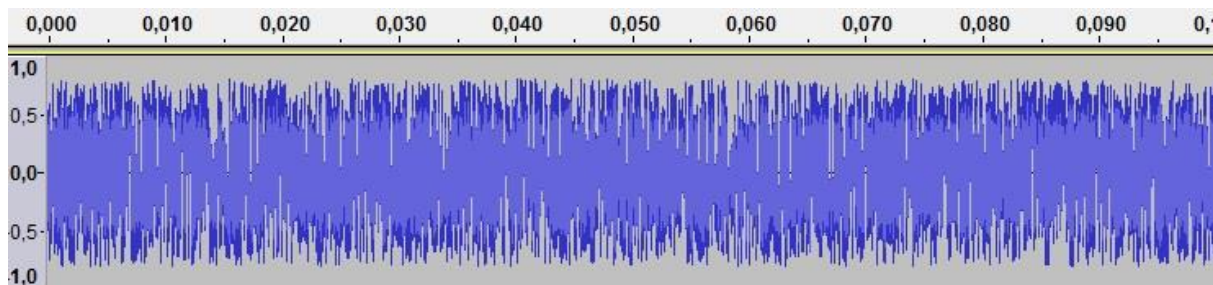


Figura 13 - Onda ruído branco

Fonte: Software Audacity 2.1.1

ii) Ruído Marrom, ou Ruído Vermelho, é um ruído que possui mais energia em frequências menores, pois a densidade espectral é inversamente proporcional ao quadrado da frequência. O som deste tipo de ruído se assemelha ao som da queda de um grande volume d'água (STANTON, 2011). A característica deste ruído, se comparado ao ruído branco, é um som mais grave, visto que há uma compensação das frequências mais baixas.

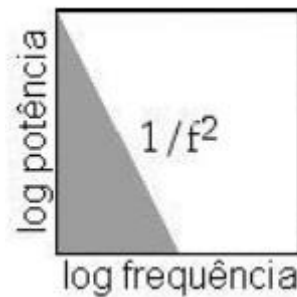


Figura 14 - Ruído marrom (vermelho)

Fonte: Adaptado de Gilden Lab (2013)

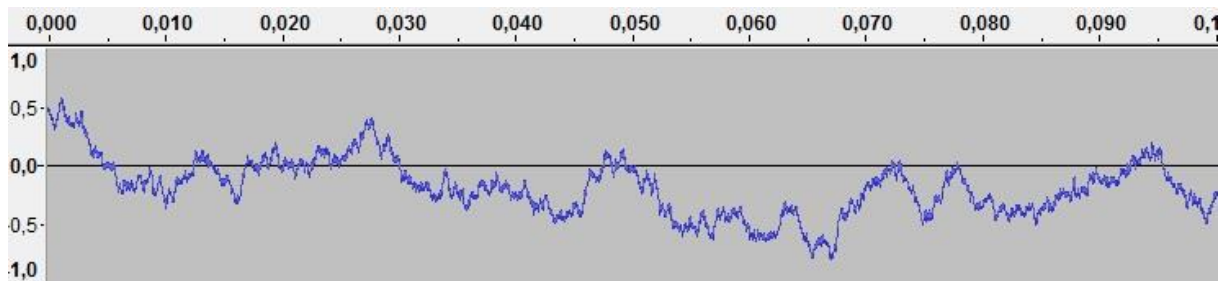


Figura 15 - Onda ruído marrom (vermelho)

Fonte: Software Audacity 2.1.1

iii) Ruído Rosa, é considerado o encontro do ruído branco e do ruído vermelho e, assim como este, possui maior energia em frequências menores. A densidade espectral é inversamente proporcional à frequência (GILDEN LAB, 2013). Concentra energia numa faixa de frequência mais estreita, sendo definido como filtragem de ruído branco, sua energia está igualmente distribuída na faixa de

freqüência de 500-4000 Hz (RUSSO E SANTOS, 1993). A característica de som deste tipo de ruído se assemelha ao ruído marrom.

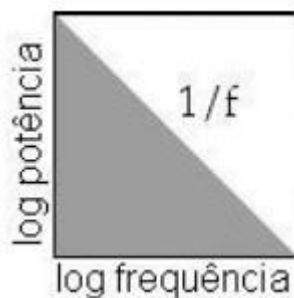


Figura 16 - Ruído rosa

Fonte: Adaptado de Gilden Lab (2013)

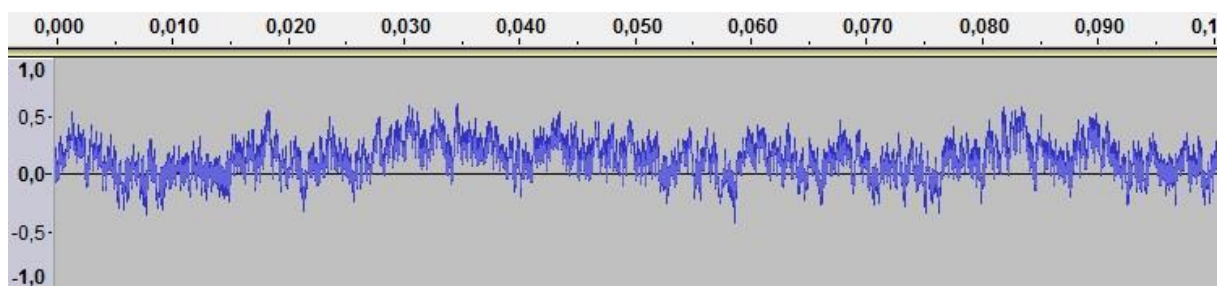


Figura 17 - Onda ruído rosa

Fonte: *Software Audacity 2.1.1*

iv) Ruído de Fala (*Speech noise*): ocorre a concentração de energia na faixa de frequências de 500-2000 Hz;

v) Ruído de Banda Estreita (*narrowband*): ocorre uma filtragem seletiva do ruído branco, com o uso de vários filtros eletrônicos ativos, cada um dos quais deixando passar sua banda centrada na freqüência do tom teste.

2.7 Medição Acústica

Para se analisar os níveis de ruído em um ambiente, deve-se utilizar de medições acústicas que podem ser uma simples avaliação local ou um levantamento extremamente refinado. Segundo Fernandes (2005), as medições devem ser guiadas por normas internacionais adotando-se a metodologia mais apropriada para a situação, deve-se ter um cuidado com a instrumentação para os ensaios, assim como a forma de analisar os dados obtidos.

2.7.1 Curvas de Ponderação

Devido ao fato do ouvido humano não ser igualmente sensível ao som em todo o espectro de frequência, foram criadas curvas de ponderação para que os aparelhos de medição de potência sonora realizem suas medições de acordo com a sensibilidade do ouvido humano (FERNANDES, 2002).

A curva de ponderação do tipo "A" atenua sons graves inferiores a 1kHz, dá maior ganho para as bandas de frequência entre 2 a 5kHz e atenua levemente os agudos superiores a 8kHz, tal qual a percepção do ouvido humano (FERNANDES, 2002). A curva de ponderação do tipo "C" foi incorporada aos medidores para o caso de haver a necessidade da realização de uma medição de todo o som do ambiente, sem filtros, como no caso da avaliação de sons de baixas frequências. A Figura 18 elucida a comparação das curvas de ponderação dos tipos "A" e "C".

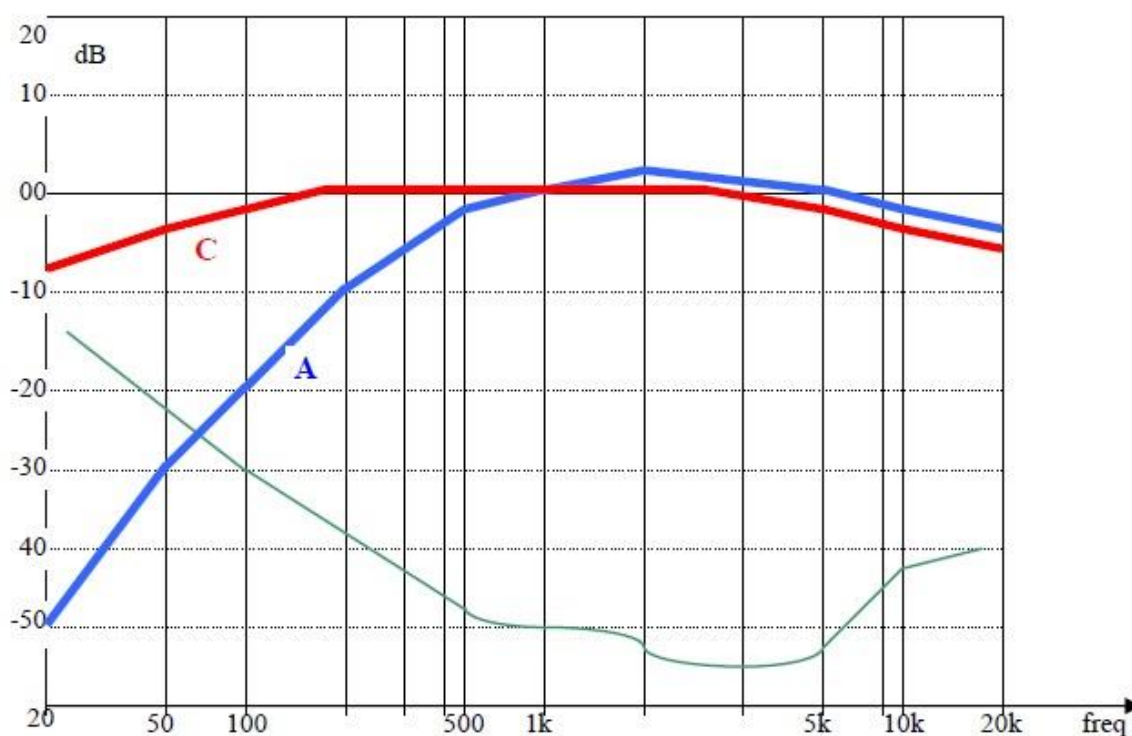


Figura 18 - Curvas de Ponderação A e C

Fonte: FERNANDES, 2002

2.7.2 Tipos de Medição Acústica

As medições acústicas são classificadas em dois tipos:

- i) Quanto ao método empregado na medição;
- ii) Quanto à natureza da fonte emissora.

2.7.2.1 Quanto ao Método Empregado na Medição

2.7.2.1.1 Nível de Potência Sonora

É medida através da pressão sonora emitida pela fonte. Este método mede a quantidade de energia total que uma fonte emite por unidade de tempo. O equacionamento deste tipo de método está descrito nas normas ISO 374X e será abordado posteriormente no tópico 2.7.6.

2.7.2.1.2 Nível de Intensidade Sonora

A intensidade sonora de um determinado ponto, em uma direção específica, pode ser calculada pela taxa média de energia sonora transmitida na direção por uma unidade de área normal a esta direção no ponto específico (LMS, 2013). O equacionamento deste tipo de método está descrito nas normas ISO 374X e será abordado posteriormente no tópico 2.7.7.

2.7.2.1.3 Demais Métodos de Medição Acústica Relacionado à Natureza do Som

- i) Medição dos parâmetros arquitetônicos;
- ii) Medição do nível de isolamento acústico;
- iii) Medição da exposição ao ruído.

2.7.2.2 Quanto à natureza da fonte de emissão

2.7.2.2.1 Medição de Ruídos Contínuos

Este tipo de medição é feita aproximando o medidor do nível de pressão sonora da fonte sonora e a leitura do ruído local é feita. Em função do ruído ser contínuo, deve-se verificar uma baixa variação nos valores de leitura. Para a realização da leitura, o medidor deve estar utilizando a curva de ponderação A e com a constante de tempo em lenta (*Slow* = RMS da pressão sonora em 1 segundo) (FERNANDES, 2005).

2.7.2.2.2 Medição de Ruídos Flutuantes

O objetivo deste tipo de medição é encontrar um valor equivalente que represente as variações de pressão sonora (FERNANDES, 2005).

O método do Nível de Som Contínuo Equivalente L_{eq} , considera que o som é uma fonte de energia e então não apenas a sua intensidade deve ser levada em consideração, mas também sua duração. O nível de som contínuo equivalente é obtido pela Equação 3:

$$L_{eq} = 10 \log \int_0^t \frac{P_{\alpha}(t)}{P_0} dt \quad (3)$$

Para a realização da leitura, o medidor deve estar utilizando a curva de ponderação A e com a constante de tempo em lenta (*Slow* = RMS da pressão sonora em 1 segundo) (FERNANDES, 2005).

2.7.2.2.3 Medição de Ruídos de Impacto

Ainda é um método impreciso e por conta disso uma aproximação é aconselhada pela Norma ISO. Tal aproximação sugere o nível medido em dB na curva "A", com resposta lenta, mais de 10 dB, porém este critério é impreciso para fontes que gerem impactos maiores, como por exemplo prensas hidráulicas, britadeiras, etc (FERNANDES, 2005).

Este tipo de som também pode ser medido pelo método da escala do "valor de pico", que consiste em tomar como referência o maior valor obtido durante medição (FERNANDES, 2005).

2.7.3 Aparelhos de Medição Acústica

2.7.3.1 Medidores de Pressão Sonora

Na aferição da pressão sonora, deve-se utilizar instrumentos que estejam regulados pela IEC (*International Electrotechnical Commission*) e do ANSI (*American Standards Institute*) (FERNANDES, 2005).

Os medidores de pressão com boa acurácia, geralmente são compostos por microfone, atenuador, circuitos de equalização, circuitos integrados, mostrador (digital ou analógico) graduado em dB, calibrador. A faixa de medida fica no intervalo de 30 a 140 dB, no mínimo, 2 constantes de tempo : lenta (*slow*) ou rápida (*fast*) e 2 curvas de ponderação.

2.7.3.2 *Microfones*

São transdutores que transformam a energia acústica em elétrica. Existem dois componentes básicos em qualquer microfone: O diafragma e o elemento gerador. O diafragma é uma pequena membrana que, exposta ao campo sonoro, vibra de acordo com o campo incidente cabendo ao elemento gerador converter estas vibrações em tensão elétrica (ROCHA, 2004).

Os microfones são geralmente classificados pelo elemento gerador ou padrão polar. Os principais tipos são o dinâmico, capacitor e o eletreto.

Nos microfones dinâmicos uma bobina móvel imersa num campo magnético permanente acompanha o movimento da membrana, induzindo tensão elétrica nos terminais da bobina.

No microfone a capacitor (ou condensador) o elemento gerador é composto por um capacitor de placas paralelas e um pré-amplificador sendo que uma das placas é fixa e a outra móvel (ROCHA, 2004).

O microfone condensador geralmente fornece uma medição mais precisa e consistente (BIES E HANSEN, 2002).

Os microfones de eletreto são semelhantes aos de capacitor diferindo no fato que o eletreto é carregado permanentemente, não necessitando de polarização externa (ROCHA, 2004).

Quanto ao padrão polar existem vários tipos conforme a Figura 19. O padrão polar indica a sensibilidade tridimensional do microfone em relação ao seu eixo.

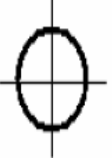
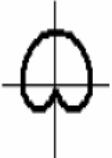



Característica	Omni-direcional	Cardióide	Super-cardióide	Hyper-cardióide	Bi-direcional
Padrão de resposta polar					
Eq. polar	1	$1/2 (1 + \cos \theta)$	$0,37 + 0,63 \cos \theta$	$1/4(1 + 3 \cos \theta)$	$\cos \theta$
Ângulo de cobertura	360°	131°	115°	105°	90°
Ângulo de rejeição máx.	—	180°	126°	110°	90°
Rejeição traseira	0	25dB	12dB	6dB	0

Figura 19 - Padrões polares dos microfones

Fonte: Cysne, 2000

2.7.3.3 Pré-Amplificador

A saída de um microfone condensador gera um sinal de alta impedância, portanto, muito sensível às cargas capacitivas dos cabos. Com isso torna-se necessário introduzir um *driver* com alta impedância de entrada e baixa impedância de saída. Esse *driver* é chamado de pré-amplificador.

A gama de frequências de um pré-amplificador é determinada pelo seu circuito eletrônico e é tipicamente superior a 200 kHz na extremidade superior e 1-10 Hz na extremidade inferior. A extremidade inferior é determinada pela impedância de entrada do pré-amplificador e pela capacitância do microfone. A alta capacitância do microfone dá uma baixa frequência de corte.

Existem hoje dois princípios diferentes de um pré-amplificador no mundo da acústica. Um é o tipo tradicional para microfones polarizados externamente, muitas vezes referido como o tipo "LEMO" por causa de seu conector de 7 pinos e tornou-se um padrão da indústria. Ele é voltado à tensão e pode lidar com sinais de alta tensão até 50 volts de pico.

O outro princípio utiliza uma fonte de corrente contínua (CCP) e foi introduzido por volta de 1996 no mundo da acústica de alta precisão. Antes disso, a qualidade dos pré-amplificadores CCP não era tão boa quanto os tipos LEMO, mas isso não é o caso atualmente. Um pré-amplificador CCP utiliza uma fonte de alimentação de corrente constante, que deve estar entre 2mA e 20mA (nominalmente 4 mA), para produzir um nível de tensão nominal constante de 12 Volt DC (referido como tensão de polarização). O sinal de saída do microfone sobrepõe as flutuações em torno deste nível DC. A grande vantagem dos pré-amplificadores CCP é que eles usam um sistema de dois fios, onde o sinal é sobreposto ao fio através do qual a corrente é mantida constante (GRAS SOUND AND VIBRATION, 2016). A Figura 20 ilustra um pré-amplificador utilizado em acústica de precisão.



Figura 20 - Pré-amplificador

Fonte: Direct Industry, 2013

2.7.3.4 Calibrador

É composto de uma fonte sonora, um microfone de referência e um circuito de controle eletrônico. O microfone de referência especial é extremamente estável e independe das variações na pressão barométrica, temperatura e umidade. O microfone de referência e o circuito de controle juntos mantêm um nível de pressão sonora constante dentro da câmara de calibração e ajustam-se automaticamente

para mudanças no volume de carga, temperatura, umidade e pressão barométrica.(GRAS SOUND AND VIBRATION, 2016)

Devem seguir as normas IEC 61094-1 (“Microfones de medição. Parte 1: Especificações para microfones padrão de laboratório”) e IEC 61094-4 (“Microfones de medição. Parte 4: Especificações para microfones padrão de trabalho”). A Figura 21 ilustra um modelo de calibrador acústico:



Figura 21 - Calibrador acústico

Fonte: 3M

2.7.4 Ambientes para Medição Acústica

São dois os tipos de ambientes para medições acústicas: Câmaras Anecóicas e Câmaras Reverberantes.

2.7.4.1 Câmara Anecóica

Câmaras Anecóicas são ambientes com máxima absorção de ondas e mínima reflexão (HELENO, 2006). Corresponderem a câmaras com baixa frequência de corte, na ordem de dezenas de Hertz (SEGURA, 2011) e com elevado isolamento a ruídos externos (HELENO, 2006). Este tipo de câmara é utilizada para desenvolvimento de

produtos e permite medir apenas o equipamento testado, sem interferência da reflexão sonora de outras superfícies (KREMPEL, 2015).

A frequência , a partir da qual a absorção sonora é igual ou superior a 99%, é chamada de *Cut-Off* ou frequência de corte. A absorção sonora é feita através de cunhas, painéis acústicos ou outros tipos de absorventes, de acordo com o solicitado, e são instalados nas paredes, teto e piso (KREMPEL, 2015).

O custo das câmaras anecóicas são altos, em função do tamanho físico da sala e dos equipamentos de construção (HELENO, 2006), pois os absorventes têm uma grande variedade de materiais, como lã de vidro, espuma, aço, alumínio, e sendo assim, uma gama elevada de preços (KREMPEL, 2015).

A Figura 22 mostra uma câmara anecóica revestida por cunhas.



Figura 22 - Câmara Anecóica

Fonte: Krempel, 2015

2.7.4.2 Câmara Reverberante

Câmaras de reverberação são ferramentas importantes na área acústica, usados em uma variedade de medições padronizadas, por exemplo, na medição da absorção de materiais, na potência sonora de ruídos fontes. Segundo Fernandes

(2002), a resposta típica de uma sala pode ser dividida em 3 regiões, conforme ilustrado na Figura 23. A primeira consiste no campo direto do som, a segunda é formada pelas primeiras reflexões do som em paredes refletivas e a terceira é formada pela parte reverberante da resposta, onde a densidade de reflexões é tão elevada que não se difere das reflexões individuais.

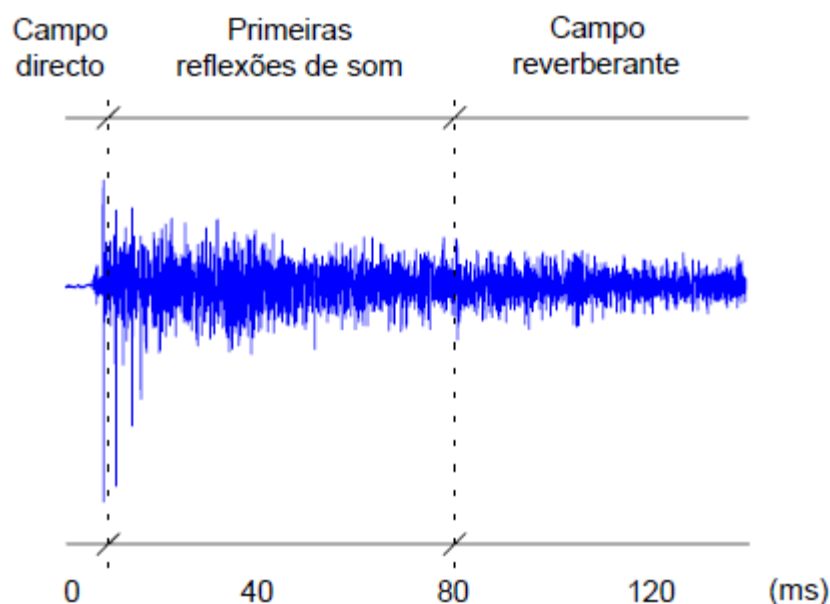


Figura 23 - Reverberação

Fonte: FERNANDES (2002)

2.7.4.2.1 Tempo de Reverberação

É definido como o intervalo de tempo, em segundos, que é necessário para que o nível de pressão sonora decaia 60 decibéis (BERANEK, 1990) a partir da interrupção da emissão sonora. Esta grandeza está relacionada ao volume e à absorção da sala. Por conveniência, as medições dos tempos de reverberação utilizam os decaimentos de 20dB ou 30dB e através da interpolação matemática são obtidos os valores para o (60dB). Segundo Sabine, pode ser calculado pela Equação 4:

$$A = 0,16 \frac{V}{T_R} \quad (4)$$

Onde V é o volume em total da sala e A é área total de absorção influenciada pelo coeficiente de absorção.

2.7.5 Superfície de Medição

É a superfície hipotética onde as medições são realizadas. As mais recomendadas são a paralelepédica, semi-esférica e cilíndrica, descritas pela ISO 3744-1:2010.

2.7.5.1 Superfície de um Paralelogramo

O Anexo C da norma ISO 3744:2010 descreve a montagem da superfície de medição em formato de um paralelepípedo para de máquinas de pequeno, médio e grande porte. A Figura 24 exemplifica a construção da superfície de medição em formato de paralelogramo para uma máquina de pequeno porte.

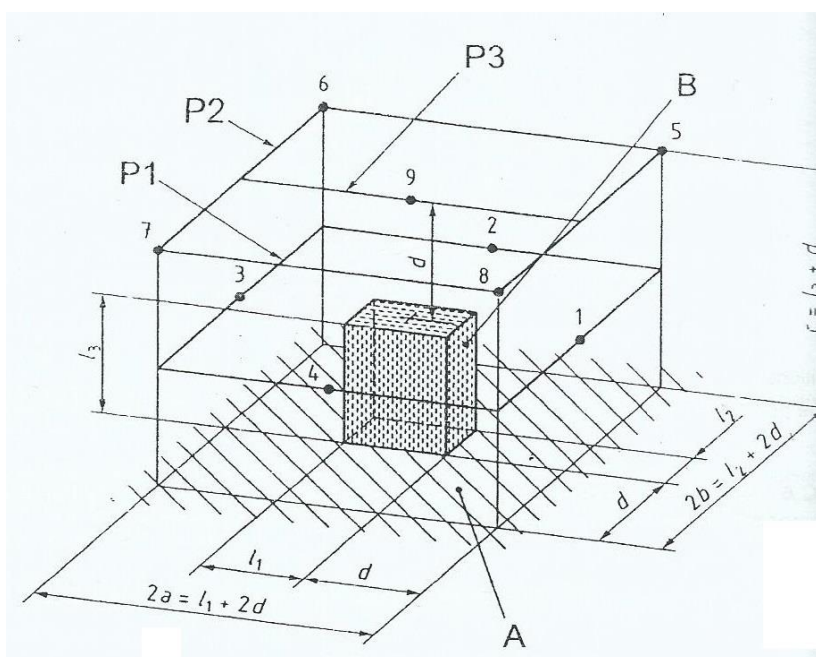


Figura 24 - Exemplo de Superfície de Medição

Fonte: ISO 3744-1:2010

Onde:

- é a posição-chave do microfone;

A é o plano de reflexão;

B é a caixa de referência;

$2a$ é o comprimento da superfície de medição;

$2b$ é a largura da superfície de medição;

c é a altura da superfície de medição;

d distância do objeto até a superfície de medição;

l_1 é o comprimento da caixa de referência;

l_2 é a largura da caixa de referência;

l_3 é a altura da caixa de referência.

Sendo que:

$$l_1 \leq d; l_2 \leq d; l_3 \leq d$$

2.7.5.2 Superfície de uma semi-esfera

O Anexo B da norma ISO 3744:2010 descreve a montagem da superfície de medição em formato de uma semi-esfera. A Figura 25 exemplifica a construção da superfície de medição em formato de semi-esfera máquina de pequeno porte.

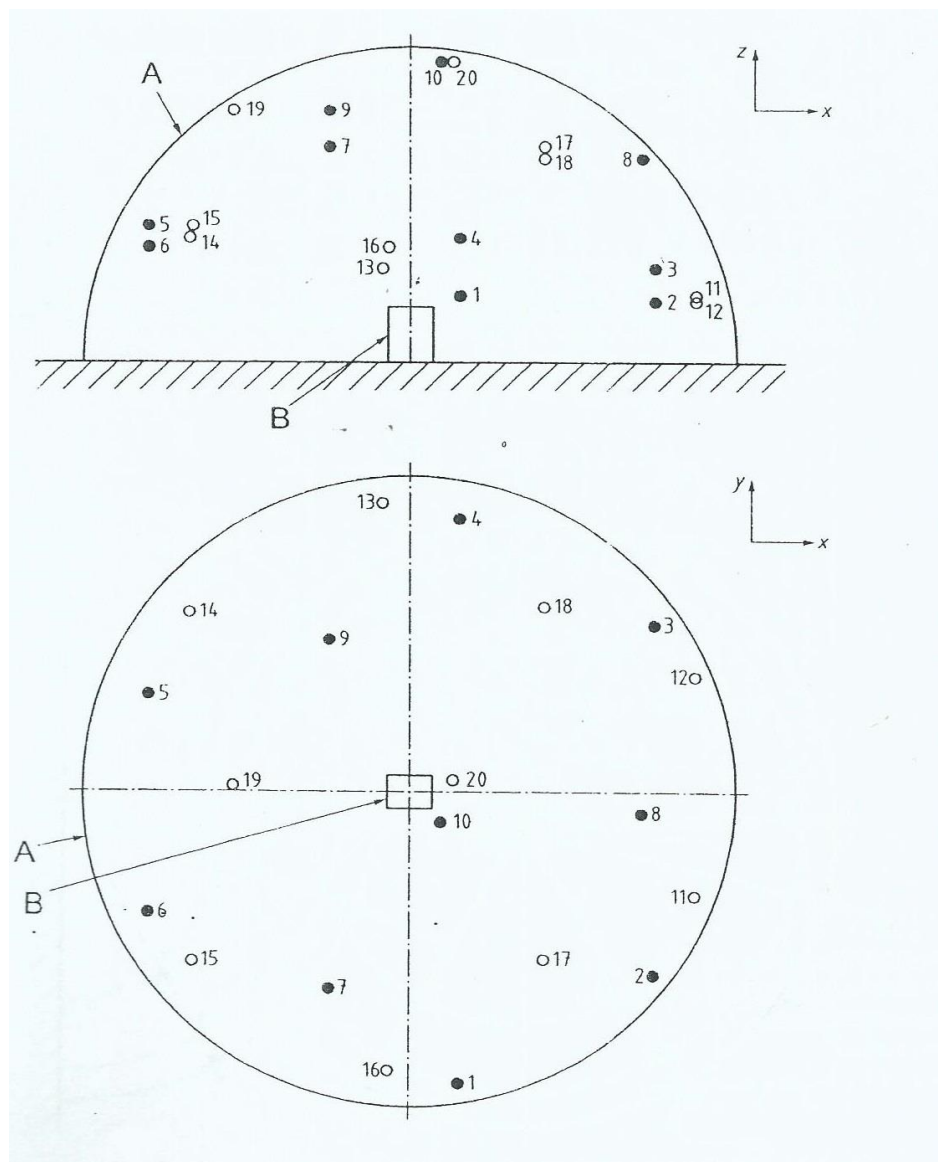


Figura 25 - Superfície de uma semi-esfera
Fonte: ISO 3744-1:2010

- Pontos de posição-chave dos microfones (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10);
 - ° Pontos adicionais dos microfones (11,12,13,14,15,16,17,18,19,20);
- A é a superfície de medição;
- B é a caixa de referência.

2.7.5.3 Superfície Cilíndrica

O Anexo D da norma ISO 3744:2010 descreve a montagem da superfície de medição em formato de um cilindro. A Figura 26 exemplifica a construção da superfície de medição em formato de cilindro.

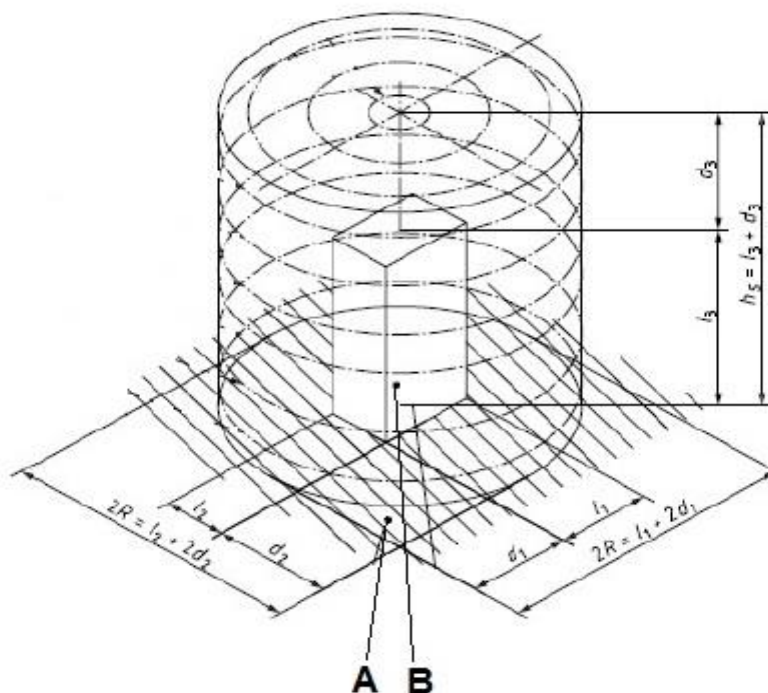


Figura 26- Superfície cilíndrica

Fonte: ISO 3744

Onde:

A é o plano de reflexão;

B é a caixa de referência;

d_1 é a distância de medição (comprimento);

d_2 é a distância de medição (largura);

d_3 é a distância de medição (altura);

h_s é a altura da superfície de medição.

l_1 é o comprimento da caixa de referência;

l_2 é a largura da caixa de referência;

l_3 é a altura da caixa de referência;

$2R$ é o diâmetro da superfície de medição.

2.7.6 Incertezas das medições

Os erros de medição podem ser divididos em dois tipos, erros de polarização e erros aleatórios. Erros aleatórios revelam-se por má repetitividade e reprodutibilidade. Por isso, é sempre recomendado que se repita as medições (JACOBSEN, 1997).

A medição da intensidade sonora pode ser afetada pelo tipo do campo sonoro em que as medições são realizadas. Campos sonoros reativos ou reverberantes podem gerar erros de leitura durante as medições. Campos sonoros ativos ou livre não causam erros de medições sendo então o tipo de campo sonoro indicado para medições de intensidade sonora (FAHY, 1989) (CROKER e ARENAS 2003).

2.7.7 Medição de Potência Acústica

Para Menegotto e Couto (1998) “a potência sonora pode ser analisada sob o ponto de vista da intensidade sonora (fluxo de energia) ou da pressão (pressão que as moléculas exercem)”.

2.7.7.1 Medição de Potência Acústica em uma Câmara Reverberante Pelo Método da Pressão Sonora

A medição da potência acústica em câmaras reverberantes sofre influência de fatores externos, devido a falta de isolamento acústico da câmara, o microfone acaba por captar não somente o sinal que provém direto da fonte, porque este também sofre reflexão e absorção pela falta de isolamento da câmara, e também existe a presença de um ruído de fundo no local (FELÍCIO, 2008).

As abordagens a seguir a respeito do equacionamento e da metodologia de cálculo do nível de potência sonora estão descritos na norma ISO 3744:2010 e serão abordadas a seguir.

O nível de potência sonora, \overline{L}_w , é descrito pela Equação 5 abaixo:

$$\overline{L}_w = \overline{L}_p + 10 \log \frac{S}{S_0} \quad (5)$$

Sendo que \overline{L}_p é a média dos níveis de pressão da superfície em medição, em dB, utilizando a curva de ponderação A. S é a área de medição, em m² e S₀ é a área de referência, de valor igual a 1m².

O valor de \overline{L}_p pode ser obtido pela Equação 6 :

$$\overline{L}_p = \overline{L}'_{P(ST)} - K_1 - K_2 \quad (6)$$

Onde $\overline{L}'_{P(ST)}$ é o nível médio da pressão sonora na superfície de medição, utilizando a curva de ponderação A. Além disso, é indispensável o cálculo de dois fatores de correção: Fator de correção K_1 que corresponde ao fator de correção para o ruído de fundo e o fator K_2 que é o fator de correção ambiental baseado na absorção da sala. Estes fatores de correção serão devidamente descritos na seqüência desta fundamentação teórica.

2.7.7.1.1 Determinação do Valor Médio de Pressão Sonora Sobre a Superfície de Medição

É necessário realizar pelo menos uma medição de pressão sonora no centro de cada face e mais uma em cada vértice acima do plano de reflexão do paralelepípedo de medição, totalizando um mínimo de 9 medições do nível de pressão, tal qual orienta o anexo C da norma ISO 3744:2010. Desta maneira, a partir das medições realizadas, e considerando que as superfícies da caixa de referência não sejam todas iguais, o valor é encontrado pela Equação 7:

$$\overline{L}'_{P(ST)} = 10 \log \left[\frac{1}{S} \sum_{i=1}^{N_M} S_i * 10^{0,1L'_{pi(ST)}} \right] dB \quad (7)$$

Onde N_M é o número de posições do microfone e $L'_{pi(ST)}$ é o valor de medição de pressão sonora referente à superfície i do paralelepípedo de medição, utilizando a curva de ponderação A. Temos ainda S_i que é a área, em m^2 , da superfície em que o microfone está fazendo a medição e, por fim, temos S que é a área total de medição, em m^2 , sendo que:

$$S = \sum_{i=1}^{N_M} S_i \quad (8)$$

2.7.7.1.2 Determinação do Valor Médio de Pressão Sonora do Ruído de Fundo no Ambiente de Medição

A obtenção do ruído de fundo é feita a partir de uma medição direta do ruído do ambiente através de um medidor integrador. A norma descreve que são necessárias no mínimo duas medições para garantir que o processo tenha repetitividade.

Para o cálculo do ruído de fundo médio no ambiente, utilizamos a Equação 9 a seguir:

$$\overline{L'_{P(B)}} = 10 \log \left[\frac{1}{S} \sum_{i=1}^{N_M} S_i * 10^{0,1L'_{pi(B)}} \right] dB \quad (9)$$

Sendo que $L'_{pi(B)}$ é o valor da pressão sonora do ruído de fundo medido pelo microfone na posição i .

2.7.7.1.3 Fator de correção do ruído de fundo

O fato de correção do ruído de fundo K_1 ser calculado utilizando a Equação 10:

$$K_1 = -10 \log(1 - 10^{-0,1\Delta L_p}) \text{dB} \quad (10)$$

Sendo que ΔL_p é dado pela Equação 11:

$$\Delta L_p = \overline{L'_{P(ST)}} - \overline{L'_{P(B)}} \quad (11)$$

Temos pelas definições que $\overline{L'_{P(ST)}}$ e $\overline{L'_{P(B)}}$ são o valor médio da pressão sonora sobre a superfície de medição e do ruído de fundo no ambiente de medição, respectivamente.

Como definido na ISO 3744:2010, temos:

Se $\Delta L_p > 15\text{dB}$, então K_1 pode ser tomado como sendo zero e, conseqüentemente, nenhuma correção para o ruído de fundo precisa ser aplicada.

Se $6\text{dB} \leq \Delta L_p \leq 15\text{dB}$, então a correção pode ser calculada pela Equação 10, anteriormente descrita nesta seção.

Se $\Delta L_p < 6\text{dB}$, para uma ou mais bandas de 1/3 de oitava, a precisão dos resultados pode ser prejudicada e o valor que pode ser aplicado a K_1 seria igual a 1,3dB, que é o valor utilizado para $\Delta L_p = 6\text{dB}$. Se faz necessário então, deixar indicado nos relatórios e tabelas, que estas bandas correspondem ao limite superior ao nível de potência sonora da fonte.

2.7.7.1.4 Fator de correção do ambiente baseado na absorção da sala

Absorção é definido por Moreira (2013) como a dissipação de energia sonora da superfície de um material. Essa dissipação depende de 3 fatores, sendo eles a natureza da superfície, o ângulo de incidência da onda sonora e a condição de aplicação do sistema que integra o material.

De acordo com o Anexo A da ISO 3744:2010, o fator de correção do ambiente pode ser calculado pela equação geral:

$$K_2 = 10 \log \left[1 + 4 \frac{S}{A} \right] dB \quad (12)$$

Onde S é a área da superfície de medição, em m^2 , e A é a área de absorção da sala, em m^2 , que pode ser calculada de duas maneiras distintas.

A primeira maneira de se obter a área de absorção é através da Equação 13, que calcula o valor de A através do produto entre um coeficiente de absorção sonora médio do ambiente α , contido na Tabela 1, e a área da superfície de medição S_v .

$$A = \alpha * S_v \quad (13)$$

Tabela 1- Coeficiente de absorção sonora médio do ambiente

α	Descrição da Sala
0,05	Sala quase vazia com paredes duras lisas feitas de concreto , tijolo, gesso ou azulejos
0,10	Sala parcialmente vazia; sala com paredes lisas
0,15	Sala de geometria uniforme com móveis ou maquinário
0,20	Sala de geometria não uniforme com móveis ou maquinário
0,25	Sala com mobília estofada ou sala de maquinário com material absorvente em parte do teto ou paredes
0,30	Sala com material absorvente apenas no teto
0,35	Sala com material absorvente tanto no teto, quanto nas paredes
0,50	Sala com grandes quantidades de materiais absorventes no teto e nas paredes

Fonte: ISO 3744:2010

A segunda maneira de obtenção da área de absorção seria através da Equação da Reverberação de Sabine, descrita pela Equação 4 na seção 2.7.4.2.1. A fórmula do volume do ambiente utilizada na equação de Sabine é descrita pela Equação 14:

$$V = \text{comprimento} * \text{largura} * \text{altura} \quad (14)$$

2.7.7.2 Cálculo de Incertezas do Método da Pressão Sonora

As incertezas do nível de potência sonora, $u(L_w)$, determinadas de acordo com a ISO 3744:2010 podem ser estimadas pelo desvio padrão, σ_{TOT} , em decibéis. Este desvio padrão pode ser expresso pela Equação 15:

$$\sigma_{TOT} = \sqrt{\sigma_{RO}^2 + \sigma_{omc}^2} \quad (15)$$

Onde σ_{RO} é a incerteza associada à reprodutibilidade do método e σ_{omc} é a incerteza associada à instabilidade de operação e condições de montagem dos equipamentos, em *dB*.

2.7.7.2.1 Determinação de σ_{omc}

O desvio padrão σ_{omc} pode ser determinado a partir de medições repetidas realizadas na mesma fonte, no mesmo local e pelas mesmas pessoas, utilizando os mesmos instrumentos de medição e a mesma posição de medição, tomando o maior valor de $L'_{pi(ST)}$. No caso de uma medição com uma matriz de microfones, uma média dos valores obtidos pelo microfones é tomada, por superfície medida.

Existem também valores pré-estabelecidos para famílias de máquinas, estes valores representativos levam em conta todas as variações possíveis de funcionamento e condições de montagem que estão sendo analisadas no ensaio. A tabela 2 mostra os valores pré-estabelecidos para determinadas famílias de máquinas.

Tabela 2 - σ_{omc} das Famílias de Máquinas

Família de máquinas	σ_{omc} [dB]
Máquinas com pequena variação de potência sonora com o tempo e com o processo de medição definido adequadamente.	0,5
Maquinários com variação de fluxo de material dentro ou fora do equipamento. Máquinas com fluxo imprevisível de material.	2,0
Máquinas com variação extrema de ruído gerado, como por exemplo britadeiras e máquinas de corte de metal	4,0

Fonte: ISO 3477-1:2010

2.7.7.2.2 Determinação de σ_{RO}

A determinação do desvio padrão σ_{RO} contempla toda incerteza devido às condições e situações impostas ao teste, como por exemplo diferentes características de radiação da fonte, modificação no instrumental, diferentes implementações do método de medição.

Existem valores pré-determinados para σ_{RO} descritos na Tabela 3, extraída da ISO 3744:2010, que podem cobrir a maioria das aplicações deste método.

Tabela 3 - Desvio Padrão da Reprodutibilidade - σ_{RO}

Banda de Frequência	1/3 de Oitava Banda de frequência média [Hz]	Desvio Padrão da Reprodutibilidade, σ_{RO} [dB]
1/3 de Oitava	100 a 160	3,0
	200 a 315	2,0
	400 a 5000	1,5
	6300 a 10000	2,5
Ponderação A		1,5**

** Aplicável para fontes de ruído que emitem um som relativamente *flat* na faixa de frequência de 100Hz a 10000Hz

Fonte: ISO 3744-1:2010

Para casos especiais onde requisitos da norma não são cumpridos para uma família de máquinas, ou estas possuem um valor pré-determinado diferente menor do que os indicados na Tabela 3, um teste levando em conta todos os parâmetros envolvidos na medição deve ser feito.

2.7.7.2.3 Determinação da Incerteza Expandida U

A incerteza expandida U se dá pela Equação 16 e depende do grau de confiança da medição e um fator de cobertura k . Para um grau de confiança de 95%, no qual o valor total varia entre $(L_W - U)$ e $(L_W + U)$, temos que $k = 2$. Se o intuito é a comparação do valor medido com um valor-limite, pode ser mais apropriada a aplicação um fator de cobertura para distribuição normal unilateral, e nesse caso temos $k = 1,6$.

$$U = k * \sigma_{\text{TOT}} \quad (16)$$

2.7.7.3 Medição de Potência Acústica em uma Câmara Reverberante Pelo Método da Intensidade Sonora

A principal vantagem do Método da Intensidade sonora ISO 9614, é que para determinar a potência sonora, pode medir-se em qualquer campo sonoro sem a necessidade de câmaras especiais, podendo ser realizadas sobre máquinas, componentes, inclusive quando há outras fontes emitindo ruídos. Contudo, para a sua realização, deve-se seguir os pontos previsto pela norma na superfície de medição.

As medições do nível de potência sonora pelo método da intensidade, podem ser realizadas sobre duas metodologias distintas, uma pela análise de pontos discretos ISO9614-1:1993, e outra por varredura ISO 9614-2:1993. O resultado final é o mesmo, sendo que pelo método por pontos discretos é possível de se obter uma medição mais detalhadas, e pelo método por varredura é possível de se obter uma medição mais rápida, pois esta medição já fornece uma integração da intensidade sonora sobre a área medida.

Desenvolvida por Frank Fahy em 1977, a técnica de medição de intensidade sonora utilizando dois microfones e um medidor de nível sonoro desde então, tem sido amplamente empregada devido à sua simplicidade, facilidade de calibração e operação, juntamente com a boa precisão nos resultados. Segundo Gerges, o princípio desta técnica é baseado na relação entre as pressões sonoras captadas pelos dois microfones próximos e a velocidade da partícula. A medição é feita sobre um plano, paralelo à superfície do objeto, onde a área total é subdividida várias menores por meio de uma grade imaginária de referência. A medição de todos os pontos resulta em uma completa descrição do plano de interesse, onde parâmetros acústicos como a distribuição da intensidade sonora, velocidade de partícula e diferença de fase são conhecidas.

A principal função de um padrão de medição é fornecer aos usuários uma especificação completa das condições e procedimentos de medição, em conjunto com os procedimentos de redução de dados associados e formatos de comunicação, que vai assegurar que a correta aplicação da norma produza um resultado, ou um conjunto de resultados, que se encontram dentro de um intervalo especificado sobre o verdadeiro valor para um nível de confiança (FAHY, 1995).

Segundo a ISO 9614-1 todas as medições são feitas em qualquer uma oitava ou um terço de oitava das bandas de frequência. O motivo é bastante simples, o desempenho de qualquer instrumento em termos de sua fase de incompatibilidade (ou pressão residual e índice de intensidade) é dependente da frequência, como reconhecido pela norma IEC 1043 relevante para instrumentos de medição. Na figura 27 tem-se a oitava e um terço de oitava das bandas de frequência.

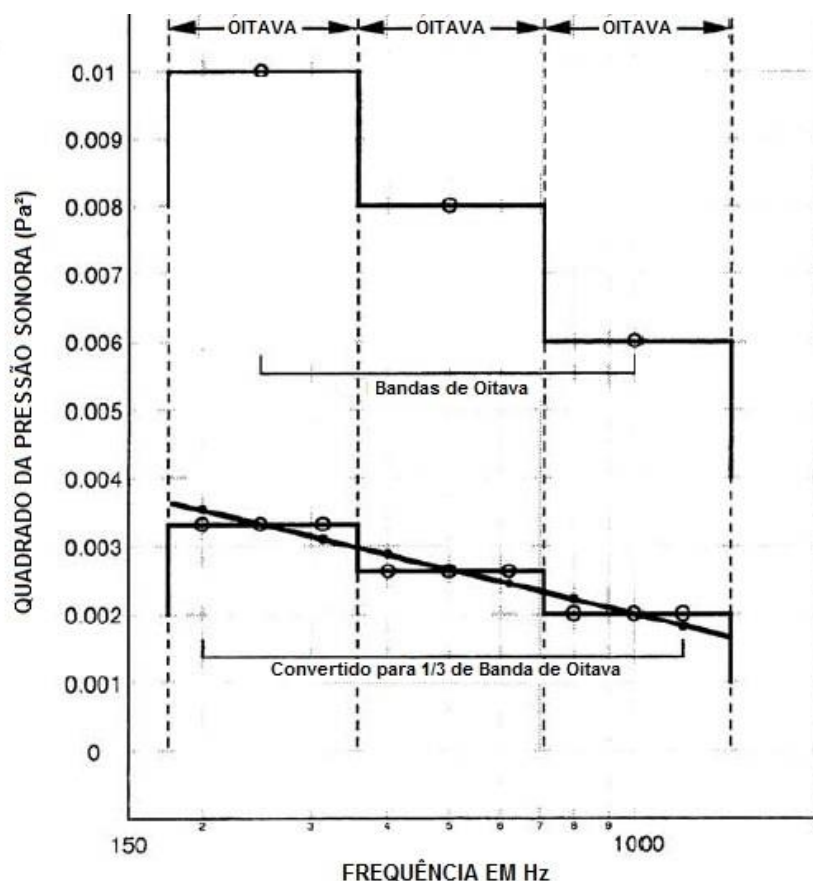


Figura 27 - Banda de freqüência de uma oitava e de um terço de oitava
 Fonte: Machado (2003)

Para entendimento da ISO 9614-1 as seguintes definições são aplicadas:

2.7.7.3.1 Intensidade Sonora Instantânea

É a taxa instantânea do fluxo de energia sonora por unidade de área superficial na direção normal do vetor de velocidade instantânea, representado na Equação 17.

$$\vec{I}(t) = p(t) \cdot \vec{u}(t) \quad (17)$$

Onde $p(t)$ é a pressão instantânea do ponto, $\vec{u}(t)$ é a velocidade instantânea no mesmo ponto e t tempo em segundos.

2.7.7.3.2 Intensidade Sonora

A intensidade sonora, \vec{I} fluxo de energia, é um vetor que descreve a quantidade e a direção do fluxo de energia acústica em uma dada posição (GADE, 1982). Portanto, tal grandeza é expressa em energia por tempo e por área, cuja unidade é watt por metro quadrado.

A intensidade $\vec{I}(t)$ na direção r é definida como:

$$\vec{I}_{r,inst} = \frac{dEr}{dt \cdot dA} \quad (18)$$

Onde dEr é a energia que atravessa o elemento de área dA , perpendicular à direção de propagação de r , em um período de tempo dt conforme a Figura 28.

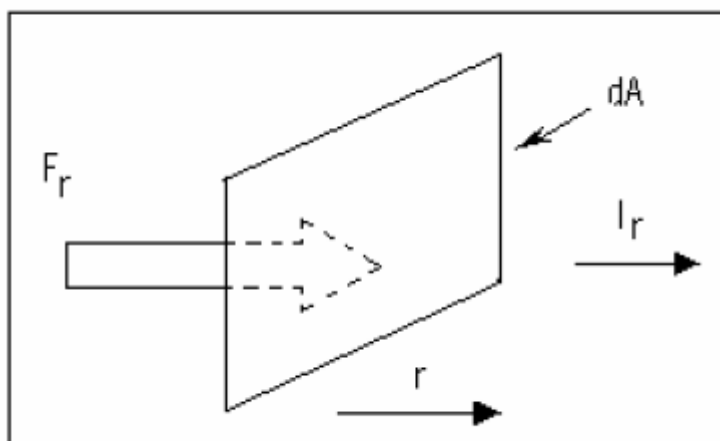


Figura 28 - Energia transportada através da área dA na direção r

Fonte: Machado (2003)

A pressão sonora pode ser facilmente calculada, contudo, o cálculo da velocidade não é tarefa fácil pois é necessário instrumentos sofisticados.

O método de medição de intensidade sonora utilizando dois microfones é baseado na relação entre as pressões acústicas captadas pelos microfones próximos e a velocidade da partícula (GERGES, 1992). Logo, baseada na segunda

lei de Newton, que é a equação do movimento (força = massa * aceleração), foi definida uma equação simplificada, chamada também de Relação de Euler (BRUEL E KJAER, 1993), expressa por:

$$\rho_0 \frac{\partial U_r}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial r} \quad (19)$$

Onde ρ_0 é a densidade do meio, $\frac{\partial U_r}{\partial t}$ é a densidade instantânea de energia e $\frac{\partial p}{\partial r}$ é o diferencial de pressão em relação à distância dos pontos medidos.

Como o gradiente de pressão é proporcional à aceleração da partícula, a velocidade de partícula pode ser obtida integrando o gradiente de pressão no tempo, conforme a Equação 20.

$$u(t) = - \frac{1}{\rho_0} \int dt \quad (20)$$

Na prática, o gradiente de pressão pode ser aproximado medindo a diferença de pressão p_A e p_B de dois microfones idênticos separados por uma distância Δr conforme a Equação 21.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{p_A(t) - p_B(t)}{\Delta r} \quad (21)$$

Deve-se ressaltar que a distância Δr tem que ser pequena em relação ao comprimento de onda.

A pressão sonora $p(t)$ é aproximada pela média $p_A(t)$ e $p_B(t)$ medidas nos dois microfones Equação 22.

$$p(t) = \frac{1}{2} [p_A(t) + p_B(t)] \quad (22)$$

Portanto,

$$I_r(t) = -\frac{1}{2\rho_0\Delta r} [p_A(t) + p_B(t)] \int [p_A(t) - p_B(t)] \quad (23)$$

2.7.7.3.3 Potência Sonora

Representada por P é a potência sonora total gerada pela fonte cuja equação é.

$$|P| = \left| \sum_{i=1}^N P_i \right| \quad (24)$$

Onde N é o número de segmentos medidos na superfície.

2.7.7.3.4 Nível de Potência Sonora

Representado por L_w é a medida logarítmica da potência sonora gerada pela fonte em dB é dado pela Equação 25.

$$L_w = 10 \log \left| \frac{P}{P_0} \right| \quad (25)$$

Onde P é a magnitude da potência sonora da fonte e P_0 é a potência sonora de referência, que assume o valor de 10^{-12} watts .

2.7.7.3.5 Indicadores de Campo

Ao tentar analisar a potência sonora irradiada a partir de um ruído de uma fonte *in situ*, a norma internacional ISO 9614-1 descreve uma série de condições de medição que devem ser aplicadas para se obter resultados aceitáveis. Deve ser satisfeita uma série de critérios, com base nos valores de funções de indicador para garantir a adequação das medições e bandas de frequência. Esta seção descreve tanto os indicadores de campo como os critérios utilizados para avaliar os resultados.

2.7.7.3.5.1 Indicador de variabilidade do campo sonoro

O indicador de variabilidade temporal também chamado de fator F_1 , é calculado pela Equação 26.

$$F_1 = \frac{1}{I_n} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (I_{nk} - \bar{I}_n)^2} \quad (26)$$

Tal que \bar{I}_n é o valor médio das medições I_{nk} , expresso na Equação 27.

$$\bar{I}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_{nk} \quad (27)$$

2.7.7.3.5.2 Indicador superfície pressão-intensidade

Em um campo livre onde o som é apenas irradiado para fora de uma fonte, a pressão e os níveis de intensidade são iguais em magnitude. Num campo difuso ou reativo, contudo, a intensidade pode ser baixa quando a pressão é alta. Uma menor

intensidade medida pode também surgir se a onda sonora é incidente em um ângulo com a sonda, pois isso também afeta a mudança de fase detectada através da sonda. O indicador de pressão-intensidade analisa a diferença entre a pressão e os valores absolutos de intensidade. Esta função pode ser determinada numa base ponto a ponto de aquisição, mas a função F_2 aqui descrita representa o valor médio de todas as superfícies medidas.

O fator superfície pressão-intensidade, também chamado de F_2 é calculado conforme a Equação 28.

$$F_2 = \bar{L}_p - \bar{L}_i \quad (28)$$

Tal que \bar{L}_p é o nível de pressão sonora da superfície sendo calculado pela Equação 29.

$$\bar{L}_p = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1L} \right) \text{ dB} \quad (29)$$

E \bar{L}_i é o nível de intensidade na superfície normal, calculada pela Equação 30.

$$\bar{L}_i = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{I_n}{I_o} \right) \text{ dB} \quad (30)$$

2.7.7.3.5.3 Indicador de potência parcial negativa

Este indicador também examina a diferença entre a intensidade e pressão, mas neste caso a direção das intensidades é levada em conta. Assim, esta função expressa a variação entre as intensidades da fonte de investigação positiva e aqueles que são gerados por fontes negativas.

Também chamado de fator F_3 é calculado pela Equação 31.

$$F_3 = \bar{L}_p - \bar{L}_i \quad (31)$$

Onde \bar{L}_p é o nível de pressão sonora da superfície calculado na Equação 29 e \bar{L}_i é o nível de intensidade absoluta na superfície, calculado pela Equação 32.

$$\bar{L}_i = 10 \log \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{I_{ni}}{I_o} \right| \quad \text{dB} \quad (32)$$

Onde I_o é a intensidade sonora de referência (10^{-12}W/m^2) e I_{ni} é o valor medido da intensidade.

2.7.7.3.5.4 Indicador de não uniformidade do campo

Indica a medida da variabilidade espacial e posicional que existe no campo, pode ser comparado com o desvio padrão do parâmetro estatístico. Também chamado de fator F_4 é calculado pela Equação 33.

$$F_4 = \frac{1}{In} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (I_{nk} - \bar{I}_k)^2} \quad (33)$$

Tal que:

$$\bar{I}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_{nk} \quad (34)$$

2.7.7.3.6 Procedimentos para atingir a precisão desejada

Alguns procedimentos devem ser seguidos para se chegar a uma precisão confiável.

2.7.7.3.6.1 Critério 1

Para uma matriz de medição ser considerada adequada para determinar o nível de potência de uma fonte de ruído de acordo com a norma ISO 9614-1, (L_d) deve ser maior do que o indicador F_2 para cada frequência da banda. L_d é dependente do equipamento de medição. F_2 é definido na equação 28. L_d é derivado da pressão residual índice de intensidade que deve ser calculado durante a fase de medição, se este critério não for satisfeito, é uma indicação de que os níveis estão baixo para a fonte assim é necessário reduzir a distância média entre a superfície de medição e a fonte.

A inequação 35 deve ser verdadeira.

$$L_d > F_2 \quad (35)$$

Tal que L_d é a capacidade dinâmica do microfone.

2.7.7.3.6.2 Fontes de ruídos estranhos F_3 e F_2

Se a diferença entre os indicadores de campo F_2 e F_3 for significativa, maior que 3 dB, isto é uma forte indicação da presença de um ruído direcional estranho sob a fonte de ruído em teste, pode-se melhorar as medições através da redução da distância média entre a superfície e a fonte, protegendo fontes de medição de ruídos ou reduzindo algumas reflexões para a fonte sob investigação.

2.7.7.3.6.3 Critério 2

O número de pontos de medições deve ser maior que o fator C multiplicado pelo fator F_4^2 , o fator C é encontrado na Tabela 4 e F_4 na Equação 33.

$$N > CF_4^2 \quad (36)$$

Tabela 4 - Fator C

Oitava de Banda	um terço de oitava de banda	C		
		Precisão	Engenharia	Pesquisa
Hz	Hz			
63 a 125	50 a 160	19	11	
250 a 500	200 a 630	29	19	
1000 a 4000	800 a 5000	57	29	
	6300	19	14	

Fonte: ISO 9614-1

A Tabela 5 resume as ações que devem ser implementadas para se atingir os resultados mais confiáveis.

Tabela 5 - Ações para aumentar a grade de confiança

Critério	Código de Ação	Ação
$F1 > 0,6$	e	Agir para reduzir a variabilidade temporal ou aumente o tempo de medição em cada ponto
$F2 > Ld$ ou $F3 - F2 > 3$ dB	a ou b	Na presença de forte reverberação ou ruído estranhos diminua a distância a 0,25m da fonte ou aumente para 1m ou aja para reduzir a reflexão na direção da fonte.
Critério 2 não satisfeito e 1 dB < $(F3 - F2) < 3$ dB	c	Aumente a densidade de pontos da superfície de medição
Critério 2 não satisfeito e $(F3 - F2) < 1$ dB	d	Aumente a distância de medição usando o mesmo número de pontos ou aumente o número de posições de medição na mesma superfície

Fonte: ISO 9614-1

2.7.7.4 Cálculo de Incertezas do Método da Intensidade Sonora

Existem muitas fontes de erros nas medições da intensidade sonora, uma parte da literatura de intensidade sonora tem se preocupado com a identificação e estudo desses erros. Algumas das fontes de erro são fundamentais e outras estão associadas a várias deficiências técnicas. Uma complicação é que a precisão depende muito do campo sonoro em estudo, sob certas condições mesmo pequenas imperfeições nos equipamento de medição terão uma influência significativa. Outra complicação é que os pequenos erros são, por vezes, amplificados em grandes erros globais quando a intensidade é integrada em superfície fechada (JACOBSEN, 2011).

2.7.7.5 Erros de alta frequência e de aproximação por diferenças finitas

O erro de alta frequência é às vezes chamado de erro de polarização pois resultará no mesmo erro (neste caso uma subestimação), cada vez que a intensidade é medida a curva gradiente medida pelos dois microfones é aproximada para linha reta entre dois pontos. Se a curva mudar rapidamente com a distância, a estimativa será imprecisa isto acontecerá se o comprimento de onda medida for pequeno em comparação com a separação eficaz do microfone. Para uma determinada separação eficaz do microfone haverá um limite de alta frequência para além do qual os erros irão aumentar significativamente. Para uma precisão de até 1 dB, o comprimento de onda deve ser superior a seis vezes a distância de espaçador (BRUEL E KJAER, 2012).

No sistema de unidades em decibéis, um erro de 1 dB é tradicionalmente considerado aceitável. O sistema decibel de unidades baseia-se na aproximação de um campo distante para intensidade sonora, isto é, $I = p^2 / \rho c$, é de modo que as quantidades de decibéis são praticamente as mesmas para a intensidade e potência sonora. Assim, para a potência sonora, 1 dB representa um erro de 26% numa escala absoluta. Estes resultados demonstraram que, na prática, a potência sonora pode ser medida com uma precisão que é muito melhor do que 26%. Na avaliação

da precisão da medição da potência sonora, portanto, as unidades absolutas devem ser além de unidades em decibéis. A integração sobre a superfície de medição e portanto, as medições de intensidade sonora são realizadas em unidades absolutas, é mais simples deixar a potência sonora resultante em unidades absolutas (HICKILING, LEE E WEI, 1997).

2.7.7.6 Erro de incompatibilidade de fase e baixa frequência

A incompatibilidade de fase entre os dois canais no sistema de análise determina o limite de baixa frequência, a distância entre os dois microfones pode ser expressa como uma fração de um comprimento de onda ou uma mudança de fase entre os dois pontos, a intensidade é diretamente relacionada com esta mudança de fase e isso é equivalente ao tempo para se propagar sobre a distância do espaçador. A separação de tempo deve ser preservada para medir a intensidade correta no entanto, em todos os sistemas de análise haverá um pequeno tempo de atraso entre os dois canais, o que introduz um pequena mudança de fase. Isso é chamado de erro de incompatibilidade de fase. Para um boa sonda, o erro de incompatibilidade de fase é um erro de polarização e a intensidade é subestimada ou superestimada de acordo com o sinal da incompatibilidade de fase. Para precisão até 1 dB, a mudança de fase na distância do espaçador deve ser mais que cinco vezes a defasagem de fase, assim se obterá um erro de alta frequência negligenciável, o comprimento de onda deve ser pelo menos seis vezes a distância do espaçador. Um erro de fase de $\pm 0,3^\circ$ será insignificante, na medição de frequência mais baixa a 63 Hz o comprimento de onda é de aproximadamente 5,5 metros e a mudança de fase sobre um espaçador de 12 mm é apenas $0,8^\circ$. Assim, uma defasagem de $\pm 0,3^\circ$ causará um erro significativo na intensidade. Em um espaçador maior com um comprimento de 50 mm aproximadamente quatro vezes 12 mm, a mudança de fase é de $3,3^\circ$, ou seja, quatro vezes $0,8^\circ$ assim os resultados serão suficientemente precisos. Por isso que é necessário espaçadores maiores para frequências baixas. Estes exemplos são válidos apenas para propagação de campo livre ao longo do eixo da sonda, em geral, a mudança de fase será reduzida com ângulo de incidência e de forma reativa ou campo difuso (HICKILING, LEE E WEI, 1997).

A Tabela 6 retirada da norma ISO 9614-1 apresenta os valores de tolerância para as medições do nível de potência sonora através do método da intensidade para um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 6 - Desvio Padrão Aceitável no Método do da Intensidade

Oitava da Banda de frequência (Hz)	Um terço da banda de frequência	Desvio Padrão		
		Preciso (dB)	Engenharia (dB)	Pesquisa (dB)
63 a 125	50 a 160	2	3	
250 a 500	200 a 630	1,5	2	
1000 a 4000	800 a 5000	1	1,5	
	6300	2	2,5	

Fonte: ISO 9614-1

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos de medição foram descritos nas seções 2.7.7.1 e 2.7.7.2, que descrevem a álgebra associada ao método da medição da medição de pressão sonora e ao método da medição de intensidade sonora, respectivamente.

3.1 Materiais de uso geral

Neste primeiro tópico serão descritos os equipamentos e materiais utilizados tanto para as medições, quanto para a preparação do ambiente de medição.

3.1.1 Fonte sonora utilizada para a medição

A fonte de sonora utilizada para a realização deste trabalho é um aspirador de pó da marca Electrolux, modelo *NET Compact* de potência elétrica 1200W. A Figura 29 mostra o equipamento em questão:



Figura 29 - Fonte Sonora : Aspirador de pó
Fonte: Autorial Própria

Na carenagem do aspirador é encontrado um rótulo com especificações técnicas do mesmo, conforme a Figura 30:



Figura 30 - Especificações técnicas do aspirador

Fonte: Autoria própria

Há também um SELO RUÍDO com nível de potência sonora L_w de 85 dBA certificado pelo INMETRO, baseado na Resolução CONAMA 020/94, que impõe o uso obrigatório deste selo em todos os aparelhos eletrodomésticos que geram ruído no seu funcionamento, conforme mostra a Figura 31.



Figura 31 - Selo Ruído do Aspirador

Fonte: Autoria própria

3.1.2 Ambiente de Medição

O ambiente de medição utilizado para a realização deste trabalho é a sala BM 2.09 no bloco EM da UTFPR Sede Ecoville. Este ambiente foi escolhido por uma série de fatores, dentre eles:

- i) A não existência de janelas voltadas para ambientes externos, o que garante um nível de ruído de fundo menor do que as outras salas encontradas no câmpus;
- ii) Possuir uma sala anexa à esta, também sem janelas voltadas para ambientes externos, o que possibilitou a execução das medições a partir desta sala anexa, minimizando a interferência do operador nas medições;
- iii) A sala possui paredes sem presença de cortinas ou mobília.

3.1.3 Superfície de Referência para Medição

A superfície de referência para medição foi construída a partir de ripas da madeira *Pinus* pregadas de forma a obter a geometria de um paralelepípedo. A divisão de cada superfície no número de faces desejadas foi feita com linha de costura. As Figuras 32 A e 32 B mostram a estrutura montada para servir de referência às medições.



Figura 32 - A/B: Superfície de Referência para Medição

Fonte: Autoria própria

Os detalhes sobre a confecção da superfície de referência serão abordados posteriormente na seção 3.4.1.

3.1.4 Fonte de Ruído Dodecaédrica

A fonte de ruído dodecaédrica utilizada é a *OMNI 12* da marca 01dB, mostrada na figura 34.



Figura 33 - Fonte de ruído dodecaédrica

Fonte: Aatoria própria

3.1.5 Calibrador

O calibrador é o Cal 21 tipo I da marca 0dB. Este emite uma frequência de 1kHz com uma pressão sonora de 94dB.



Figura 34 - A: Calibrador CAL 21; B: Detalhe Calibrador
Fonte: Autoria própria

3.1.6 Pedestal

Haste metálica com um braço telescópico móvel utilizada para fixar os microfones de captação ao longo de todas as medições.



Figura 35 - Pedestal
Fonte: Autoria própria

3.1.7 Trena Métrica

Trena métrica utilizada para a construção da superfície de referência de medição e para o dimensionamento da sala e do aspirador.

3.2 Materiais de uso para medição de Intensidade Sonora

A Figura 36 mostra a montagem dos microfones, pré-amplificadores e do espaçador.

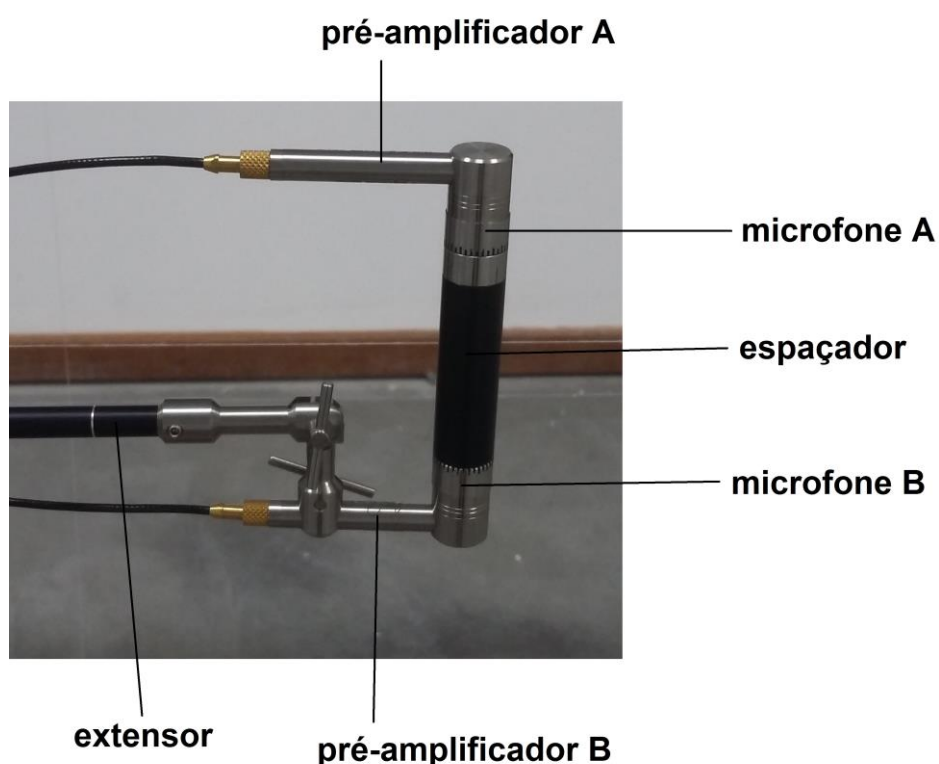


Figura 36 - Montagem microfones de Medição

Fonte: Autoria própria

3.2.1 Microfones

Nas medições realizadas para o método da intensidade, foram utilizados dois microfones fabricados pela empresa GRAS, o número de série do microfone A é 118673 e microfone B é 118653. Antes de se iniciar as aferições, os microfones devem ser calibrados com o auxílio do *software dBFa 4.9.1* onde são ajustados com

94 dB de padrão. Após essa checagem na calibração, os microfones podem ser validados para as medições.

3.2.2 Pré-amplificadores

3.2.2.1 Pré-amplificador A

O pré-amplificador utilizado na sonda de intensidade para as medições foi fabricado pela empresa GRAS, e tem o número de série. Esse dispositivo deve ser informado ao *software dBFa 4.9.1* pois deve sempre ser configurado juntamente com o microfone A.

3.2.2.2 Pré-amplificador B

Da mesma maneira que o pré-amplificador A, o dispositivo B é fabricado pela empresa GRAS e possui o número de série 149585, devendo ser configurado juntamente com o microfone B.

3.2.3 Espaçadores

Para a seleção da frequência limite de análise, deve utilizar um espaçador entre os microfones. Os espaçadores utilizados foram da marca GRAS tendo 25 mm e 6 mm. As faixas de frequência limites são mostradas na Tabela 7.

Tabela 7 - Espaçadores versus frequências de análise

F_{\min} (Hz)	20	20 a 40	50 a 80	100 e mais
Espaçador (mm)				
50	12,5 - 1k (1,6k)	25 - 1k (1,6k)	50 - 1k (1,6k)	100 - 1k (1,6k)
25	25 - 2k (2k)	25 - 2k (3,15k)	50 - 2k (3,15k)	100 - 2k (3,15k)
12	50 - 2k (2k)	50 - 4k (4k)	50 - 4k (6,3k)	100 - 4k (6,3k)
6	100 - 2k (2k)	100 - 4k (4k)	100 - 8k (8k)	100 - 8k (12,5)

Fonte: Application Note dBFa 4.9.1

3.2.4 Extensor

Extensor telescópico fabricado pela GRAS, mostrado na Figura 37, é responsável pela fixação dos microfones e pré-amplificadores, foi utilizado para fixar a sonda no pedestal que padronizou as posições de medição, contudo, também pode ser usado manualmente.



Figura 37 - Extensor

Fonte: Autoria própria

3.2.5 Módulo dB4

O módulo dB4 fabricado pela 01dB é o responsável pela conexão entre a sonda de intensidade no qual abrange os microfones e pré-amplificadores e o computador que processa o *software dBFa 4.9.1*. Ou seja, peça fundamental na aquisição de dados. Na figura 38 tem-se o módulo de aquisição de dados.



Figura 38 - Módulo dB4

Fonte: Autoria própria

3.2.6 Computador

O computador utilizado para o processamento e aquisição dos dados foi um *Acer Intel® Core(TM) 2 Duo T6400 @ 2.00GHz*, disponibilizado pelo professor orientador do trabalho.

3.2.7 Software

O *software* dBFa, versão 4.9.1, da empresa 01dB, é o responsável pela gerenciamento e condicionamento das medições e aquisições. Todos os parâmetros que devem ser levantados e seguidos para uma medição pautada na norma ISO 9614-1:1993, estão inseridos e são calculados pelo *software*. Ou seja, tempo de medição, posicionamento da sonda, fator F_1 do campo sonoro, pressão sonora média do ponto, calibração dos microfones podem ser facilmente levantadas pelo *software* dBFa. Isso torna mais simples a medição do nível de potência sonora pelo método da intensidade.

3.3 Materiais de uso para medição de Pressão Sonora

Os materiais e equipamentos utilizados na medição de pressão sonora serão descritos nos tópicos à seguir.

3.3.1 Microfone

As medições serão realizadas através de um microfone condensador capacitivo MCE 212 de 1/2" da marca 01dB.



Figura 39 - Microfone Capacitivo MCE 212

Fonte: Autoria Própria

3.3.2 Medidor Integrador

O medidor integrador utilizado é o SOLO Black tipo I da marca 01dB.



Figura 40 - Medidor Integrador

Fonte: Autoria Própria

3.3.3 Tratamento dos dados

O programa utilizado para o tratamento de dados será o *software* Microsoft Excel 2010.

4 METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

Neste experimento foi utilizada uma única sala reverberante para as medições, e um mesmo equipamento gerador de ruído (Aspirador). O ruído de fundo teve duas variações controladas pela fonte dodecaédrica e as medições seguiram as metodologias propostas pela ISO 9614 -1:1993 referente ao método da intensidade sonora e a ISO 3744:2010 referente ao método da pressão sonora. A utilização de duas metodologias visou comparar os dois procedimentos normatizados afim de se obter a convergência de resultados dentro de uma faixa de tolerância aceitável. Um outro aspecto levantado secundariamente, foi a utilização da pressão sonora fornecida pela sonda da intensidade como base para os cálculos da metodologia da pressão sonora, esse procedimento visou constatar a eficácia dos valores levantados como base confiável de valores para a metodologia da pressão sonora.

4.1 Preparação para o Experimento

4.1.1 Medição das Dimensões do Ambiente de Medição

A medição das dimensões do ambiente de medição foi realizada com a trena métrica e os seguintes resultados foram obtidos:

Comprimento: 4,40m;

Largura: 3,58m;

Altura: 2,75m.

4.1.2 Medição das Dimensões do Aspirador

A medição três das dimensões l_1 , l_2 e l_3 do aspirador, que formam um paralelepípedo imaginário envolvendo este, servem como parâmetro inicial para a construção da superfície de referência de medição. Foi utilizada a trena para determinar tais dimensões, e medidas encontradas foram:

l_1 : 0,30m;

l_2 : 0,24m;

l_3 : 0,20m.

4.1.3 Determinação da Superfície de Referência de Medição

A fim de realizarmos o trabalho com a construção de apenas uma superfície de referência de medição, determinamos uma distância d da fonte emissora à face da superfície de medição que satisfaça as condições necessárias tanto para o método de medição de pressão sonora quanto para o método de medição de intensidade sonora.

As dimensões da superfície de medição são descritas conforme a Figura 24 da seção 2.7.5.1.

Paralelamente, segundo a Seção 8.2 da norma ISO 9614-1:1993, as medições de intensidade sonora devem ser feitas a uma distância igual ou superior a 0,5 metros e com um mínimo de 10 posições no total das medições.

Sendo assim, levando em consideração as dimensões do aspirador e assumindo $d = 0,5\text{m}$, temos as condições de distância para o método de medição de pressão sonora garantidas, bem como a condição para a medição de intensidade sonora.

$l_1 = 0,30\text{m}$, menor do que 0,50m;

$l_2 = 0,24\text{m}$, menor do que 0,50m;

$l_3 = 0,20\text{m}$, menor do que 0,50m.

Logo temos a seguinte superfície de medição:

$2a = l_1 + 2*d = 0,30 + 2*0,50 = 1,30\text{m}$;

$2b = l_2 + 2*d = 0,24 + 2*0,50 = 1,24\text{m}$;

$c = l_3 + d = 0,20 + 0,50 = 0,70\text{m}$.

Foi definido como 9 o número de pontos de posicionamento do microfone por face da superfície de medição, totalizando 45 pontos, atendendo assim a condição de no mínimo 10 pontos para a execução do método da medição da intensidade sonora.

A área total da superfície de medição S é a soma das áreas das faces dos paralelepípedo.

$$S = 2*(1,30*0,70) + 2*(1,24*0,70) + (1,24*1,30) = 5,168\text{m}^2.$$

4.1.4 Posicionamento da Superfície de Medição na Sala

A superfície de medição foi colocada no centro da sala, conforme mostra a Figura 41.

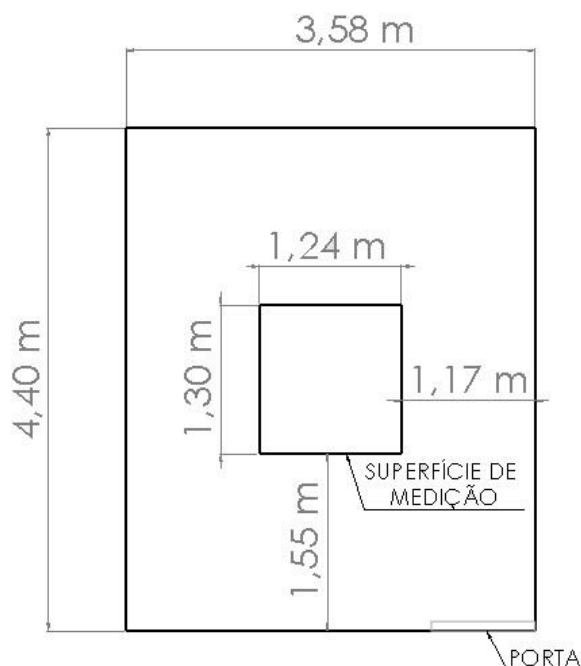


Figura 41 - Posicionamento da superfície de medição

Fonte: Autoria própria

4.1.5 Posicionamento da Fonte de Ruído Dodecaédrica na Sala

A fonte dodecaédrica foi colocada em um dos cantos da sala, na mesma parede em que se encontra a porta, porém do lado oposto da mesma, conforme mostra a Figura 42.

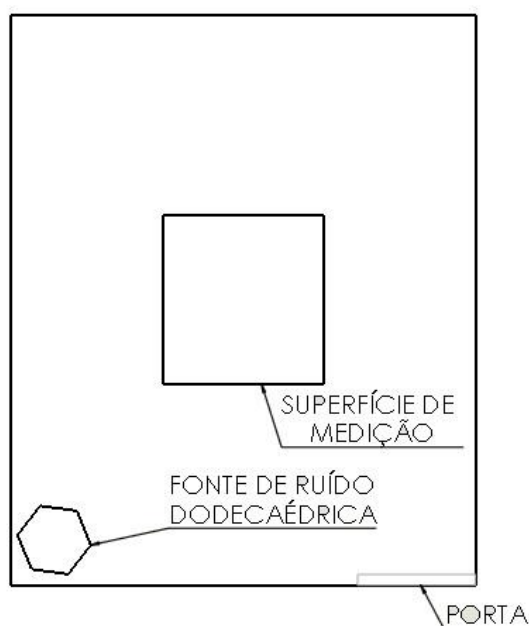


Figura 42 - Posição Fonte Dodecaédrica

Fonte: Autoria própria

4.1.6 Calibração dos Microfones

A calibração de pressão sonora dos microfones é realizada através da fixação do microfone na cavidade do calibrador e em seguida este é acionado emitindo uma frequência de 1kHz com 94dBA de pressão sonora. O método consiste na correção da sensibilidade do microfone, feita automaticamente a partir do *software* interno do medidor integrador para o método da pressão sonora e pelo *software* dBFa para o método da intensidade sonora.

4.1.7 Medição do Tempo de Reverberação da Sala

O tempo de reverberação foi medido utilizando o medidor integrador *SOLO BLACK* do tipo I da marca 01dB, esse tempo foi aferido utilizando a metodologia TR 60. Com o auxílio de uma fonte geradora de ruído contínua, começava-se a medição e a partir de um certo momento interrompia a geração de ruído da fonte até que essa curva de decaimento atingisse o ruído ambiental. Esse período é o tempo de reverberação.

4.1.8 Medição do Ruído do Ambiente

O valor do ruído do ambiente foi obtido através da medição dos valores de pressão sonora obtidos em 4 pontos distintos da sala utilizando o medidor integrador. Este valor foi obtido através da equação 9, descrita na seção 2.7.1.1.2.

4.1.9 Medição de Pressão Sonora

A partir da definição da superfície de medição, do tempo de reverberação e do ruído de fundo do ambiente, deu-se início às medições de pressão sonora, para a qual foi convencionada o tempo de medição de 60 segundos por ponto de medição, segundo a ISO 3744-1:2010. Para uma melhor identificação dos dados após o término do experimento, a sequência de pontos de medição será a mesma que a executada no método da intensidade sonora e será descrita na seção 4.1.8. O medidor integrador foi configurado com curva de ponderação do tipo A.

A Figura 43 mostra a aplicação do método durante o experimento.



Figura 43 - Medição de pressão sonora

Fonte: Autoria própria

Para evitar interferência do operador, todas as medições foram realizadas a partir da sala anexa à sala de experimentos, deixando no ambiente de medição apenas os equipamentos necessários à execução desta.

4.1.10 Medição de Intensidade Sonora

O primeiro passo para a medição da potência sonora pelo método da intensidade foi a construção da superfície de medição seguindo a norma ISO 9614-1:1993. Com essa definição já feita, o próximo passo foi configurar o *software* dBFa 4.9.1 que seria o responsável pelo processamento e aquisição dos dados.

A sequência de configuração foi dada da seguinte forma:

- i) Configuração dos parâmetros de Hardware: Microfones, módulo de aquisição de dados;
- ii) Configuração da superfície de medição;
- iii) Calibração de pressão dos microfones;

- iv) Verificação e validação da calibração dos microfones;
- v) Verificação e validação do parâmetro estacionário;
- vi) Configuração do tempo de medição.

A Figura 44 mostra um esquema da malha da superfície de medição, plotado pelo *software* dBFa e editado manualmente para mostrar a indicação do nome de cada face, sendo que a face central representa a face superior da superfície de medição e as faces periféricas representam as faces laterais do mesmo.

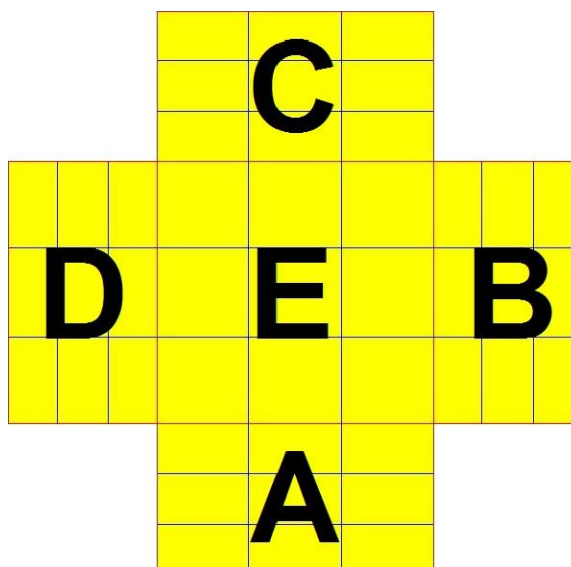


Figura 44 - Malha da Superfície de Medição

Fonte: *Software* dBFa 4.9.1

A posição do aspirador dentro da superfície de medição se deu da seguinte forma:

Lado A: Lateral do aspirador;

Lado B: Parte traseira do aspirador, onde existe a saída de ar do aspirador;

Lado C: Lateral do aspirador;

Lado D: Parte frontal do aspirador, onde existe o encaixe com a mangueira de sucção;

Lado E: Parte de cima do aspirador, onde existe a botoeira.

A partir desta malha, foi arbitrada a sequência dos pontos de medição e esta foi inserida no *software*, como mostra a Figura 45.

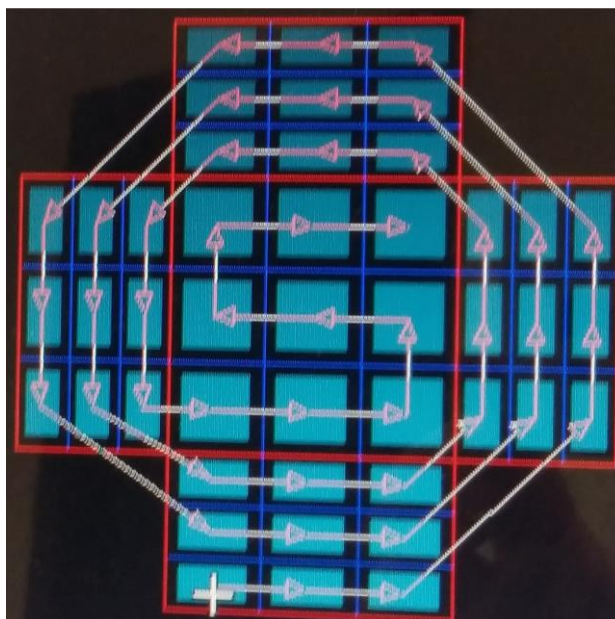


Figura 45 - Sequência de Medição

Fonte: *software* dBFa 4.9.1

A montagem dos microfones e pré-amplificadores foi realizada da seguinte forma como mostram a Tabela 8 e a Figura 46, sendo que o microfone B ficava mais próximo do equipamento a ser medido.

Tabela 8 - Equipamentos de Medição

Nome	Microfone	Pré-Amplificador	Sb
B	118653	149585	$1,278 \cdot 10^{-7}$
A	118673	149590	$1,344 \cdot 10^{-7}$

Fonte: Autoria própria

A figura 46 mostra a sonda durante a medição de potência no ponto central da face superior da superfície de medição.

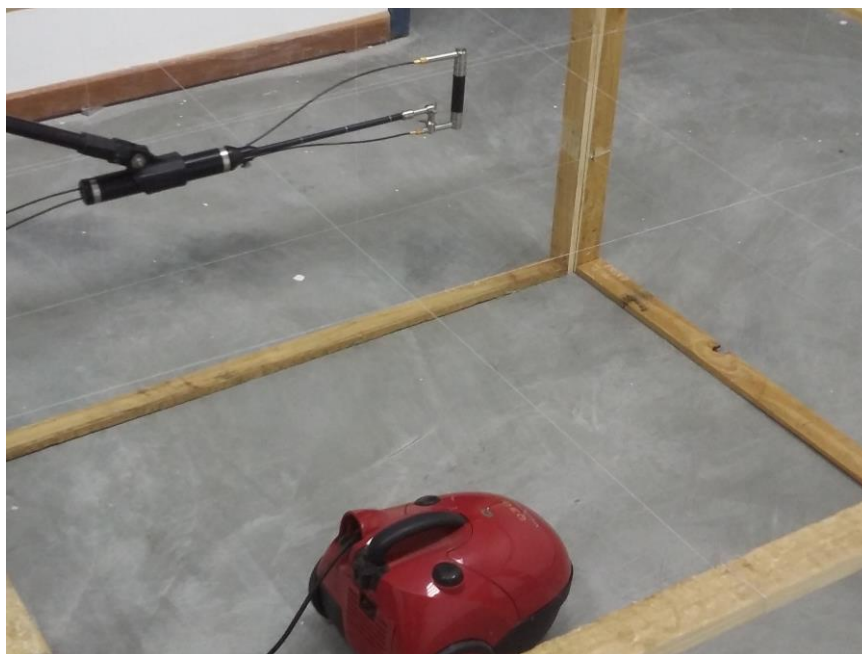


Figura 46 - Medição de potência sonora

Fonte: Autoria própria

Assim, após as medições dos 45 pontos dispostos na grade de medição, o *software*, gerenciou esses dados e retornou os parâmetros devidamente calculados assim como os gráficos de intensidade presentes em cada face.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nota-se que pelo no selo ruído, mostrado na seção 3.1.1, está especificada a potência sonora do aparelho, no valor de 85dB(A), logo espera-se que o valor das medições convirjam para este valor. A seguir serão mostrados e discutidos os resultados obtidos durante as medições.

5.1 Método da Pressão Sonora

5.1.1 Fator de correção do Ambiente K_{2A}

O cálculo do tempo de reverberação foi feito através do *software* dBati32 que gera o valor através do tempo de decaimento da pressão sonora que se encontra inicialmente no nível de pressão sonora da fonte, após a interrupção do funcionamento desta, até o nível do ruído de fundo do ambiente. O critério utilizado para a realização do cálculo do tempo de reverberação foi o TR60, que utiliza a média dos ruídos de fundo na frequência de 500Hz.

A figura 47 mostra a curva de decaimento e tempo de reverberação na frequência de 500 Hz.

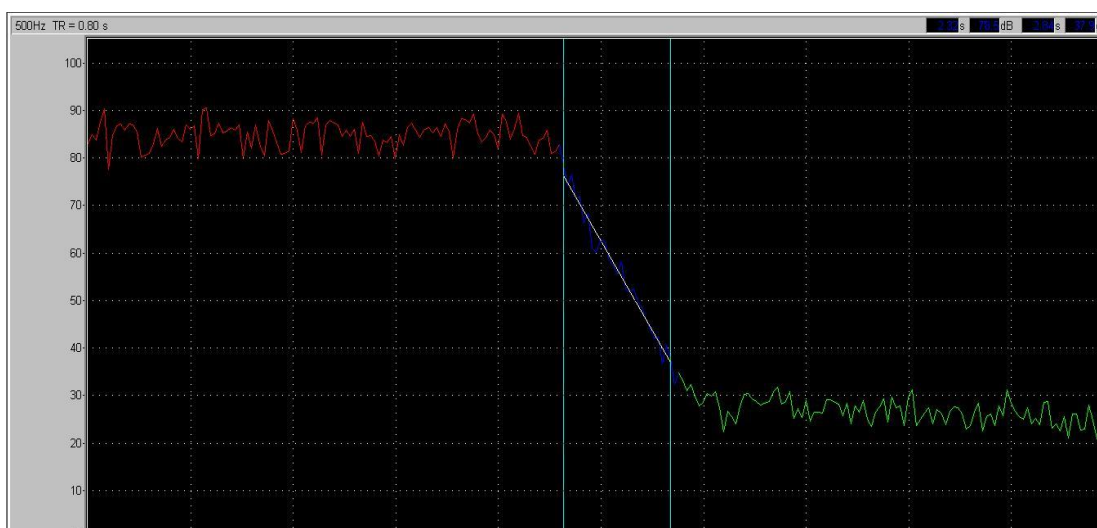


Figura 47 - Tempo de Reverberação

Fonte: *Software* dBati32

O valor encontrado para o tempo de reverberação T_R foi de 0,8 segundos e é indicado pela linha sobre a parte azul da curva de decaimento.

Utilizando os valores da seção 4.1.1 e a equação 14, temos que o valor do volume do ambiente V é 43,318m³.

A área de absorção do ambiente, descrita pela equação 13, tem então o valor de 8,6636m²

Utilizando o valor da área da superfície de medição S da seção 4.1.3 e os valores de V e de A e aplicando-os na equação 12, temos $K_2 = 5,3$ dB. Os dados tratados nesta seção estão resumidos na tabela 9.

Tabela 9 - Fator de correção do ambiente K_2

T_R [s]	V [m ³]	A [m ²]	S [m ²]	K_2 [dB]
0,8	43,318	8,6636	5,168	5,3

Fonte: Autoria Própria

5.1.2 Nível Médio de Pressão Sonora $\overline{L'_{P(ST)}}$

A partir das medições realizadas em cada ponto das faces da superfície de medição, foram obtidas os seguintes níveis médios de pressão sonora:

Tabela 10 - Nível Médio de Pressão Sonora

Condição	Nível médio de pressão sonora [dB]
Sem fonte de ruído	85,1
Com fonte de ruído	86,9

Fonte: Autoria própria

5.1.3 Fator de correção do Ruído de Fundo K_1

Os valores obtidos na medição do ruído de fundo do ambiente foram:

Tabela 11 - Ruído de Fundo do Ambiente

Condição	A [dB]	B [dB]	C [dB]	D [dB]	Média [dB]
Sem fonte de ruído	25,7	23,8	21,5	27,5	27,7
Com fonte de ruído	70,4	69,3	71,3	71,1	70,6

Fonte: Autoria própria

A partir dos valores , aliados à utilização das condicionais impostas pela ISO 3744-1:2010, descritas na seção 2.7.7.1.3, podemos calcular o fator de correção do ruído de fundo K_1 .

Tabela 12 - Fator de correção do Ruído Ambiente

Condição	K_1 [dB]
Sem fonte de ruído	0
Com fonte de ruído	0

Fonte: Autoria própria

Ambos os resultados de K_1 foram iguais a zero, pois o valor obtido na equação 11 foi maior do que 15dB.

5.1.4 Nível de Pressão Sonora L_p

O nível de pressão sonora L_p obtido através da equação 6 está contido na Tabela 13.

Tabela 13 - Nível de Pressão Sonora

Condição	L_{pA} [dB]
Sem fonte de ruído	79,8
Com fonte de ruído	81,6

Fonte: Autoria própria

5.1.5 Nível de Potência Sonora L_{wA}

Finalmente, o nível de potência sonora obtido através do método da pressão sonora, para ambos os casos está apresentado na Tabela 14

Tabela 14 - Nível de Potência Sonora pelo método da Pressão Sonora

Condição	L_{wA} [dB]
Sem fonte de ruído	86,9
Com fonte de ruído	88,7

Fonte: Autoria própria

5.1.6 Cálculo das incertezas do Método de Medição de Pressão Sonora

Considerando a Tabela 2, temos $\sigma_{omc} = 0,5$ dB, pois a fonte a ser medida possui pequena variação de potência sonora durante o tempo, além do processo de medição ser bem definido.

Considerando a Tabela 3, temos $\sigma_{RO} = 1,5$ dB, visto que a curva de ponderação A foi utilizada pelo medidor integrador e as frequências podem ser consideradas *flat* ao longo do espectro.

Aplicando os valores acima descritos na Equação 15, temos: $\sigma_{TOT} = 1,58$ dB, que pode ser arredondado para $\sigma_{TOT} = 1,6$ dB, visto que a segunda casa decimal mostra um grau de imprecisão bastante alto para os métodos experimentais.

Expandindo a medição da incerteza através da equação 16 e o fator de cobertura de $k = 2$ para um fator de confiança de 95%, temos $U = 3,16$ dB.

Logo, o nível de potência sonora pelo método da pressão sonora com as devidas incertezas adicionas é mostrado pela Tabela 15.

Tabela 15 - Nível de Potência Sonora pelo método da Pressão Sonora com Incerteza

Condição	L_{wA} [dB]
Sem fonte de ruído	$86,9 \pm 1,6$
Com fonte de ruído	$88,7 \pm 1,6$

Fonte: Autoria própria

5.2 Método da Intensidade Sonora L_{IA}

Após a realização de todas as medições programadas para o método da intensidade sonora, a análise de dados utilizada no método da Intensidade Sonora foi toda realizada com auxílio do *software* dBFa.

5.2.1 Nível de Potência Sonora L_{wA}

O nível de potência sonora obtido para os casos sem e com fonte de ruído dodecaédrica. a faixa de frequência analisada foi de 63Hz a 4kHz. Os fatores de campo de campo para os resultados a seguir estavam todos dentro dos seus respectivos limites, tal qual foi descrito na seção 2.7.7.2.5.

Título											
Data	24/08/2016										
Padrão	ISO 9614 parte 1 (06-01-1993)										
Software	dBFa Versão 4.9.1										
Arquivo	C:\Documents and Settings\User\Desktop\Aspirador 01.CMG										
Pontos totais	45										
Superfície total	5,1680 m ²										
Grade de precisão	Engenharia										
Freqüência Hz	+ + -	F1	Ld	F2	F3	N	CF4 ²	F4	Lw	Li	Lp
	< 1.5dB	<= 0.6	dB	dB	dB				dB(A)	dB	dB
A			13,6	2,8	2,8	45	34	1,1	95,7	88,5	91,4

Figura 48 - Nível de Potência Sonora sem fonte de ruído dodecaédrica

Fonte: *software dBFa 4.9.1*

Título	Aspirador Ruído de Fundo Alto										
Data	21/09/2016										
Padrão	ISO 9614 parte 1 (06-01-1993)										
Software	dBFa Versão 4.9.1										
Arquivo	C:\Documents and Settings\User\Desktop\Aspirador alto.CMG										
Pontos totais	45										
Superfície total	6,0150 m ²										
Grade de precisão	Engenharia										
Freqüência Hz	+ + -	F1	Ld	F2	F3	N	CF4 ²	F4	Lw	Li	Lp
	< 1.5dB	<= 0.6	dB	dB	dB				dB(A)	dB	dB
A			13,6	8,6	8,6	45	29	1,0	92,1	84,3	92,9

Figura 49 - Nível de Potência Sonora com fonte de ruído dodecaédrica

Fonte: *software dBFa 4.9.1*

Nota-se que a superfície total para o caso da intensidade com fonte geradora de ruído de fundo, mostrado na Figura 49, tem o valor de 6,0150m² e que este valor é diferente do valor anteriormente estabelecido como área da superfície de medição de 5,1680m², discutido na seção 4.1.3. Esta diferença se deu em função de uma tentativa de compensação do mal posicionamento dos microfones em função da espessura da estrutura montada para servir como superfície de referência para as medições.

A Tabela 16 mostra os valores dos níveis de potência sonora obtidos pelo método da intensidade sonora.

Tabela 16 - Nível de Potência Sonora pelo método da Intensidade Sonora

Condição	L_{wA} [dB]
Sem fonte de ruído	95,7
Com fonte de ruído	92,1

Fonte: Autoria Própria

Foi verificado que para ambos os casos, com e sem fonte geradora de ruído de fundo, para banda de frequência de uma oitava, o equipamento tem os maiores valores de L_w para as frequências de 250 a 500Hz. Em ambos os casos, sem ruído e com ruído, respectivamente, foi notado que a faixa de frequência de 500Hz é a frequência dominante do equipamento. As Figuras 50 e 51 mostram as potências sonoras relativas às frequências de estudo.

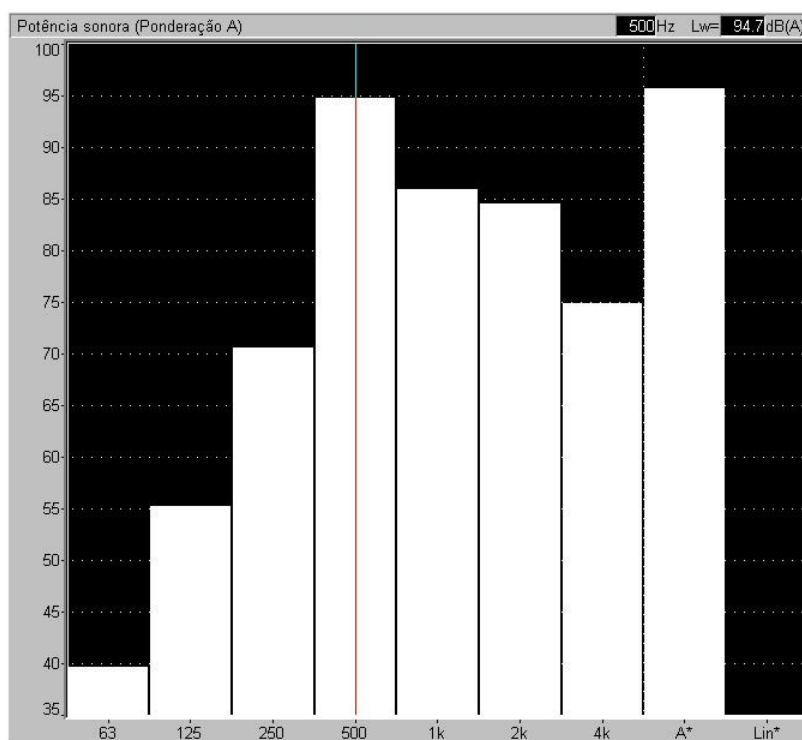


Figura 50 - Espectro sem Ruído

Fonte: *software dBFa 4.9.1*

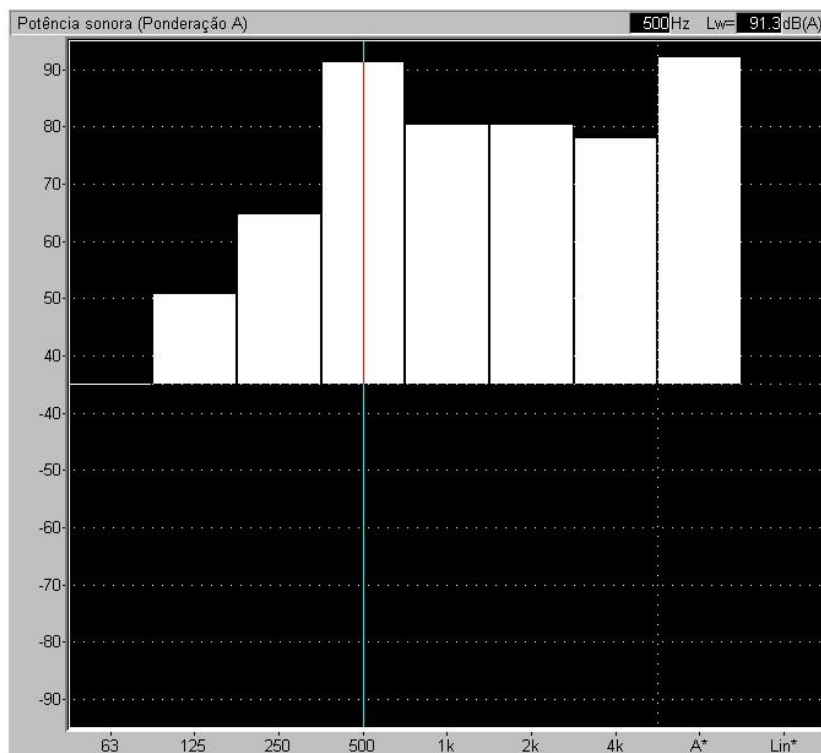


Figura 51 - Espectro com Ruído

Fonte: *software dBFa 4.9.1*

5.2.2 Cálculo das incertezas do Método de Medição de Intensidade Sonora

De acordo com a tabela 6, o desvio padrão para o método de precisão para Engenharia, para banda de frequência de uma oitava, considerando que a faixa de frequência em que o equipamento tem os maiores valores de L_w é de 250 a 500 Hz, temos o valor da incerteza dado por 2,0 dB.

Tabela 17 - Nível de Potência Sonora pelo método da Intensidade Sonora com Incerteza

Condição	L_{wA} [dB]
Sem fonte de ruído	95,7±2,0
Com fonte de ruído	92,1±2,0

Fonte: *Autoria própria*

5.3 Análise Primária dos Resultados

Temos a seguir na tabela 18 os valores das potências sonoras obtidas pelos dois métodos, nos casos com e sem fonte geradora de ruído de fundo e as diferenças percentuais entre as medições.

Tabela 18 - Potência sonora: Resultados primários

	Método da Pressão Sonora [dB]	Método da Intensidade Sonora [dB]	Diferença percentual entre as medições [%]
Sem fonte geradora de ruído de fundo	86,9	95,7	9,2
Com fonte geradora de ruído de fundo	88,7	92,1	3,7

Fonte: Autoria Própria

A diferença entre os resultados será discutida nos tópicos a seguir.

5.4 Análise dos resultados

Os valores das potências sonoras esperados para as medições em ambos os métodos e condições de ruído de fundo eram os mesmos dentro de uma faixa de erro aceitável, visto que os métodos possuem instrumentação e tolerâncias diferentes. Porém, tamanha discrepância nos resultados gerou a necessidade de uma análise complementar dos possíveis erros do estudo.

Constatou-se que, como as medições para ambos os métodos foram realizadas em dias e horários diferentes, sujeitas a diferenças climáticas e de funcionamento dos equipamentos, as discrepâncias entre os resultados podem estar relacionadas a isso, bem como à execução do método.

Sendo assim, surgiu a necessidade da realização de novas medições com os parâmetros variáveis, como diferença entre horários de medição, umidade relativa do ar, temperatura do ambiente, entre outros, com um maior nível de controle. Ambas as medições foram realizadas simultaneamente, eliminando os erros

causados por estes fatores. Além disso, uma atenção maior foi dada à calibração e à validação desta, bem como o parâmetro estacionário do método da intensidade sonora. Estas foram feitas com dimensões controladas, com os microfones a 1 metro de distância e angulação normal à fonte geradora de ruído. Um maior cuidado com o posicionamento dos microfones em relação à superfície de medição foi tomado para minimizar os erros relativos ao posicionamento. Para ambos os métodos, a fonte de ruído funcionou com a mesma nível de pressão sonora no valor de 76,3dB, o que alterou também o valor do fator de correção do ruído ambiente K_1 para o método da pressão sonora

A partir destes novos ensaios realizados para pressão e intensidade sonoras, com a presença de uma fonte geradora de ruído de fundo, temos o nível de potência sonora pelo método da pressão obtido pelo medidor integrador no valor de 85,8 dBA mostrado na Tabela 19, e o valor da potência sonora obtida no *software* dBFa mostrado na Figura 52.

Tabela 19 - Segunda Medição pelo Método da Pressão Sonora

K_2 [dB]	$\overline{L'_{P(B)}}$ [dB]	ΔL_p [dB]	K_1 [dB]	L_p [dB]	L_w [dB]
5,3	76,3	8,3	0,7	78,6	85,8

Fonte: Autoria própria

Título	Intensidade										
Data	25/10/2016										
Padrão	ISO 9614 parte 1 (06-01-1993)										
Software	dBFa Versão 4.9.1										
Arquivo	C:\Documents and Settings\User\Desktop\aspirador II LW1.CMG										
Pontos totais	45										
Superfície total	5,1680 m ²										
Grade de precisão	Engenharia										
Frequência Hz	+ + I < 1.5dB	F1 <= 0.6	Ld dB	F2 dB	F3 dB	N	CF4 ²	F4	Lw dB(A)	Li dB	Lp dB
A			13,6	6,5	6,5	45	31	1,0	84,8	77,6	84,1

Figura 52- Segunda medição de nível de Potência Sonora

Fonte: *Software* dBFa 4.9.1

Os valores obtidos para os níveis de potência sonora para os dois métodos são explicitados pela Tabela 20.

Tabela 20 - Potência sonora: Resultados Secundários

	Método da Pressão Sonora [dB]	Método da Intensidade Sonora [dB]	Diferença percentual entre as medições [%]
1ª medição com fonte geradora de ruído de fundo	88,7±1,6	92,1±2,0	3,7
2ª medição com fonte geradora de ruído de fundo	85,8±1,6	84,8±2,0	1,1

Fonte: Autoria Própria

Uma vez que estas segundas medições foram realizadas com os parâmetros variáveis mais bem controlados do que nas primeiras medições, nota-se que há uma convergência dos valores obtidos para com o valor encontrado no SELO RUÍDO na carenagem do equipamento. Sendo assim, a partir de então, utilizaremos apenas os valores da segunda medição para base de discussão, eliminando tanto os valores de ambos os métodos para o caso sem fonte geradora de ruído de fundo quanto para o caso da primeira medição com fonte geradora de ruído de fundo.

5.5 Análise Secundária dos Resultados

Analisando os resultados obtidos na segunda medição de potência sonora, para ambos os casos, nota-se que os valores aliados às suas respectivas incertezas, confirmam a hipótese levantada de que, independentemente da normativa utilizada, os valores das potências sonoras deveriam ser os mesmos dentro de uma margem de incerteza aceitável descritas em normas. A Figura 53 explicita a intersecção dos valores e a convergência destes para com o valor nominal do equipamento.

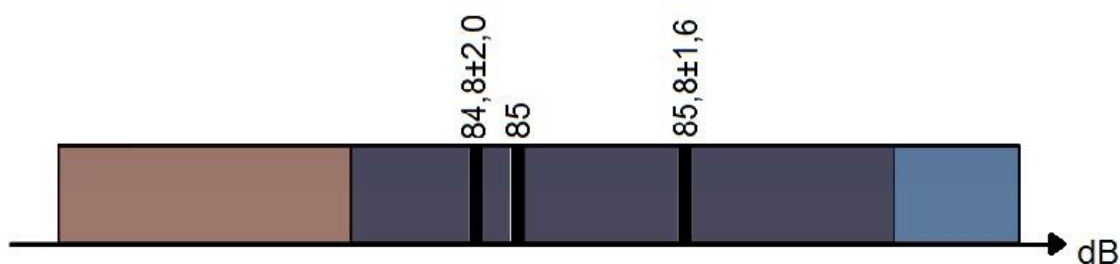


Figura 53 - Valores de Potência e suas Incertezas

Fonte: Autoria própria

Sendo que a faixa em laranja mostra a área coberta apenas pelo valor da potência sonora medida através do método da intensidade sonora e sua incerteza. A faixa azul corresponde à área coberta apenas pelo valor da potência sonora medida através do método da pressão sonora e sua incerteza. E finalmente, a faixa mais escura, resultado da combinação de cores das outras duas faixas, que mostra a área de intersecção entre os valores obtidos para as duas potências sonoras, e nota-se que o valor nominal de 85dB se encontra na intersecção acima citada.

5.5.1 Diferenças entre as Medições

A diferença entre os resultados foi de 1dB, que corresponde a 1,1% de diferença percentual entre os valores, para o caso com fonte geradora de ruído de fundo, conforme mostra a tabela 20. Este valor corrobora a execução adequada da normativa, uma vez que os valores obtidos através das medições se aproximam do valor esperado.

5.5.2 Diferenças entre o valor Nominal e os valores obtidos

Como mostrado no SELO RUÍDO da seção 3.1.1, os valores das medições deveriam convergir para o valor nominal de 85dB(A), valor este que foi determinado quando o equipamento estava em perfeitas condições. Levando-se em conta o tempo de uso do equipamento, que é de aproximadamente 4 anos, o que leva a uma série de desgastes mecânicos e que estes possam aumentar a emissão de ruído a

valores que flutuam próximos ao nominal, assumimos que o resultado foi satisfatório, tendo em vista que os valores obtidos estão dentro de ambas as tolerâncias e muito próximos a 85dB.

5.6 Levantamento no Nível de Pressão Sonora através do procedimento de medição de Intensidade Sonora

Paralelamente ao projeto deste trabalho, foi verificado que, ao tratarmos os dados provindos das medições de intensidade sonora no *software* dBFa 4.9.1, que além de informações referentes ao método em questão, o *software* também mostrava o valor do nível de pressão sonora L_{pA} , tanto para a superfície total, como para um ponto específico, caso fosse necessário.

Tabela 21 - Comparação entre pressões e métodos

Pressões obtidas	Método da Pressão Sonora [dB]	Método da Intensidade Sonora [dB]	Diferença percentual entre as medições [%]
Com fonte geradora de ruído de fundo	85,8±1,6	86,5±2,0	0,8

Fonte: Autoria Própria

Tendo em vista a baixa diferença percentual entre os valores das medições, podemos tomar como satisfatório o resultado dessa comparação e afirmarmos que o nível de pressão sonora pode ser obtido com um alto grau de confiabilidade através da realização da medição de intensidade sonora. Sendo assim, não se faz necessária a utilização de dois equipamentos diferentes para o levantamento dos dados referentes à pressão e à intensidade sonora, visto que com apenas um equipamento estes valores são obtidos, e conseqüentemente, diminuindo o tempo necessário para a realização do experimento e/ou medição. Além disso, o fato de se utilizar apenas um equipamento para o levantamento de dois dados distintos elimina

o fator de erro ambiental, visto que as mesmas condições ambientais são aplicadas simultaneamente para ambos os métodos.

6 CONCLUSÕES

As áreas de estudos relacionadas a acústica vem ganhando importância, uma vez que a poluição sonora já é uma realidade nas sociedades modernas, ou seja, é vital o entendimento e a quantificação dos ruídos para se atuar direta ou indiretamente a fim de se amenizar os problemas. Este trabalho veio a somar na pesquisa relacionada a essa área, uma vez que ainda dentro da UTFPR a área acústica é uma disciplina relativamente jovem.

No decorrer da pesquisa, conceitos básicos relacionados a acústica tiveram que ser elucidados para dar o embasamento necessário à continuidade do entendimento dos parâmetros envolvidos nas medições realizadas. Esses conceitos serviram de amparo para se medir o tempo de reverberação da sala, nível de ruído de fundo e níveis de potência sonora pelos métodos da pressão e intensidade que de fato eram o escopo deste projeto.

Para se criar a base de dados necessária para a análise do objetivo deste trabalho, foram realizadas mais de 200 medições, que englobaram a técnica da pressão sonora e intensidade sonora, a superfície de medição foi construída com materiais recicláveis uma vez que o tema da sustentabilidade merece ser levado em consideração.

Os equipamentos e ambientes que eram necessários para as medições foram disponibilizados pela UTFPR, isso foi um grande facilitador durante o período de coleta de dados propriamente dito. Todo o suporte técnico foi dado pelo orientador deste trabalho que possui experiência na área acústica e isso teve um impacto extremamente positivo, pois propiciou uma direção concreta de onde chegar e como chegar.

Ficou evidenciado que a metodologia experimental, deve ser extremamente cuidadosa e amparada em diretrizes que já estão estabelecidas, no caso deste trabalho as normas ISO 9614-1 e ISO 3744. A limitação da técnica experimental, como repetitividade das medições é um grande problema, erros relacionados às medições e dos equipamentos são inerentes a este processo, uma vez que as medições tiveram que ser realizadas novamente para comparação entre os

resultados obtidos e validação dos mesmos. Foi observado que o método da Intensidade Sonora é um método que exige mais do operador pela quantidade de parâmetros a serem observados, em contrapartida este fornece uma quantidade de dados muito superior à fornecida pelo Método da Pressão Sonora, possibilitando uma análise muito mais aprofundada do objeto de estudo.

Os temas relacionados a acústica deveriam ter uma continuidade na pesquisa para o fortalecimento dessa disciplina dentro da UTFPR, o fato de possuir os equipamentos e estes serem de alta tecnologia, ressaltando que a sonda da intensidade quase não é encontrada em universidades brasileiras, possibilita o início do desenvolvimento de pesquisas nessa área.

7 REFERÊNCIAS

ABO-QUDAIS, ABU-QDAIS, **Perceptions and attitudes of individuals exposed to traffic noise in working places.**

ALMADA. m-
almada.pt/portal/page/portal/AMBIENTE/AR/?amb=0&actualmenu=4823664&ambien
te_ar=12885940&cboui=12885940, 2007. Visitado em 19 de maio de 2016.

AUDACITY. audacitytem.org. Visita em 12 de abril de 2016.

BERANEK, L. , **“Accoustics” Published for the Accoustical Society of America by American Institute od Physics**, 1990

BELOJEVIC G, JACOVljeVIC B, Aleksic O. **Subjective reactions to traffic noise with regard to some personality.** Environment International 1997;23:221–6.

BETTINI, Wellington. **Medição do Nível de Potência Acústica em Ambientes Reverberantes.** 2013. Monografia (Engenharia Industrial Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica. Curitiba, 2013.

BRIGGS, A; OLEG, K. **Acoustic microscopy.** Oxford University Press, 2009.

BRUEL & KJAER, **Measuring Sound**, 1984.

BRUEL & KJAER, **Sound Intensity** 2016
<http://www.brd-noise.com/environmental.aspx> acesso em 24 de maio de 2016.

CATAI R. , PENTEADO A., DALBELLO P. **Materiais, Técnicas e Processos para Isolamento Acústico.**

CROKER, M. J., ARENAS, J.P. **Fundamentals of the Direct Measuremet of Sound Intensity and Pratical Applications.** Acoustical Physics, Vol. 49, No. 2, p 199-214. 2003.

crom.com.br/produtos/ruído_e_vibração/dodecaedro. Acesso em 23 de maio de 2016.

DINATO, Antonio Carlos. **Ruído sonoro no Entorno de Aeroportos – Um Estudo de Caso no Aeroporto de Ribeirão Preto**. Tese de Doutorado. USP. São Carlos, 2011. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-05082011-101359/publico/Dinato.pdf>. Acesso em 19 de maio de 2016.

FAHY, F. J. **Sound Intensity**. London: Elsevier Applied Science. 278 p. 1989.

FAHY, F. J., **Sound Intensity**, 2nd ed. E. & F. N. Spon, London, 1995.

FELICIO, Jair. **Avaliação da Exposição ocupacional ao Ruído em Atividades que utilizam Fones de Ouvido (Headsets e Headphones)** – Dissertação de Mestrado. USP. São Paulo, 2008. Disponível em http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-26092008-103652/publico/Dissertacao_PMI_Ed_Rev_JAIR_FELICIO.pdf. Acesso em 11 de maio de 2016.

FERNANDES, G, **Implementação em DSP de um sistema Real Time Analyser**, 2002.

FILHO, Ricardo Humberto de oliveira. **FONTES DE RUIDO**. Universidade federal de Uberlândia.

FILLIPI, P. (Ed.) (1998). **Acoustics: Basic physics, theory and methods**. Academic Press.

G.R.A.S. Sound And Vibration, <http://www.gras.dk/>. Acessado em 08 de setembro de 2016.

GERGES, Samir N. Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**, 1nd edition, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil 1992.

GADE, S **Sound Intensity (Theory)**, Technical Review N° 3 Bruel&Kjaer Publication 1982.

HALLIDAY, David; "**Fundamentals of Physics**"; 6^a ed. ISBN 0-471-33235-6.

HANSEN, Colin H. **FUNDAMENTALS OF ACOUSTICS**. University of Adelaide, 2002.

HONGISTO, V. **Airbone Sound Insulation of Wall Structures** – Measurement Prediction Methods. Doctoral Tesis. Helsinki University of Technology, Espoo 2000.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 15186-1 **Acoustics –Measurement of Sound insulation in Buildings and of Building elements using sound intensity – Part 1Laboratory measurements**. Geneva, 2000.

ISO 3744:2010(E), **Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure- Engineering methods for an essentially free field over reflecting plane**.

ISO 140-3, **Acoustics - Measurements of sound insulation in buildings and of buildings elements**, part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements.

ISO 9614-1:1993, **Acoustics-determination of the sound power levels of noise sources by sound intensity measurement. Part I measurement at discrete points**.

ISO 9614-2:1993, **Acoustics-determination of the sound power levels of noise sources by sound intensity measurement. Part 2 measurement by scanning**.

JACOBSEN, F. ,**An Overview of the Sources of Error in Sound Power Determination Using the Intensity Technique**, 1997.

JACOBSEN, F. **AN ELEMENTARY INTRODUCTION TO ACOUSTICS**. Technical University of Denmark, 2011 .

JACOBSEN, F. **Sound Intensity and its Measurement and Applications**. Technical University of Denmark, 2011 .

KAMATA ,M. , IKEDA,H., BABA, N., **Engineering Method os Sound Power Determination for Marines Engines**.

KINSLER, L.E., FREY A.R.,COPPENS A.B. and SANDERS J.V., **Fundamentals of Acoustics** , Third Edition, John Wiley & Sons, 1982.

KREMPEL, Daniel. **Câmaras anecóicas -Princípios de projeto**. Usp Poli-Íntegra, 2015.

LACERDA, A.P. de. **AudiologiaClínica**.. Rio de Janeiro. Ed. Guanabara. 1976. 199 p.

LEE, Jen John. **Formação e Processamento de Imagens de Ultrassom** – Dissertação de Mestrado. USP. Campus de Bauru, 2010. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18152/tde-24062010-154946/publico/Jen.pdf> acesso em 20 de maio de 2016.

MACHADO, W., **Identificação de Fontes de Ruído Externo de um Veículo Utilizando a Técnica da Intensidade Sonora**,2003 p 52.

MATOS, Marcos Paiva & SANTOS, Ubiratan de Paula. **Medidas de Controle de Ruído**, 1996.

MENEGOTTO, I. H. & COUTO, C. M. **Tópicos de Acústica e Psicoacústica44 Relevante em Audiologia**: In.: FROTA, S. Fundamentos em Fonoaudiologia – Audiologia. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan. 1998. p. 19-39.

MEDEIROS, Luana, **Ruídos efeitos extra - auditivos no corpo humano**.

MOREIRA, Anabela. **Acústica nos Edifícios**. Escola Superior de Tecnologia de Tomar. Tomar, 2013. Disponível em http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2959__AcusEdif_FC_Parte1.pdf. Acesso em 15 de março de 2016.

NEPOMUCENO, Luíza de Arruda; **Elementos de Acústica Física e Psicoacústica**; 1ª edição; São Paulo, 1994.

OBERREUTER, Jonathan. **Cámara reverberante y cámara anecoica** – NEAA. Universidad Austral de Chile. Valdivia. Chile. 2011. Disponível em <http://www.youtube.com/watch?v=y9c1Vog0dXo>. Acesso em 26 de maio de 2016.

PATRICIO, J. **Acústica de Edifícios: índices de isolamento a sons aéreos utilizados no espaço europeu**. *Revista de Acústica*. Vol 35 n 3 e 4. p. 5-11, 2004.

PEROSI, Fábio André. **Refração Sísmica Profunda no Setor Sudeste da Província Tocantins** – Dissertação de Mestrado. USP. São Paulo, 2000. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/14/14132/tde-25052006-152642/pt-br.php> acesso em 16 de maio de 2016.

PIMENTAL-SOUZA F. (1998). **Perturbação do sono pelo ruído. (Revisão)**. In: Rumão R. (ed.); *O sono em seus vários aspectos*. *Jornal Brasileiro de Psiquiatria (indexada internacionalmente)*, vol. 47, suplemento 1.

ROCHA, L., **Estudo e Análise da Acústica de Ambientes submetidos a Sistemas de Áudio**, 2004.

RUSSO, I.C.P. & SANTOS, T.M.M. **A prática de audiologia clínica**. São Paulo, Cortez, 1993. 253p.

RUSSO, I.C.P. et al. **Um estudo comparativo sobre os efeitos da exposição à música em músicos de Trio Elétrico**. *Rev. Bras. de Otorrinolaringologia*. Vol. 61, nº 6, p. 477-482. 1995.

SANTOS, U; MATOS, M. **Aspectos da física**. In: SANTOS, U. *Ruído: riscos e prevenção*. São Paulo: Hucitec, 1994.

SEGURA, Jaume. **CONDICIONES ACÚSTICAS DE LA CÁMARA ANECÓICA ELECTROMAGNÉTICA**. Universitat de València, 2001.

TEKATLIAN, A , FILIPPI, P. , and HABAULT,D. **Determination of Vibration Characteristics of Noise Sources Solving and Inverse radiation Problem.**

WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO (UK).**Résumé d'Orientation des Directives de l'OMS Relatives au Bruit dans l'Environnemental.**
Disponível em: <<http://www.who.int/home.page/>> Acesso em: 12 mai. 2016.