

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

SAMUEL JANZEN

**ESTUDO DA GERAÇÃO DE INFRASSOM COM DIFERENTES TIPOS
DE TRANSDUTORES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2017

SAMUEL JANZEN

**ESTUDO DA GERAÇÃO DE INFRASSOM COM DIFERENTES TIPOS
DE TRANSDUTORES**

Trabalho de Conclusão de Graduação, apresentado à disciplina de TCC 2, do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Rosa

CURITIBA

2017

Samuel Janzen

Estudo da geração de infrassom com diferentes tipos de transdutores

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro de Controle e Automação, do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 22 de maio de 2017.

Prof. Paulo Sérgio Walenia, Esp.
Coordenador de Curso
Engenharia de Controle e Automação

Prof. Marcelo de Oliveira Rosa, Dr.
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia de Controle e Automação do DAELT

ORIENTAÇÃO

Marcelo de Oliveira Rosa, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Antonio Carlos Pinho, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Amauri Amorin Assef, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcelo de Oliveira Rosa, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia de Controle e Automação

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida, e estar sempre ao meu lado, ao meu pai Ernst, minha mãe Dorothy, meus irmãos e à minha namorada Georgia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida, saúde e força durante meus estudos.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela oportunidade de fazer o curso.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo de Oliveira, pelo suporte e apoio na elaboração deste trabalho.

Aos meus colegas da turma 2011.1, pela amizade e pelas muitas horas de estudo durante todo curso.

Aos professores e colegas da TU Dresden, pela ajuda no desenvolvimento do meu interesse e conhecimento na área da acústica e no projeto.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio ao longo de todos meus anos de formação acadêmica.

À minha namorada Georgia, por continuar firme ao meu lado, me suportando e incentivando, mesmo durante o intercâmbio.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

JANZEN, Samuel. **Estudo da Geração de Infrassom com Diferentes Tipos de Transdutores**. 2017. 91 p. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Uma característica do infrassom é a indução da sensação de vibração. Neste estudo, foi investigado o nível de pressão sonora em frequências muito baixas necessárias para produzir uma sensação de vibração em uma pessoa. Para isso, foram feitas medições para verificar a relação entre o nível de pressão sonora gerado por um sinal de teste e os níveis de aceleração induzidos no corpo de uma pessoa de teste. Verificou-se que o nível de aceleração resultante é 10 dB menor que o nível de pressão sonora de um sinal de teste. Baseado em medições de outra pesquisa, que determinou a aceleração do corpo necessária para produzir uma sensação de vibração, verificou-se que é necessário um nível de pressão sonora de cerca de 100 dB nas frequências de infrassom para garantir a sensação de vibração. Em seguida, foram estudados diferentes princípios transdutores para a geração de frequências na área do infrassom nesse elevado nível de 100 dB, comprovando-se que os princípios de transdutores já presentes no mercado não são adequados para a geração de infrassom. Alguns princípios de transdutores alternativos foram estudados, como o transdutor de tubo de órgão, ou o Rotary Woofer, mas que por serem muito grandes e caros, também se provaram inadequados para uma aplicação real de geração de infrassom. Portanto, novos princípios de transdutores foram estudados e verificou-se que o princípio da modulação de fluxo de ar era a melhor opção para a geração de infrassom. O protótipo de um transdutor com este princípio foi construído, e os resultados das medições revelaram que o princípio da modulação do fluxo de ar não gera apenas frequências na área do infrassom, mas um forte impulso, com uma ampla gama de frequências. Algumas otimizações para uma futura continuação do projeto foram sugeridas, que tornam o princípio da modulação do fluxo de ar um princípio de transdutor promissor para geração de infrassom, necessário para produzir uma sensação de vibração que influencia positivamente a experiência musical.

Palavras-chave: Infrassom. Acústica. Transdutor. Vibração.

ABSTRACT

JANZEN, Samuel. **Study of the Infrasound Generation with Different Types of Transducers**. 2017. 91 p. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

A characteristic of infrasound is the induction of vibratory sensation. In this study, the sound pressure level at very low frequencies necessary to produce a vibratory sensation on a person was investigated. For this, measurements were made to see the relation between the sound pressure level generated by a test signal and the induced acceleration levels at a test person's body. It was found that the resulting acceleration level is 10 dB less than a test signal's sound pressure level. Based on measurements of another research, that determined the body's acceleration necessary to produce a vibratory sensation, it was found that a sound pressure level of about 100dB at infrasound frequencies is needed to ensure a vibratory sensation. After that, different transducer principles for generating infrasound frequencies at those levels were studied, and it was proved that the transducer principles already present in the market are not suitable for the infrasound generation. Some alternative transducer principles were studied, such as the Organ Pipe transducer, or the Rotary Woofer, but also proved too big and expensive for a real infrasound generation application. Therefore, new transducer principles were studied, and it was found that the airflow modulation principle was the best option to generate infrasound. A prototype of a transducer with this principle was built, and the measurements results revealed that the airflow modulation principle generates not only infrasound frequencies, but a high impulse, with a wide range of frequencies. Some optimizations for the project continuation were suggested, making the airflow modulation principle a promising transducer principle for infrasound generation, necessary to produce a vibratory sensation which positively influences the music experience.

Keywords: Infrasound. Acoustics. Transducer. Vibration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Áreas do espectro sonoro	13
Figura 2 – Localização do infrassom da faixa de frequência	16
Figura 3 – Limite de níveis de pressão sonora para efeitos de infrassom	18
Figura 4 – Compressão e descompressão criados pela membrana do transdutor... ..	20
Figura 5 – Princípio do transdutor eletrodinâmico	21
Figura 6 – Partes de um Alto-Falante	22
Figura 7 – princípio do transdutor eletrodinâmico	23
Figura 8 – Princípio de funcionamento do <i>Ribbon Speaker</i>	24
Figura 9 – Tweeter com o princípio do <i>Ribbon Speaker</i>	25
Figura 10 – Princípio do transdutor magnetostático, visto por um corte lateral	25
Figura 11 – Princípio do transdutor eletrostático	27
Figura 12 – Princípio do transdutor piezoelétrico	28
Figura 13 – Princípio do transdutor Servo Drive	28
Figura 14 – Densidade espectral de potência do ruído branco	30
Figura 15 – Densidade espectral de potência do ruído rosa	30
Figura 16 – Montagem de um acelerômetro piezoelétrico	33
Figura 17 – Princípio do Vibrômetro Laser-Doppler	34
Figura 18 – Rascunho da sala para a realização dos ensaios	36
Figura 19 – Configuração da sala para a realização dos ensaios	36
Figura 20 – Rascunho da câmara anecoica para a realização dos ensaios	37
Figura 21 – Configuração da câmara anecoica para a realização dos ensaios	37
Figura 22 – Vibração inerente no peito	38
Figura 23 – Vibração inerente no pescoço	38
Figura 24 – Níveis de aceleração do armário medidos pelo vibrômetro e pelo acelerômetro com o ruído branco como sinal de teste	40
Figura 25 – Níveis de aceleração no pulso medidos pelo vibrômetro e pelo acelerômetro, sem o sinal de teste	40
Figura 26 – Níveis de ruído do vibrômetro e do acelerômetro medidos na parede da sala, sem a geração de ruído branco	41
Figura 27 – Níveis de aceleração medidas no peito pelo vibrômetro e níveis de aceleração medidas no vibrômetro pelo acelerômetro, ambos com as medições de referência (sem o sinal de teste)	42
Figura 28 – Partes do corpo em que a aceleração foi medida na sala sem tratamento acústico	43
Figura 29 – Nível de aceleração no peito e nível de pressão sonora do sinal de teste	44
Figura 30 – Nível de aceleração no pescoço e nível de pressão sonora do sinal de teste	44
Figura 31 – Nível de aceleração no pulso e nível de pressão sonora do sinal de teste	44
Figura 32 – Nível de aceleração na testa e nível de pressão sonora do sinal de teste	44
Figura 33 – Nível de aceleração do armário e nível de pressão sonora do sinal de teste	45
Figura 34 – Nível de aceleração no armário e nível de pressão sonora do sinal de teste com as simulações de perda de sinal	45
Figura 35 – Espectrograma da medição com simulação de perdas de sinal	45

Figura 36 – Nível de aceleração do pulso e nível de pressão sonora para a primeira magnitude do sinal de teste, com referência.....	47
Figura 37 – Nível de aceleração do pulso e nível de pressão sonora para a segunda magnitude do sinal de teste	47
Figura 38 – Nível de aceleração do pulso e nível de pressão sonora para a terceira magnitude do sinal de teste	47
Figura 39 – Nível de aceleração do pulso e nível de pressão sonora para a quarta magnitude do sinal de teste	47
Figura 40 – Nível de aceleração do peito e nível de pressão sonora a primeira magnitude do sinal de teste, com referência.....	48
Figura 41 – Nível de aceleração do peito e nível de pressão sonora para a segunda magnitude do sinal de teste	48
Figura 42 – Nível de aceleração do peito e nível de pressão sonora para a terceira magnitude do sinal de teste	48
Figura 43 – Partes do corpo em que a aceleração foi medida na câmara anecoica	49
Figura 44 – Nível de aceleração na posição Peito 1 e nível de pressão sonora para a primeira magnitude do sinal de teste, com referência.....	50
Figura 45 – Nível de aceleração na posição Peito 1 e nível de pressão sonora para a segunda magnitude do sinal de teste.....	50
Figura 46 –Nível de aceleração na posição Peito 1 e nível de pressão sonora para a terceira magnitude do sinal de teste	50
Figura 47 – Nível de aceleração na posição Peito 2 e nível de pressão sonora para a primeira magnitude do sinal de teste, com referência.....	51
Figura 48 – Nível de aceleração na posição Peito 2 e nível de pressão sonora para a segunda magnitude do sinal de teste.....	51
Figura 49 –Nível de aceleração na posição Peito 2 e nível de pressão sonora para a terceira magnitude do sinal de teste	51
Figura 50 – Nível de aceleração na posição Pescoço 1 e nível de pressão sonora para a primeira magnitude do sinal de teste, com referência	52
Figura 51 – Nível de aceleração na posição Pescoço 1 e nível de pressão sonora para a segunda magnitude do sinal de teste	52
Figura 52 – Nível de aceleração na posição Pescoço 1 e nível de pressão sonora para a terceira magnitude do sinal de teste	52
Figura 53 – Nível de aceleração na posição Pescoço 1 e nível de pressão sonora para a quarta magnitude do sinal de teste	52
Figura 54 – Nível de aceleração na posição Pescoço 2 e nível de pressão sonora para a primeira magnitude do sinal de teste, com referência	53
Figura 55 – Nível de aceleração na posição Pescoço 2 e nível de pressão sonora para a segunda magnitude do sinal de teste	53
Figura 56 – Nível de aceleração na posição Pescoço 2 e nível de pressão sonora para a terceira magnitude do sinal de teste	53
Figura 57 – Nível de aceleração na posição Pescoço 2 e nível de pressão sonora para a quarta magnitude do sinal de teste	53
Figura 58 – Nível de aceleração na posição Pescoço 3 e nível de pressão sonora para a primeira magnitude do sinal de teste, com referência	54
Figura 59 – Nível de aceleração na posição Pescoço 3 e nível de pressão sonora para a segunda magnitude do sinal de teste	54
Figura 60 – Nível de aceleração na posição Pescoço 3 e nível de pressão sonora para a terceira magnitude do sinal de teste	54

Figura 61 – Nível de aceleração na posição Pescoço 3 e nível de pressão sonora para a quarta magnitude do sinal de teste	54
Figura 62 – Nível de aceleração na posição Peito 3 e nível de pressão sonora para a primeira magnitude do sinal de teste, com referência.....	55
Figura 63 – Nível de aceleração na posição Peito 3 e nível de pressão sonora para a segunda magnitude do sinal de teste.....	55
Figura 64 – Nível de aceleração na posição Peito 3 e nível de pressão sonora para a terceira magnitude do sinal de teste	55
Figura 65 – Nível de aceleração na posição Peito 3 e nível de pressão sonora para a quarta magnitude do sinal de teste	55
Figura 66 – Nível de aceleração na posição do Abdômen e nível de pressão sonora para a primeira magnitude do sinal de teste, com referência	56
Figura 67 – Nível de aceleração na posição do Abdômen e nível de pressão sonora para a segunda magnitude do sinal de teste	56
Figura 68 – Nível de aceleração na posição do Abdômen e nível de pressão sonora para a terceira magnitude do sinal de teste	56
Figura 69 – Nível de aceleração na posição do Pulso e nível de pressão sonora para a primeira magnitude do sinal de teste	57
Figura 70 – Relação entre o nível de aceleração e o nível de pressão sonora nos pontos de medição	58
Figura 71 – Níveis de aceleração (VAL) para vibrações inerentes e induzidas por um sinal de teste, medidas no lado direito do peito	59
Figura 72 – Comparação do limite da aceleração do corpo para uma sensação de vibração entre a mão, pé e assento para vibração vertical.....	60
Figura 73 – Limiar da sensação de vibração e da audição humana em função da frequência.....	61
Figura 74 – <i>Rotary Woofer</i>	65
Figura 75 – Resposta na Frequência do Rotary Woofer.....	67
Figura 76 – Teste com o Rotary Woofer em um caminhão	67
Figura 77 – Válvula Solenoide modelo 0330 da Burckert	71
Figura 78 – Funcionamento da Válvula de Escape Rápido	72
Figura 79 – Válvula de Escape Rápido modelo SEU-1/2 da Festo.....	72
Figura 80 – Tubo de órgão utilizado na geração de infrassom	74
Figura 81 – Diagrama da construção do protótipo de transdutor para geração de infrassom.....	76
Figura 82 – Construção do protótipo de transdutor para geração de infrassom.....	76
Figura 83 – Vista lateral da construção do protótipo.....	77
Figura 84 – Montagem e configuração do ensaio com o protótipo de transdutor.	79
Figura 85 – Nível de pressão sonora e nível de aceleração resultantes da descarga de ar do protótipo de transdutor	80
Figura 86 – Sinal do vibrômetro e do microfone em função do tempo.....	81
Figura 87 – Nível de aceleração RMS em função do tempo.....	82
Figura 88 – Nível de aceleração RMS em função do tempo com um filtro passa-baixa de 200 Hz.....	82
Figura 89 – Nível de aceleração RMS em função do tempo com um filtro passa-baixa de 50 Hz.....	83

LISTA DE ABREVIATURAS

dB	Decibel
Hz	Hertz
psi	<i>"pound force per square inch"</i>
RMS	<i>"Root Mean Square"</i>
rpm	Rotações por Minuto
SNR	<i>"Signal Noise Ratio"</i>
SPL	<i>"Sound Pressure Level"</i>
VAL	<i>"Vibration Acceleration Level"</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 TEMA	12
1.1.1 Delimitação do Tema	12
1.2 PROBLEMA E PREMISSAS	13
1.3 OBJETIVOS	13
1.3.1 Objetivo Geral	13
1.3.2 Objetivos Específicos.....	13
1.4 JUSTIFICATIVA	14
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 INFRASSOM.....	16
2.2 TRANSDUTORES	20
2.2.1 Transdutor Eletrodinâmico	21
2.2.1.1 <i>Ribbon speaker</i>	24
2.2.1.2 Transdutor magnetostático	24
2.2.2 Transdutor Eletrostático.....	26
2.2.3 Transdutor Piezoelétrico	27
2.2.4 Transdutor Servo Drive.....	28
3 INFRASSOM E SENSAÇÃO DE VIBRAÇÃO	29
3.1 MÉTODOS DE MEDIÇÃO E CONFIGURAÇÃO DOS ENSAIOS.....	29
3.2 AVALIAÇÕES PRELIMINARES.....	37
3.2.1 Medição de Vibrações Inerentes	37
3.2.2 Medição em Conjunto com um Acelerômetro.....	39
3.2.3 Vibração do Vibrômetro Laser-Doppler	41
3.3 ENSAIOS PERCEPTUAIS NA SALA SEM TRATAMENTO ACÚSTICO	42
3.4 ENSAIOS PERCEPTUAIS NA CÂMARA ANECOICA.....	49
3.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS PERCEPTUAIS.....	57
3.6 GERAÇÃO DE SENSAÇÃO DE VIBRAÇÃO.....	62
4 GERAÇÃO DE INFRASSOM	65
4.1 DIFERENTES PRINCÍPIOS DE TRANSDUTORES PARA GERAÇÃO DE INFRASSOM	65
4.1.1 Transdutor com o Princípio de Excitação de Um Ventilador	65
4.1.2 Transdutor com o Princípio de Excitação Pneumático ou Hidráulico	67
4.1.3 Transdutor com o Princípio de Excitação de Modulação de Fluxo de Ar	69
4.1.3.1 Modulação de fluxo de ar com válvulas	69
4.1.3.2 Modulação de fluxo de ar com outros mecanismos.....	73
4.1.4 Outros Princípios de Transdutores	73
4.2 CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO COM O PRINCÍPIO DE EXCITAÇÃO DE MODULAÇÃO DE FLUXO DE AR	75
4.2.1 Construção.....	75
4.2.2 Ensaios e Resultados	77
5 CONCLUSÕES	84
REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Acústica é um termo usado, de uma forma geral, para descrever a arte e a ciência que envolve o som e todas as suas diferentes formas e manifestações. Especificamente, a acústica envolve a geração, transmissão, recepção, absorção, conversão, detecção, reprodução, e o controle de som (OLSON, 1957).

Uma importante seção da acústica é a sua reprodução, que está presente de diversas formas no mundo atual, seja em aparelhos eletrônicos, como celulares, *notebooks*, televisões, ou em grandes shows e concertos. Em todos esses casos, a reprodução de som é feita por alto-falantes, que, através de um sinal elétrico, produzem vibrações, e por consequência, ondas sonoras (TALBOT-SMITH, 2013).

A história dos alto-falantes como se conhecem hoje, teve seu início em 1874 com Ernst W. Siemens, que pela primeira vez patenteou um transdutor “dinâmico” ou de bobina móvel. Após isso, muitos estudos foram feitos e patentes registradas, de maneira que hoje existem alto-falantes dos mais diversos tipos e aplicações (SCHOENHERR, 2011).

1.1.1 Delimitação do Tema

Apesar da grande quantidade de alto-falantes disponíveis no mercado, a possibilidade de novas aplicações e novas necessidades sempre existe. Um caso é o de alto-falantes capazes de gerar o que é conhecido como infrassom. Infrassom é definido como a área de som abaixo de 20 Hz e abaixo do limiar da audição humana, conforme pode-se observar na Figura 1, o que significa que ele é inaudível, sendo possível apenas senti-lo.

Porém, estudos recentes demonstram que o infrassom pode ser usado para favorecer a experiência musical (MERCHEL, 2014), fazendo com que as pessoas “sintam” as músicas, criando, assim, a necessidade de estudos nessa área, bem como o desenvolvimento de transdutores capazes de gerá-lo.

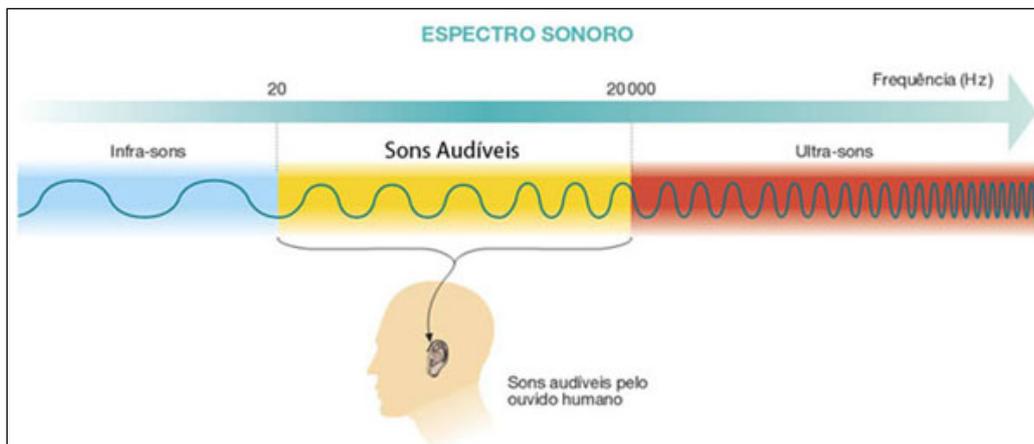


Figura 1 - Áreas do espectro sonoro
Fonte: CAVALEIRO, M. Neli (2006).

1.2 PROBLEMA E PREMISSAS

A geração de infrassom a elevados níveis de pressão sonora é, justamente, o grande problema. Assim, a questão principal que norteou este trabalho foi: como gerar níveis suficientemente altos de infrassom de maneira simples e eficiente, a fim de criar uma sensação de vibração em pessoas?

Pressupôs-se que conhecer o nível de pressão sonora capaz de criar uma sensação de vibração possibilitaria a determinação de qual o nível mínimo de infrassom que precisaria ser gerado para criar a sensação de vibração. Além disso, conhecer e estudar os diferentes tipos de transdutores já existentes e seus princípios de funcionamento ajudou a entender qual a melhor maneira de gerar o infrassom.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Gerar infrassom a níveis suficientes para criar a sensação de vibração em pessoas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar a relação entre nível de pressão sonora e a sensação de vibração;

- Determinar o nível de pressão sonora mínimo para criar a sensação de vibração em pessoas;
- Analisar diferentes tipos de transdutores e sua aplicabilidade à geração de infrassom;
- Criar um protótipo de um transdutor para geração de infrassom.

1.4 JUSTIFICATIVA

A reprodução de som para uma boa experiência ao ouvir músicas sempre esteve em um constante desenvolvimento dentro da área da engenharia e acústica. Este conceito de uma boa experiência é muito relativo, mas ao se tratar de grandes shows, por exemplo, isso normalmente não é definido somente pela música ouvida, mas também sentida. Além disso, essa questão já foi mostrada experimentalmente, verificando que a percepção de intensidade e de qualidade na experiência de shows e concertos é afetada pela vibração da superfície do corpo (MERCHEL, 2014).

Acredita-se que "buscar vibração", ou seja, uma boa experiência de audição, é a razão para níveis de pressão sonora tão altos das músicas em shows, o que poderia até levar a lesões auditivas permanentes. Este perigo pode ser evitado através da geração de elevados níveis de infrassom, resultando apenas em vibração, já que as frequências abaixo de 20 Hz são inaudíveis.

Além disso, maneiras viáveis e eficientes de gerar infrassom a elevados níveis de pressão sonora ainda são desconhecidos (BEDARD JR; GEORGES, 2000, p. 5). Os alto-falantes tradicionais, com o sistema eletrodinâmico, por exemplo, não conseguem gerar níveis suficientes de infrassom, pois mesmo quando são desenvolvidos especificamente para reproduzir frequências graves, como um *subwoofer*, reproduzem apenas frequências acima de 20Hz. Assim, é necessário estudar e criar outras possibilidades na geração de infrassom.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo do trabalho é constituído por uma introdução, contendo o tema e os objetivos do projeto, definindo o problema de pesquisa, e a justificativa da execução da mesma. O segundo capítulo contém o referencial teórico do trabalho, em

que a teoria do infrassom é explicada. Além disso, a teoria de diversos tipos de transdutores é apresentada, usados na geração de som. No terceiro capítulo são apresentados ensaios e outras referências para determinar a relação entre o nível de pressão sonora e a sensação de vibração em pessoas, sendo assim possível verificar a viabilidade de aplicar os transdutores já existentes no mercado para geração de infrassom. No quarto capítulo, é feito um estudo de diferentes princípios transdutores para aplicação na geração de infrassom. Além disso, é construído um protótipo de transdutor, baseado nos estudos anteriores, e os resultados são analisados, verificando a real aplicação desse transdutor na geração de infrassom, assim como possíveis melhorias na sua construção. A conclusão do trabalho é apresentada no quinto capítulo, seguido das referências bibliográficas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 INFRASSOM

O termo infrassom foi definido seguindo-se a convenção adotada a aproximadamente dois séculos para ondas eletromagnéticas (ondas de luz). As ondas mais compridas, localizadas abaixo do vermelho do espectro de cores visíveis foram chamadas de infravermelho, assim como as ondas mais curtas, à frente da cor violeta, foram chamadas de ultravioleta. “Infra” e “ultra” vêm do latim e significam “abaixo” e “além”, respectivamente.

Como a faixa audível do ser humano vai de aproximadamente 20 Hz até 20000 Hz, as frequências de som abaixo de 20 Hz, que são inaudíveis, foram então chamadas de infrassom, enquanto que as frequências acima de 20000 Hz foram nomeadas de ultrassom. A Figura 2 mostra o infrassom, que se encontra à esquerda e abaixo do limiar da audição humana, assim como as regiões de sons familiares, que se encontram à direita.

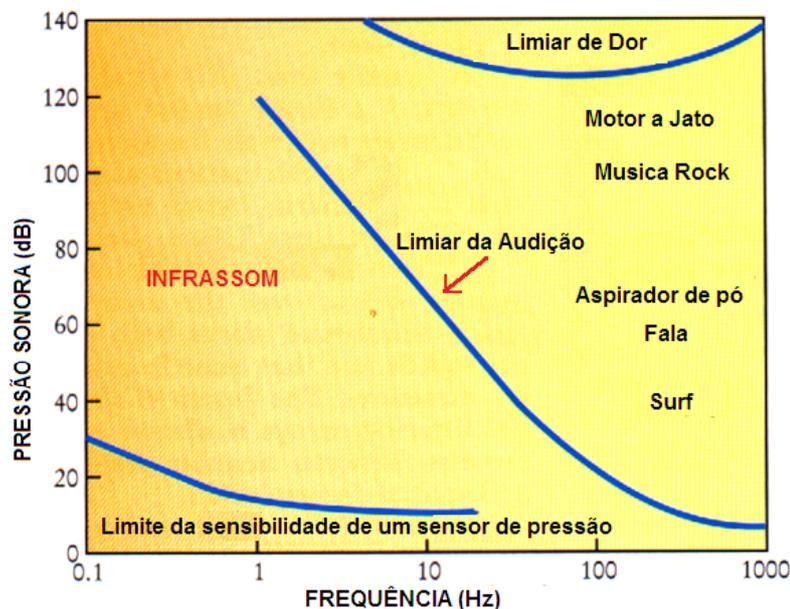


Figura 2 – Localização do infrassom da faixa de frequência
 Fonte: BEDARD JR, A. J.; GEORGES, T. M. (v. 53, n. 3, p. 32-37, 2000).

Os primeiros sinais de infrassom foram descobertos após a erupção do vulcão Krakatoa (Indonésia) em 1883. Devido às suas baixas frequências, o infrassom gerado pela erupção viajou até quatro vezes ao redor da terra, além de alcançar altitudes maiores que 100 km (BEDARD JR; GEORGES, 2000, p. 1). A capacidade

de detectar grandes explosões com infrassom resultou num grande interesse científico e social durante a Primeira Guerra Mundial (STEPHENS, 1969). Um exemplo de aplicação foi na área militar, em que se usou o infrassom para localizar armas inimigas: foram construídos dispositivos de rastreabilidade que “escutassem” o infrassom de trens a vários quilômetros de distância.

Na Segunda Guerra Mundial foram realizados outros experimentos, dessa vez para usar o infrassom como uma arma de destruição. Segundo os pesquisadores, entre eles o professor francês Wladimir Gavreau, a ideia era criar uma arma silenciosa, capaz de gerar infrassom a elevados níveis, a fim de destruir construções e até exércitos inimigos, e tudo isso sem qualquer explosão ou barulho (DIETRICH, 1968). Porém, após alguns cálculos em outro estudo, concluiu-se que o diâmetro da fonte de infrassom teria um valor impressionante 1100 m, a fim de proporcionar boas propriedades para a radiação do som. Assim, utilizar a arma durante a guerra foi inviável, pelo tamanho que ela teria, tornando-a muito indiscreta no campo de batalha (BRYAN; TEMPEST, 1972).

Por mais de 20 anos após a Segunda Guerra Mundial, o infrassom foi então utilizado basicamente para monitorar explosões nucleares. A partir de estudos nessa área, concluiu-se também que o infrassom não proporcionava apenas a localização da fonte de explosões como também informações sobre o estado da atmosfera como um todo.

Essa eficiência do infrassom na monitoração de explosões fez com que ele se tornasse um dos quatro métodos oficiais para monitorar o cumprimento do Tratado de Interdição Completa de Ensaio Nucleares (CTBT). Esse tratado, criado em 1996, proíbe todas as explosões nucleares na Terra, seja para fins militares ou pacíficos (EVERS; HAAK, 2009).

Além do seu uso na monitoração de explosões nucleares, o infrassom está presente em diversos lugares e situações ao redor do mundo. Foi comprovado cientificamente, por exemplo, que elefantes utilizam o infrassom para se comunicar por grandes distâncias a fim de localizar filhotes, encontrar presas, avisar outros elefantes de algum perigo, entre outros (PAYNE, 1998). Terremotos, avalanches, tornados e outros fenômenos naturais também são fontes conhecidas de infrassom, que podem ser ouvidos a grandes distâncias. Além disso, outro exemplo da presença do infrassom na natureza são meteoros, que podem ser localizados através da gravação de infrassom que é gerado por eles (BEDARD JR; GEORGES, 2000, p. 4).

Outro assunto envolvendo o infrassom e que é tema de diversos estudos científicos é o impacto que ele tem no ser humano, a elevados níveis. Essa preocupação já existia nos anos 70, com o infrassom gerado por objetos criados pelo ser humano, como compressores, motores, carros, navios e aviões (BRONER, 1977, p. 1).

O estudo de Stephens (1973, p. 441), por exemplo, determinou o limite de níveis de pressão sonora de infrassom que geram efeitos no ser humano, como pode ser observado na Figura 3.

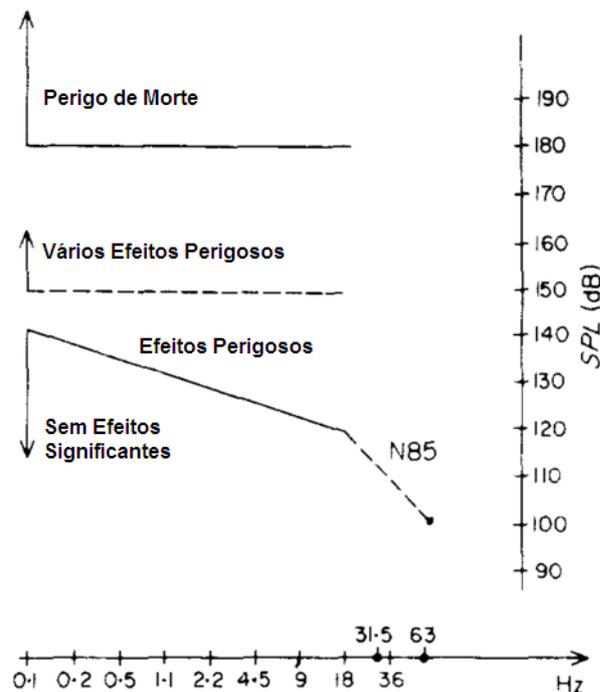


Figura 3 – Limite de níveis de pressão sonora para efeitos de infrassom
Fonte: STEPHENS (1973).

Entretanto, existem também outros estudos nos quais os resultados diferem desses apresentados, trazendo uma incerteza quanto aos reais limites de níveis de pressão sonora para efeitos de infrassom. Isso também foi exposto em outro estudo, em que os autores explicitam que existem boas razões para duvidar das conclusões obtidas na maioria das pesquisas nos efeitos do infrassom no ser humano, devido a metodologias de pesquisa fracas assim como relatórios científicos insuficientes (HARRIS; SOMMER; JHONSON, 1974).

Recentemente, a dúvida dos efeitos do infrassom no ser humano se agravou novamente com o crescente número de sistemas de geração eólica, que são fontes conhecidas de infrassom (LEVENTHALL, 2006, p.32). Diversos relatos existem, dizendo que a exposição ao infrassom gerado por esses objetos causa náusea,

desorientação, incômodo e muitos outros sintomas. Foi comprovado que realmente existem casos em que esses sintomas aparecem e que são decorrentes do infrassom. Porém, estudos demonstram que isso não tem nenhuma consequência séria para a saúde dessas pessoas, e que, ao evitar essas exposições à infrassom, provavelmente os sintomas desapareçam (LEVENTHALL, 2003).

Portanto, independente dessas dúvidas e incertezas relacionadas a esse tema, os efeitos negativos no ser humano ocasionados por infrassom, que seriam significantes estatisticamente, só ocorreriam, provavelmente, após eventos complexos e exposições longas à infrassom, como também é o caso para ruídos dentro da faixa de frequência audível do ser humano.

Além de todos esses casos do uso do infrassom em guerras, ou dos seus efeitos negativos sobre o ser humano, existem também diversos estudos que buscam aplicações favoráveis ao ser humano utilizando-se do infrassom, assim como o caso do ultrassom, muito utilizado na medicina.

Estudos recentes, por exemplo, demonstram que os sons com baixas frequências podem ser usados como terapia em pacientes com Parkinson e Alzheimer. A terapia vibroacústica (em inglês *Vibroacoustic Therapy*) consiste em produzir vibrações e aplica-las diretamente ao corpo humano. Assim, o paciente deita em uma cama ou senta numa cadeira que possui alto-falantes capazes de gerar vibrações com frequências geradas computacionalmente em torno de 20 a 40 Hz, que podem ser sentidas e ouvidas.

Um estudo recente feito no Canadá provou que o uso da terapia vibroacústica a curto prazo com pessoas portadoras do Mal de Parkinson, trouxe uma melhora nos sintomas, como menos rigidez, melhores velocidades para andar, e com menos tremores. Da mesma forma, existem estudos do uso da terapia vibroacústica com pessoas portadoras do Mal de Alzheimer, em que se estuda a possibilidade de fazer com que, através da terapia, se reestabeleça a comunicação normal entre diferentes regiões do cérebro, aumentando a recuperação da memória (NOVOTNEY, 2013).

Porém, o efeito desse tipo de terapia a longo prazo ainda permanece incerto, e continua sendo o tema de diversos estudos ao redor do mundo. Um exemplo é o estudo publicado na *International Journal of Psychosocial Rehabilitation*, que serviu de piloto para provocar futuros estudos mais aprofundados sobre o tema. Nessa pesquisa, ao explorar as perspectivas e os potenciais do uso do infrassom em tratamentos, concluiu-se que é possível aumentar o nível de relaxamento físico e

emocional das pessoas, diminuindo a dor e o stress, assim como aumentar a concentração (AHONEN; DEEK; KROEKER, 2012).

Assim como na área da medicina, o infrassom também já teve suas aplicações na área do entretenimento. Um exemplo foi a produção da Universal Studios, Hollywood, em 1974 para o filme *Earthquake* (Terremoto). Para este filme foi criado um processo para aumentar a experiência de áudio, chamado de “*Sensurround*”. Foi utilizado um gerador de ruídos a fim de gerar ruídos na área de infrassom, fazendo com que os espectadores sentissem os efeitos de terremotos (HAUERSLEY, 2011). O resultado desse processo foi muito positivo, e realmente se teve uma ilusão convincente de que a sala de cinema estaria vibrando. Isso fez com que o filme *Earthquake* até ganhasse o Oscar para Melhor Som (FRANKS, 2004).

2.2 TRANSDUTORES

Para a geração de som existem diferentes tipos de transdutores, variando desde o seu princípio de funcionamento até o seu tipo de aplicação. Nesta seção serão apresentados alguns desses tipos de transdutores, a fim de posteriormente verificar as possibilidades de usá-los para a geração de infrassom.

Praticamente todos os transdutores existentes no mercado utilizam-se de uma membrana que vibra a fim de gerar som. Essa membrana pode ter as mais variadas formas, como formato de cone, calota, membrana plana, entre outros. Basicamente, todos tipos de membrana se assemelham a um pistão circular que se movimenta para frente e para trás. Com essa movimentação, a membrana cria uma compressão e uma descompressão do ar em contato, demonstrado pela Figura 4, gerando ondas sonoras que se propagam pelo espaço (HAUSDORF, 2013, p. 19).

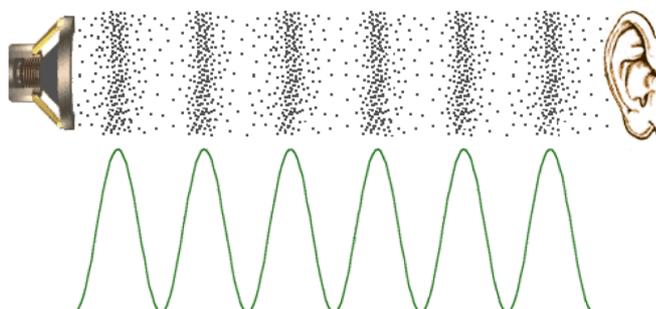


Figura 4 – Compressão e descompressão criados pela membrana do transdutor
Fonte: VAN INGE, A. (2012).

2.2.1 Transdutor Eletrodinâmico

O transdutor eletrodinâmico é o tipo de transdutor encontrado na maioria dos alto-falantes. Ele se baseia do princípio da força de Lorentz ($F = BLI$), em que um condutor, pelo qual passa uma corrente I , é suspenso de forma móvel em um campo magnético B . Quando esse condutor de comprimento L e corrente I é inserido no campo magnético B , é gerada uma força F , que faz com que o condutor passe a se movimentar. Isso acontece, pois a corrente do condutor I gera um campo magnético próprio, que quando é sobreposto ao campo magnético constante B , gera uma força F (HAUSDORF, 2013, p. 25). A Figura 5 demonstra o princípio do transdutor eletrodinâmico.

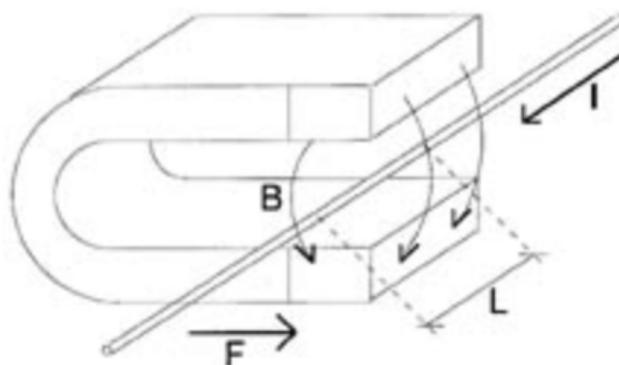


Figura 5 – Princípio do transdutor eletrodinâmico
Fonte: HAUSDORF (2013).

Uma característica importante desse princípio é que quanto maior o campo magnético e o comprimento do condutor, maior será a força motriz no alto-falante. Por esta razão, na prática são usados fortes ímãs de neodímio, e o condutor é enrolado em uma bobina (aumentando o comprimento do condutor). Essa bobina é então inserida no entreferro (gap) do ímã, onde se encontra o campo magnético B , e a membrana, normalmente em formato de cone, é presa nela.

Além disso, existem também mais duas partes móveis muito importantes em um alto-falante: a aranha e a suspensão. Elas são responsáveis por manter a correta posição da bobina, assim como funcionar como o sistema de suspensão da mesma, permitindo um avanço e recuo da bobina, e ao mesmo tempo voltando o mais rápido para a posição de repouso quando não se aplicam sinais elétricos (KOELTZSCH, 2009, p. 231). A Figura 6 demonstra as principais partes de um alto-falante que utiliza o princípio eletrodinâmico.

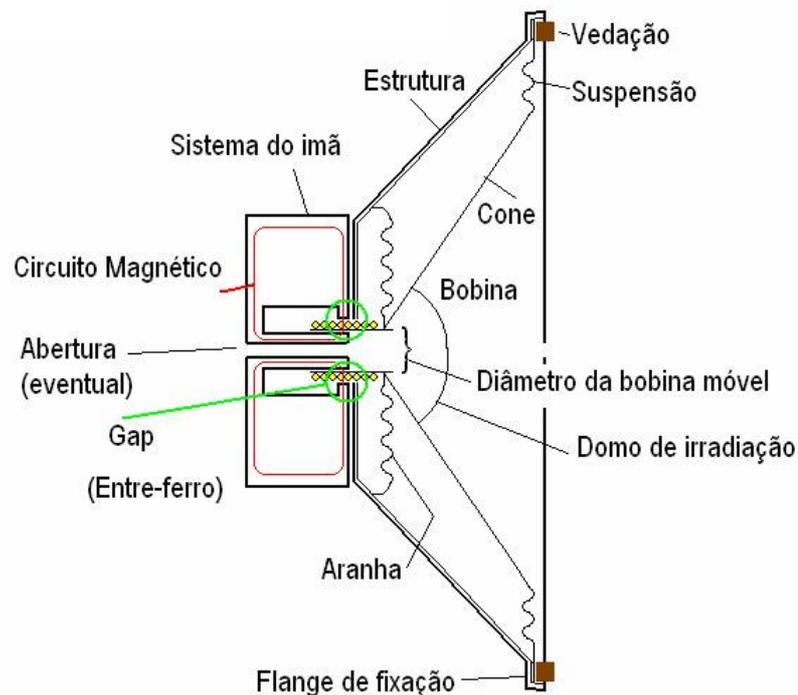


Figura 6 – Partes de um Alto-Falante
Fonte: NOVACON (2016)

Os transdutores com o princípio de excitação de uma membrana, como é o caso do transdutor eletrodinâmico, são sistemas complexos, pois atuam, simultaneamente, três sistemas físicos: elétrico, mecânico e acústico. Com a força gerada pelo princípio de Lorentz (sistema elétrico), a membrana do transdutor é movimentada (sistema mecânico), produzindo uma pressão acústica (sistema acústico).

Para compreender melhor essa complexidade, são utilizadas analogias físicas e modelos matemáticos adequados. Um exemplo é a representação de um transdutor eletrodinâmico utilizando-se de quadripolos. Nessa abordagem, o transdutor é caracterizado como um conversor, dividido em duas etapas: a primeira, eletro-mecânica, e a segunda mecano-acústica. A energia elétrica fornecida pelo amplificador (representado por um gerador de força eletromotriz E_g e uma resistência interna R_g) nos terminais da bobina do transdutor é convertida em uma força, que movimenta a membrana, pelo conversor eletro-mecânico. Essa energia mecânica da movimentação é então convertida para energia acústica, a uma impedância Z_A , na saída, através do conversor mecano-acústico (SILVA, 1996, p. 15). Essa ideia pode ser visualizada na Figura 7, que representa o transdutor pelos dois quadripolos associados.

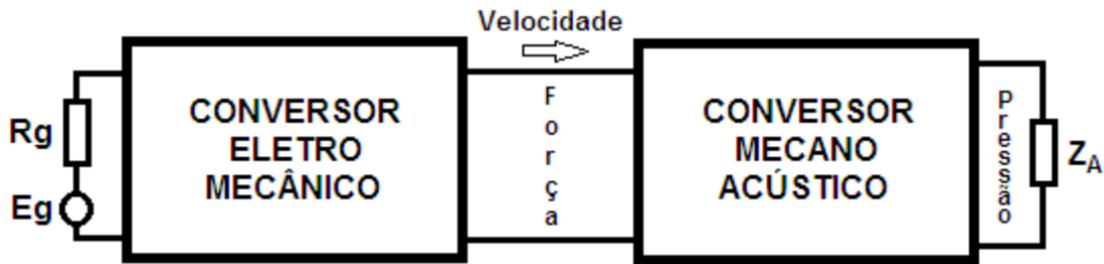


Figura 7 – princípio do transdutor eletrodinâmico
Fonte: Autoria própria

A impedância Z_A , que também pode ser vista na Figura 7, representa a impedância de irradiação do meio no qual as ondas sonoras do transdutor se propagam. Caso o transdutor seja instalado em uma caixa acústica, a impedância Z_A também pode englobar todo o circuito equivalente da caixa.

Assim como a impedância de irradiação do meio em que as ondas sonoras se propagam é representado eletricamente pela impedância Z_A , outras grandezas acústicas e mecânicas também são representadas por quantidades elétricas, gerando duas equações que descrevem o comportamento básico de um transdutor eletrodinâmico:

$$Eg = (R + sLe)I + (BL)V \quad (1)$$

$$F = (BL)I = (Z_M + Sd^2Z_A)V \quad (2)$$

Na Equação (1), o comportamento elétrico do transdutor é descrito, relacionando a tensão de entrada Eg à corrente resultante I . Pode-se observar que a corrente aparece multiplicando a impedância elétrica da bobina (sendo R a parte real, que inclui a resistência R_e da bobina e a resistência R_g do gerador, e sLe a reatância indutiva, onde s é a frequência angular complexa $s+j\omega$). Além disso, a força contra eletromotriz gerada pelo movimento da bobina também aparece como BLV , sendo B o campo magnético, L o comprimento da bobina e V a velocidade de deslocamento da membrana.

Enquanto isso, a Equação (2) descreve o comportamento mecânico do transdutor, relacionando a força da bobina, resultante da parte elétrica, a uma velocidade de deslocamento da membrana. A impedância mecânica Z_M , somada à impedância acústica Z_A , que multiplica o quadrado da área efetiva da membrana do transdutor, é multiplicada pela velocidade de deslocamento. Outro fator a ser

observado é que quanto maior a corrente circulando na bobina, maior será a força disponível (SILVA, 1996, p. 16-17).

2.2.1.1 *Ribbon speaker*

Existe também outro transdutor baseado no princípio eletrodinâmico, conhecido como *Ribbon Speaker*. A característica mais importante desse transdutor é que ele possui uma fita de alumínio de poucos miligramas, que tem a função da bobina e da membrana. Quando a fita, conduzindo uma corrente, é inserida num campo magnético, como mostra a Figura 8, ela se movimenta para frente e para trás com a força gerada pelo princípio eletrodinâmico (HAUSDORF, 2013, p. 33).

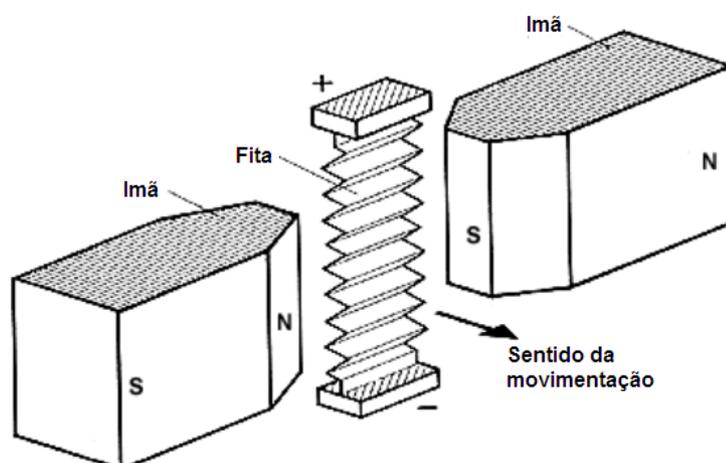


Figura 8 – Princípio de funcionamento do *Ribbon Speaker*
Fonte: HAUSDORF (2013, p. 33).

A própria fita também é a membrana do transdutor, gerando ondas sonoras. As dobras na fita impedem que esta se rompa em movimentos maiores, e como o deslocamento máximo é muito pequeno, apenas frequências agudas são geradas, tornando este princípio muito bom para a construção de *tweeters*, como se pode visualizar na Figura 9.

2.2.1.2 Transdutor magnetostático

Além do *Ribbon Speaker*, o transdutor magnetostático também utiliza o princípio eletrodinâmico para gerar ondas sonoras. Ele consiste de uma membrana muito fina de plástico, resistente a altas temperaturas, em que são aplicadas trilhas

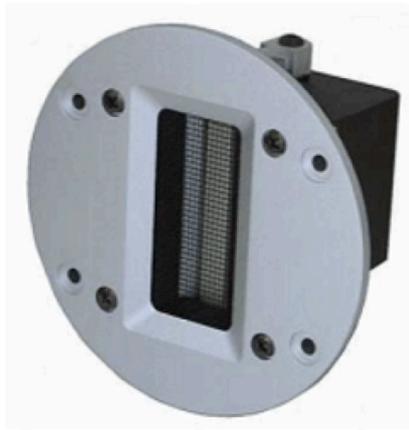


Figura 9 – Tweeter com o princípio do Ribbon Speaker
Fonte: ITWISSEN (2005).

de alumínio, e de ímãs em formato de tiras, fixos em uma placa perfurada. Os ímãs são colocados muito próximos da membrana, de forma que as linhas do campo magnético e a membrana estejam paralelos, como mostra a Figura 10. Ao aplicar uma corrente nas trilhas de alumínio, é gerada uma força sobre a membrana, pelo princípio de Lorentz, que faz com que esta entre em um movimento (HAUSDORF, 2013, p. 34).

Porém como o espaço entre a membrana e os ímãs é muito pequeno, o seu deslocamento máximo é muito pequeno, tornando a aplicação desse tipo de transdutor restrito à *tweeters*, salvo alguns casos especiais em que é feita uma construção com espaços maiores.

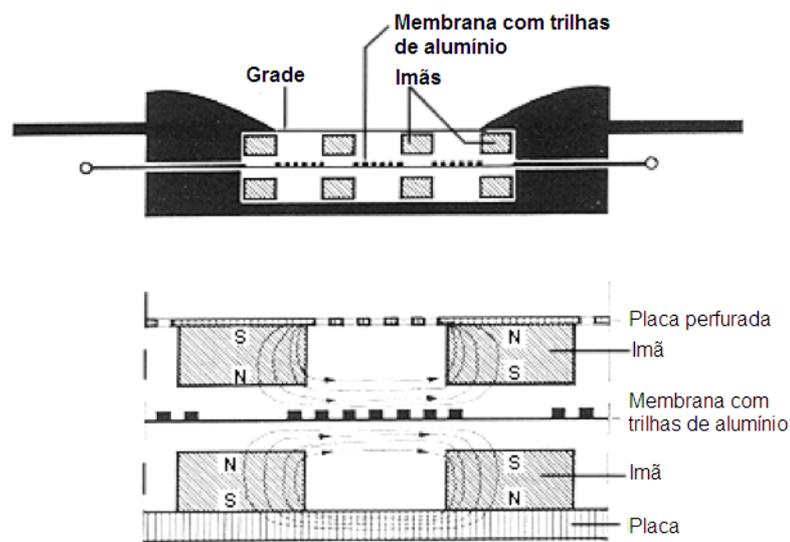


Figura 10 – Princípio do transdutor magnetostático, visto por um corte lateral
Fonte: HAUSDORF (2013, p. 34).

2.2.2 Transdutor Eletrostático

Além do transdutor eletrodinâmico, existem também outros tipos de transdutores que tem a excitação de uma membrana como princípio. O transdutor eletrostático, por exemplo, também possui uma membrana (normalmente uma folha de plástico revestida de materiais condutores). Essa membrana é carregada com uma tensão positiva constante, criando um campo eletrostático ao seu redor. Ao mesmo tempo, duas grades eletricamente condutoras são posicionadas uma de cada lado da membrana e então ligadas à saída de um amplificador de som. Esse gera uma tensão alternada nas grades, fazendo com que elas tenham o mesmo sinal, porém com polaridades opostas.

Como cargas opostas se atraem, e cargas iguais se repelem, a carga positiva do diafragma irá força-lo a se mover para frente ou para trás, dependendo das cargas das grades. Por exemplo, quando a grade frontal se encontra carregada negativamente, e a traseira positivamente, o diafragma será puxado pela grade da frente e empurrado da parte de trás, fazendo com que este se mova para a frente, conforme pode-se visualizar na Figura 11. O contrário (movimento para trás) acontece quando as grades tiverem as cargas opostas.

Quanto mais forte forem as cargas sobre as grades, maior será o deslocamento do diafragma. Por esta razão, a tensão que carrega a membrana e a tensão alternada aplicada nas grades é na ordem de kV, normalmente variando entre 1000 e 5000 Volts. Dessa forma, é possível então utilizar um transdutor eletrostático para traduzir um sinal de áudio elétrico no movimento do diafragma para a produção de ondas sonoras (MARTIN LOGAN, 2005).

A vantagem do uso desse tipo de alto-falante na prática é que a membrana é carregada igualmente em toda sua extensão, eliminando qualquer tipo de oscilação natural da membrana. Além disso, como a massa da membrana é muito pequena, chegando até a ser desprezível, a reprodução de som se torna completamente limpa e sem distorções. As desvantagens desse tipo de alto-falante seriam a alta-tensão presente no equipamento, assim como baixa eficiência na reprodução de frequências graves, devido ao deslocamento muito pequeno do diafragma. Sendo assim, a sua principal aplicação é a construção de *tweeters*.

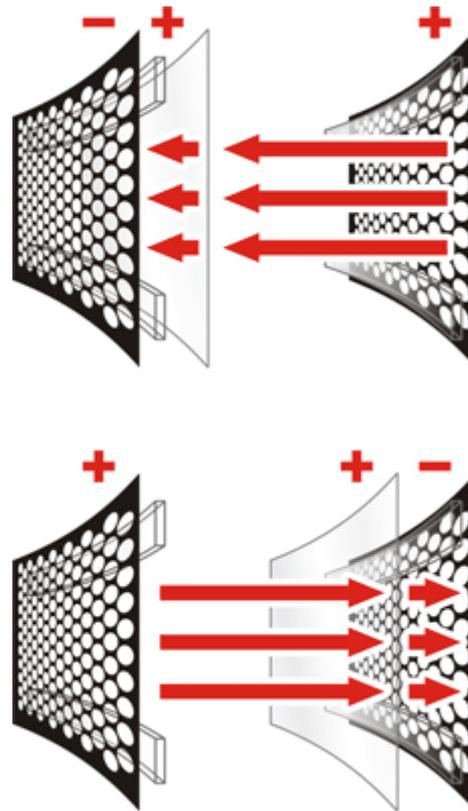


Figura 11 – Princípio do transdutor eletrostático
Fonte: MARTIN LOGAN (2005).

2.2.3 Transdutor Piezoelétrico

Como o próprio nome já diz, o transdutor piezoelétrico utiliza-se do efeito piezoelétrico para a movimentação de uma membrana. Ao aplicar uma deformação sobre um cristal piezoelétrico, este produz uma diferença de potencial elétrico entre suas superfícies. O inverso também é válido, ou seja, ao aplicar uma tensão nas suas superfícies, o cristal se deforma (HAUSDORF, 2013, p. 37).

Esse efeito é usado no transdutor piezoelétrico, em que quando se aplica uma tensão alternada nas superfícies do cristal, o cristal apresenta uma vibração, que é então transmitida para a membrana do transdutor. Assim como nos outros transdutores, a membrana é então responsável por irradiar as ondas sonoras, devido à vibração gerada pelo cristal. Esse princípio pode ser visualizado na Figura 12.

Porém, a potência desse tipo de transdutores é muito pequena devido à mínima movimentação da membrana, fazendo com que esse tipo de transdutor seja usado apenas para a fabricação de *tweeters*. Outra aplicação comum desse tipo de transdutor é a geração ultrassom, ou seja, a geração de frequências acima da faixa audível do ser humano.

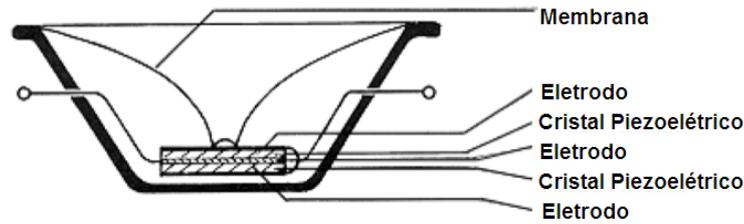


Figura 12 – Princípio do transdutor piezoelétrico
 Fonte: HAUSDORF, 2013, p. 37

2.2.4 Transdutor Servo Drive

Outro transdutor que utiliza a excitação de uma membrana é o *servo drive*. Este transdutor é construído para gerar apenas baixas frequências. Para isso, utiliza-se de um servomotor DC com uma rotação rápida e um sistema de transmissão robusto por correia, convertendo o sinal amplificado em som.

Os sinais do amplificador fazem com que o eixo de saída do servomotor rode tanto para a frente quanto para trás, sendo a direção da rotação definida pela polaridade do sinal. Além disso, a força é proporcional à corrente do sinal e a velocidade é proporcional à tensão do sinal.

As rotações do eixo produzidos pelo amplificador de sinal são, em seguida, convertidos em movimento linear. Isso é feito por uma fibra de aramida e um sistema de transmissão por correia, que transfere a força e o movimento para a membrana do transdutor (SERVODRIVE, INC, 1998). A Figura 13 mostra o princípio do transdutor *Servo Drive*.

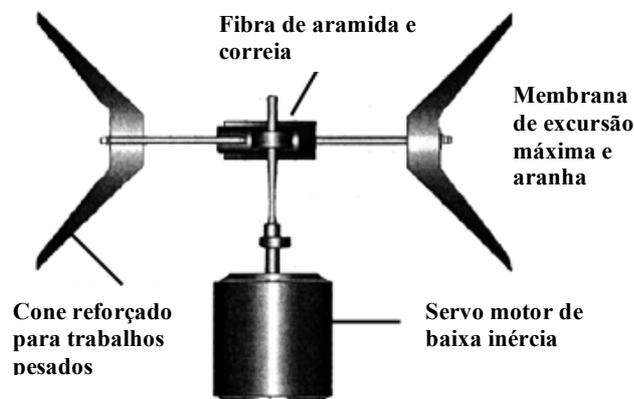


Figura 13 – Princípio do transdutor Servo Drive
 Fonte: SERVODRIVE, INC (1998).

3 INFRASSOM E SENSAÇÃO DE VIBRAÇÃO

Para saber se os princípios de transdutores apresentados podem ou não ser usados na geração de infrassom, deve-se primeiramente conhecer o nível de pressão sonora de infrassom que precisa ser gerado, a fim de que o corpo humano sinta a vibração. Para isso foram feitos ensaios perceptuais para determinar qual nível de pressão sonora em frequências muito baixas é necessário para produzir uma sensação de vibração em uma pessoa.

3.1 MÉTODOS DE MEDIÇÃO E CONFIGURAÇÃO DOS ENSAIOS

A sensação de vibração em uma pessoa é uma questão bastante subjetiva, tornando-se algo difícil de medir. Porém, um estudo já determinou a mínima aceleração do corpo necessária para causar uma sensação de vibração (MORIOKA; GRIFFIN, 2008). Este estudo examinou o efeito do local de aplicação (mão, assento e pé) e o efeito da frequência de vibração (8-315 Hz na mão e pé; 2-315 Hz no assento) na percepção de vibração em três eixos (frente e trás, lateral e vertical).

Assim, a aceleração necessária para produzir uma sensação de vibração no corpo humano já é conhecida. O que ainda precisa ser determinado é o nível de pressão sonora necessário para gerar essa aceleração. Assim, foram realizados ensaios perceptuais para determinar a relação da aceleração do corpo com o nível de pressão sonora gerada por um sinal de teste.

Um indivíduo masculino de 21 anos participou dos ensaios, que foram realizados em dois ambientes distintos: uma pequena sala do instituto de acústica da Universidade Tecnológica de Dresden e posteriormente na grande câmara anecoica desse instituto (volume livre de 1000 m³ e um volume total de 2000 m³). A razão dos ensaios serem realizados nesses dois ambientes será explicado nas próximas sessões.

Como método de medição existem diversas opções e as suas principais diferenças estão no sinal de teste. Entre os sinais mais utilizados estão o ruído rosa, o ruído branco e a varredura senoidal.

O ruído branco é um tipo de ruído aleatório, em que a densidade espectral de potência é a mesma em toda faixa de audição do ser humano (KUO, 1996, p. 1). Por

essa razão, o ruído branco possui muitas aplicações, entre elas na síntese de áudio e também no mascaramento da fala (HAWKINS JR.; STEVENS, 1950). Na Figura 14 pode-se observar a densidade espectral de potência do ruído branco.

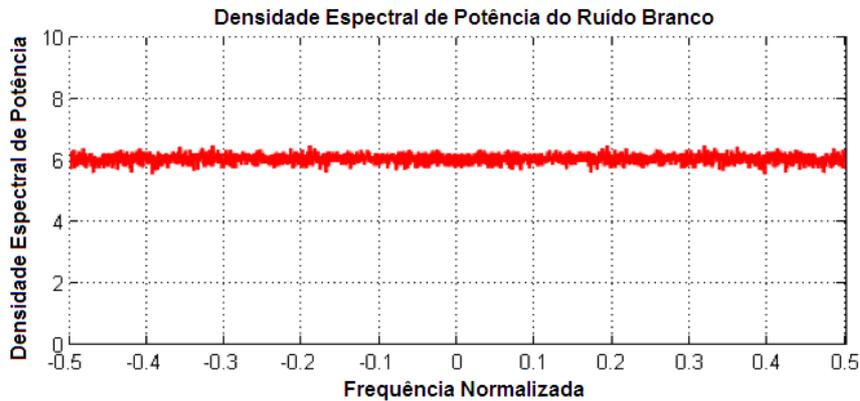


Figura 14 – Densidade espectral de potência do ruído branco
Fonte: MATHURANATHAN (2013).

O ruído rosa é muito utilizado em medições com alto-falantes, pelo fato de ser correspondente à sensação auditiva. Isso se deve ao fato da densidade espectral de potência ser inversamente proporcional à frequência do sinal ao longo de todo espectro frequência (HAUSDORF, 2013, p. 42). Assim, a audição humana percebe todas as componentes espectrais na mesma intensidade. Em comparação ao ruído branco, o ruído rosa possui uma potência muito menor nas frequências agudas, conforme pode ser observado na Figura 15.

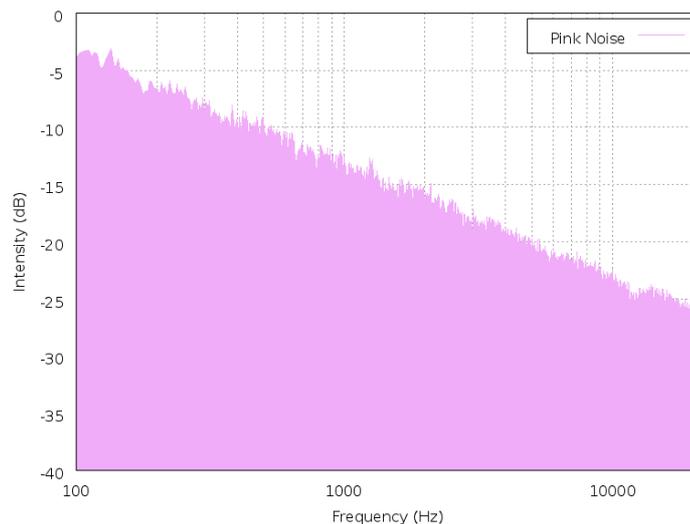


Figura 15 – Densidade espectral de potência do ruído rosa
Fonte: WALO (2014).

Já a varredura senoidal é um método de medição que consiste em variar a frequência instantânea de uma senóide ao longo do tempo. Essa variação é geralmente feita em toda faixa das frequências audíveis, ou seja, de 20 a 20 kHz

(DALMONTE, 2013). A varredura pode ser feita de diversas formas, entre elas a linear, logarítmica e a exponencial, que diferem pela taxa de variação da frequência ao longo do tempo.

Para este trabalho foi escolhido o ruído branco como método de medição, visto que nele existem todas as componentes espectrais simultaneamente, o que já não acontece na varredura senoidal, em que a frequência varia com o tempo. O ruído rosa também não se aplica, pois não há interesse no que está se ouvindo (principal vantagem do ruído rosa), e sim no que está se sentindo (aceleração do corpo).

Para a geração do ruído branco utilizou-se o *software* Pure Data, que se utiliza de uma linguagem de programação visual de código aberto, criada especificamente para áudio e vídeo. Uma das funções já existentes no programa é o gerador de ruído branco, utilizado para gerar o sinal de teste desejado.

O ruído branco foi então transmitido para um alto-falante eletrodinâmico ativo, modelo *Outline Global Subwoofer Source*, que fornece um máximo nível de pressão sonora de 132 dB/1m e consegue gerar frequências de até 35 Hz. Após alguns testes prévios, verificou-se que com essas características, o alto-falante possui níveis suficientes para gerar uma sensação de vibração no corpo humano, a distâncias curtas. Assim, para gerar o ruído a um determinado nível de pressão sonora utilizou-se este alto falante.

Já para as medições foi necessário a escolha de microfones capazes de medir o nível de pressão sonora gerado pelo alto-falante, assim como outro sensor capaz de medir a aceleração do corpo humano.

Existem muitos tipos de microfones existentes no mercado, que diferem principalmente pelo seu princípio de funcionamento, como, por exemplo, o microfone dinâmico, o condensador, o de eletreto, o piezoelétrico, entre outros. Basicamente, um microfone é um transdutor que converte o som em movimento mecânico de um diafragma e em seguida em um sinal elétrico.

O tipo de microfone mais difundido atualmente é o dinâmico. Seu princípio de funcionamento é semelhante ao do transdutor eletrodinâmico, porém nesse caso um condutor imerso em um campo magnético é movido a uma determinada velocidade, gerando um campo elétrico, pelo princípio da indução eletromagnética (MÖSER, 2009, p. 23). Esse tipo de microfone tem uma alta robustez, e por consequência uma alta durabilidade. Além disso, não precisa de nenhum tipo de alimentação externa, tornando o seu uso muito comum.

Já o microfone condensador, também chamado de microfone capacitivo, é baseado no princípio de um capacitor, em que a membrana ou diafragma do microfone atua como uma das placas do capacitor, e pela sua vibração, a distância entre as duas placas do capacitor varia. Assim, a capacitância varia, e, por consequência, a tensão (MÖSER, 2009, p. 27). Além disso, para manter uma carga constante, esse tipo de microfone necessita de uma fonte de alimentação. Geralmente, produz um sinal de áudio de alta qualidade, tornando sua aplicação muito comum em estúdios de gravação e laboratórios. Isso se deve ao fato de que uma massa muito pequena precisa ser movida se comparado a outros tipos de microfones.

O microfone de eletreto é um tipo de microfone condensador, mas que não precisa de uma alimentação externa, já que utiliza um material permanentemente carregado (pelas propriedades do material pode durar centenas de anos) (MÖSER, 2009, p. 28). Esse tipo de microfone é bastante utilizado em aparelhos auditivos, tendo uma boa qualidade, e sem a necessidade de alimentação.

O microfone escolhido para ser usado nos ensaios perceptuais foi do tipo condensador. Isso se deve ao fato dele ser o mais indicado para medições acústicas, devido às suas importantes características: baixa distorção, alta sensibilidade, baixo ruído, resposta na frequência constante e alta estabilidade nas mais diversas condições.

O microfone capacitivo utilizado foi o modelo 4188-A-021 da Brüel&Kjaer. Suas especificações são uma sensibilidade de 31,6 mV/Pa, frequência de 20 Hz a 12,5 kHz e uma faixa dinâmica de 15,8 a 146 dB. Nas medições dentro da sala foram utilizados dois microfones deste mesmo modelo, a fim de comparar os seus resultados. Na câmara anecoica somente um microfone foi necessário.

Para medir a aceleração de um corpo, existem também diversos sensores que podem ser utilizados. Geralmente, eles têm a tarefa de converter vibrações mecânicas em sinais elétricos. Várias características devem ser levadas em consideração na escolha de um sensor adequado, como pouco ruído próprio, uma resposta linear ao longo de toda faixa dinâmica, alta sensibilidade em pequenas medições, poucas influências do ambiente exterior, entre outros (MÖSER, 2009, p. 432).

Como uma das principais opções existe o acelerômetro, que mede diretamente a aceleração de um corpo. Ele pode ser construído pelos mais diferentes princípios: eletrodinâmico, piezoelétrico, capacitivo, piezoresistivo, entre outros. Entre esses o que mais se destaca é o acelerômetro piezoelétrico, por não precisar de

alimentação externa, ter uma ampla faixa de frequência, uma alta dinâmica (160 dB), além de não tem partes móveis em sua construção (MÖSER, 2009, p. 438).

Sua construção consiste basicamente de uma massa sísmica, que quando é acelerada por um corpo externo, exerce uma força sobre o elemento piezoelétrico, proporcional à aceleração pela lei de Newton ($F = m \cdot a$). A mudança de carga no elemento piezoelétrico devido à força aplicada sobre ele é então processada eletronicamente para gerar um sinal elétrico correspondente. A Figura 16 mostra a montagem de um acelerômetro piezoelétrico.

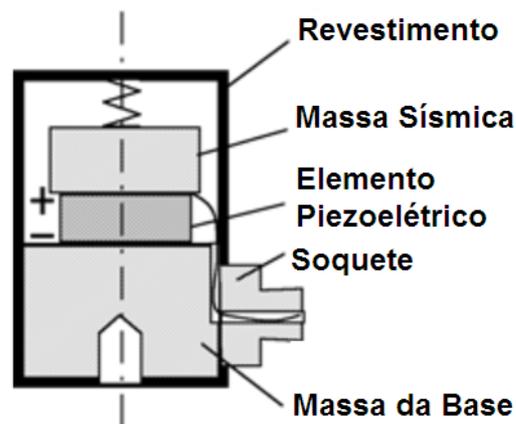


Figura 16 – Montagem de um acelerômetro piezoelétrico
Fonte: MÖSER (2009, p. 438).

Além do acelerômetro, outra técnica que também pode ser usada para medir aceleração é medir a velocidade do corpo por um determinado tempo e em seguida derivar o resultado a fim de se obter a aceleração. Isso é possível através definição da aceleração (MÖSER, 2009, p. 427):

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

Para isso, devem ser usados sensores de velocidade, que também podem ser construídos pelos mais variados princípios: eletrodinâmico, eletromagnético, assim como o vibrômetro Laser-Doppler. A grande diferença entre esses princípios é que os dois primeiros precisam ter um contato com o corpo a ser medido, enquanto o último (vibrômetro) se utiliza da tecnologia de laser.

Sendo assim, a medição sem contato proporcionada pelo vibrômetro Laser-Doppler é uma grande vantagem, tornando seu uso muito comum. Nesse tipo de sensor, um feixe coerente de laser é emitido, e então dividido opticamente em um feixe de medição e um feixe de referência. O feixe de medição é direcionado para o objeto de medição, que por sua vez reflete o feixe. Através de uma comparação dos dois

feixes (por interferência) e de um processamento de sinais baseado no efeito Doppler, é possível extrair a velocidade do objeto de medição. A Figura 17 demonstra esse princípio.

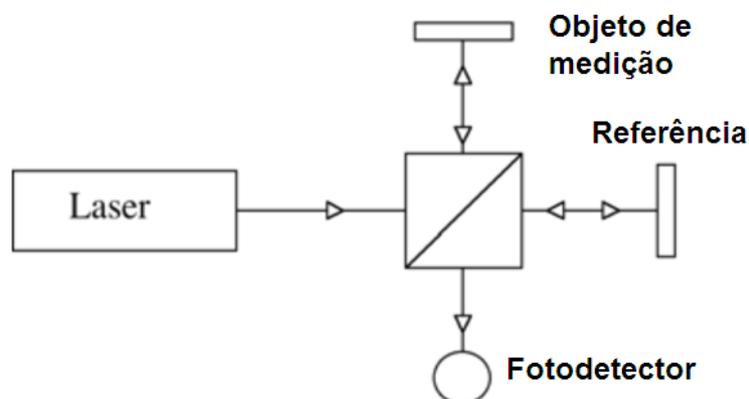


Figura 17 – Princípio do Vibrômetro Laser-Doppler
Fonte: MÖSER (2009, p. 437).

Um exemplo do uso do vibrômetro laser-doppler é na medição do tímpano, presente no ouvido do ser humano. Como o tímpano é uma membrana muito pequena, nenhum tipo de sensor de aceleração que exige contato com o objeto de medição pode ser usado. Assim, o método livre de toque do vibrômetro laser-doppler é a solução perfeita para esse problema, sendo tema de diversos estudos, como o realizado pelo Foth H. et al (1996).

Para medir a aceleração do corpo humano nos ensaios perceptuais escolheu-se o vibrômetro laser-doppler, pelo fato de ser um método de medição ótico, sem contato do sensor com o corpo. Portanto, com o feixe de laser sendo apontado no ponto de medição tem-se a certeza de que não existe nenhum tipo de interferência do sensor na vibração do corpo, e por consequência nenhuma interferência na medição. O vibrômetro laser-doppler usado foi o modelo Polytec OFV 300 com a cabeça do sensor modelo OFV 302.

Além do ruído branco e dos sensores de medição, outros equipamentos foram utilizados para a realização dos ensaios. Para a aquisição dos dados vindos dos microfones e do sensor, foi utilizado o Octobox da Head Acoustics, de 8 canais e com conexão USB. No computador foi utilizado o Head Acoustics Recorder Software, para a gravação dos dados adquiridos pela Octobox. Além disso, para o tratamento e posterior análise dos dados medidos, utilizou-se o *software* Artemis da Head Acoustics.

No *software* Artemis, diversos recursos foram utilizados para o tratamento dos dados medidos. Para os dados medidos pelo vibrômetro laser-doppler (velocidade do corpo), foi aplicado um diferenciador, resultando na aceleração do corpo, conforme a Equação (3), apresentada anteriormente. Para determinar a aceleração do corpo em função da frequência, utilizou-se a análise de Fourier, que calcula a transformada de Fourier da resposta da aceleração no tempo. Essa análise de Fourier foi realizada utilizando-se as seguintes configurações disponíveis no *software*: tamanho da janela de dados de 65536, uma função de enjanelamento Hanning com 50% de sobreposição e uma escala de amplitude RMS. Além disso, foi aplicada uma suavização nas curvas através de uma função disponível no *software*, a fim de facilitar a visualização e a interpretação dos resultados. Essas configurações se mostraram adequadas pela realização de alguns testes prévios, obtendo-se bons resultados.

Da mesma maneira que se obteve a aceleração do corpo em função da frequência pela análise de Fourier, também se obteve a pressão sonora em função da frequência, pela análise de Fourier. Então, com os dados resultantes dessa análise, foram determinados o nível de aceleração do corpo e o nível de pressão sonora, ambos em dB, através das fórmulas:

$$\text{Nível de aceleração} = 20 \log_{10} \left(\frac{a}{a_0} \right) \text{ dB} \quad (4)$$

$$\text{Nível de Pressão Sonora} = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) \text{ dB} \quad (5)$$

onde $a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$ e $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ são os valores de referência utilizados nos cálculos.

Outro recurso do *software* Artemis, utilizado nas análises dos dados, foi a geração de um espectrograma. Esse recurso foi usado para determinar os níveis de aceleração em função da frequência e do tempo, a fim de observar o comportamento de alguns efeitos durante as medições. As configurações utilizadas para a construção desse diagrama foram: tamanho da janela de dados de 65536, uma função de enjanelamento Hanning com 50% de sobreposição, uma escala de amplitude RMS e sem suavização. Por último, utilizou-se também o Artemis para a análise da função de transferência entre o nível de aceleração do corpo e o nível de pressão sonora.

Nas Figuras 18, 19, 20 e 21 pode-se observar de maneira mais detalhada a configuração dos ensaios perceptuais, com as devidas posições de cada equipamento.

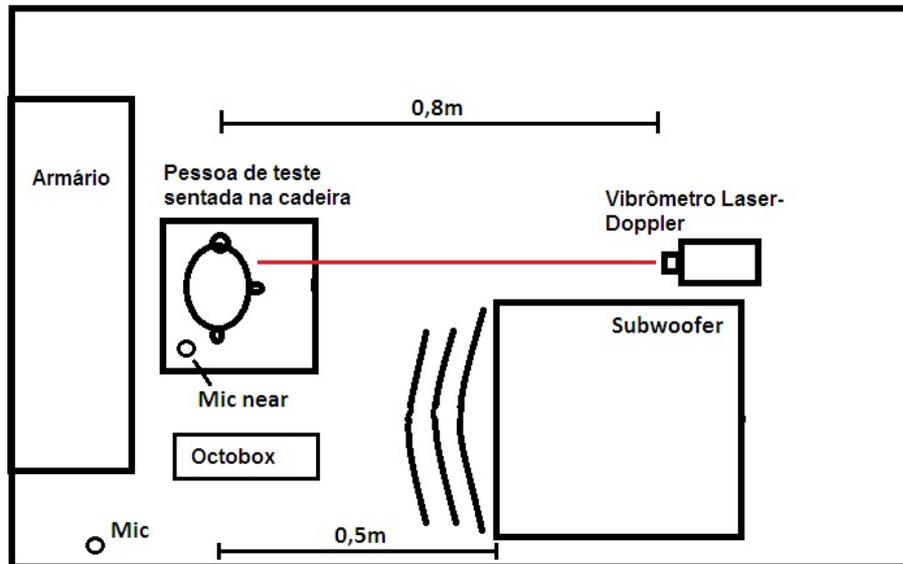


Figura 18 – Rascunho da sala para a realização dos ensaios
Fonte: Autoria própria



Figura 19 – Configuração da sala para a realização dos ensaios
Fonte: Autoria própria

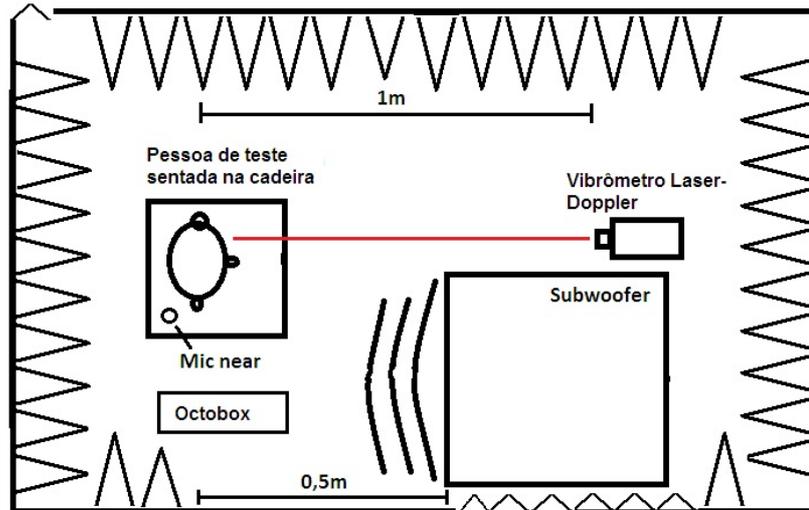


Figura 20 – Rascunho da câmara anecoica para a realização dos ensaios
Fonte: Autoria própria



Figura 21 – Configuração da câmara anecoica para a realização dos ensaios
Fonte: Autoria própria

3.2 AVALIAÇÕES PRELIMINARES

3.2.1 Medição de Vibrações Inerentes

Antes da medição nos níveis de aceleração do corpo, algumas avaliações preliminares foram necessárias para verificar a correta configuração dos ensaios e

dos equipamentos. A primeira verificação foi a medição da aceleração em duas posições do corpo (peito e pescoço), com o alto-falante desligado, ou seja, sem o ruído branco. Isso foi feito para verificar a vibração inerente do corpo, que já está presente mesmo sem o som sendo gerado, devido à respiração e ao batimento cardíaco. Foi então analisada a curva de aceleração resultante, medida pelo vibrômetro laser-doppler. A curva foi obtida pela análise de Fourier, obtendo-se o nível de aceleração em função da frequência. As curvas resultantes podem ser visualizadas nas Figuras 22 e 23. Para todas curvas resultantes dos equipamentos utilizados nos ensaios, o eixo das abscissas indica a frequência e o eixo das ordenadas a amplitude em dB.

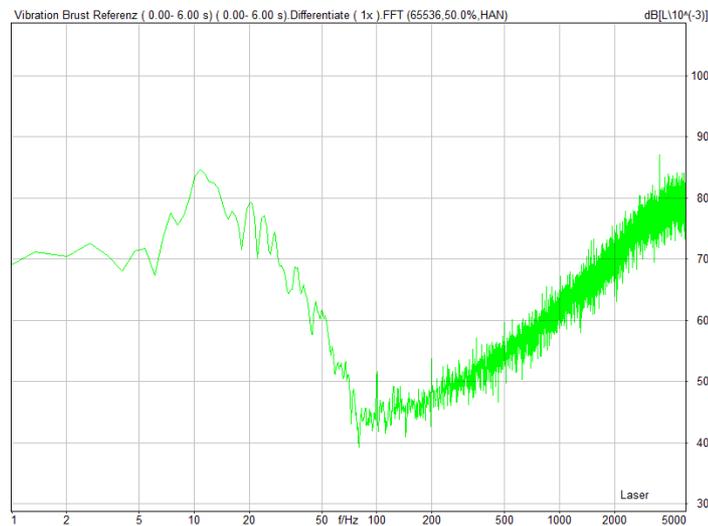


Figura 22 – Vibração inerente no peito
Fonte: Autoria Própria

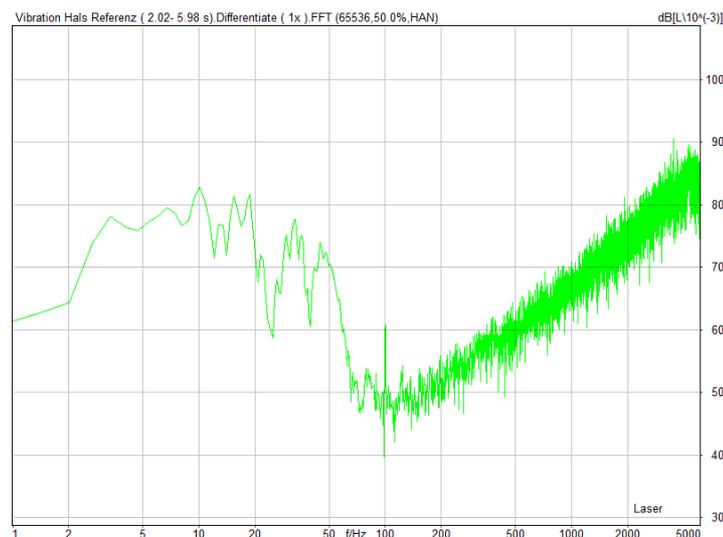


Figura 23 – Vibração inerente no pescoço
Fonte: Autoria Própria

Analisando-se essas respostas, pode-se observar que as vibrações inerentes são muito elevadas (70 a 80 dB de nível de aceleração) até em torno de 40-50 Hz, onde a curva começa a cair. Com base nisso, foi decidido que todas as outras medições só seriam consideradas a partir dos 50 Hz, impedido assim a interferência das vibrações inerentes nos resultados. A razão disso acontecer está no alto-falante, que possui uma limitação na geração do sinal de teste.

Com base em alguns testes feitos anteriormente, verificou-se que para não haver interferência das vibrações inerentes nos resultados, a relação sinal-ruído (diferença entre o nível de aceleração medido e o nível de vibração inerente medido anteriormente) deveria ser maior do que 15 dB.

Assim, para obter uma boa relação sinal-ruído, garantindo uma não influencia do ruído no sinal, seria necessária a geração de níveis de pressão sonora acima de 80 a 90 dB para frequências abaixo de 50 Hz. Como o alto falante disponível não atingia esses níveis de pressão sonora desejados, a frequência mínima de estudo foi determinada em 50 Hz. Além disso, como limite superior na escala de frequência decidiu-se utilizar 200 Hz, já que frequências muito acima disso fogem do foco deste trabalho.

Também foi decidido que a verificação das vibrações inerentes seria feita em todas as medições, considerando-a como referência, a fim de sempre garantir um bom SNR. Apenas com essa condição satisfeita a análise dos resultados poderia ser realizada, sabendo que estes seriam influenciados apenas pelo sinal de teste (ruído branco) e não pelas vibrações inerentes.

3.2.2 Medição em Conjunto com um Acelerômetro

A segunda verificação realizada teve o objetivo de verificar se os dados medidos pelo vibrômetro laser-doppler estavam corretos. Para isso, utilizou-se um pequeno acelerômetro piezoelétrico (modelo 8636C10 da Kistler), a fim de realizar a medição da aceleração em conjunto com o vibrômetro. Primeiramente o acelerômetro foi fixado em um armário presente na sala, e o feixe de laser do vibrômetro foi direcionado para a superfície do acelerômetro, a fim de que ambos pudessem detectar a mesma aceleração. Utilizando o ruído branco como sinal de teste, mediram-se as acelerações causadas no armário. Após uma análise Fourier pelo *software* Artemis e

o cálculo do nível de aceleração, a curva de aceleração foi obtida, que pode ser visualizada na Figura 24.

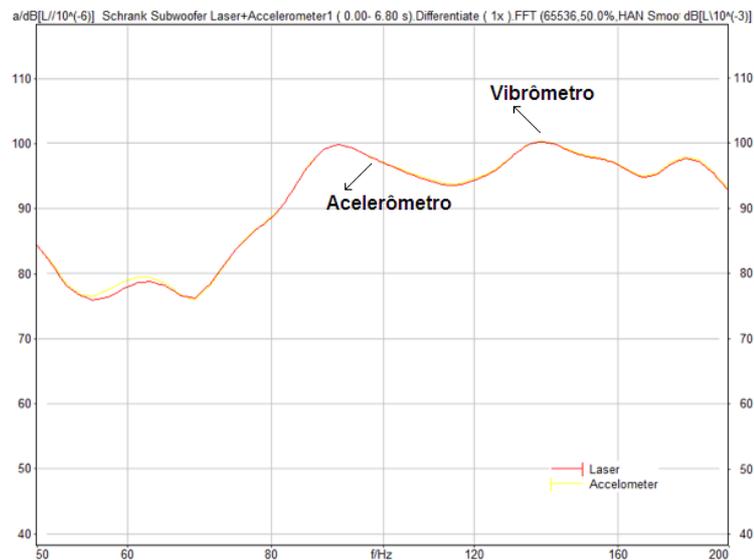


Figura 24 – Níveis de aceleração do armário medidos pelo vibrômetro e pelo acelerômetro com o ruído branco como sinal de teste
Fonte: Autoria Própria

Observa-se que as duas curvas são idênticas, mostrando que os dados medidos pelo vibrômetro laser-doppler estavam corretos. Em seguida, para realmente confirmar a correta medição do vibrômetro, o mesmo ensaio foi feito, porém com o acelerômetro preso no pulso da pessoa de teste, e sem o sinal de teste, a fim de medir as vibrações inerentes do corpo com ambos os sensores. Após o tratamento dos dados pelo Artemis, os níveis de aceleração resultantes podem ser observados na Figura 25.

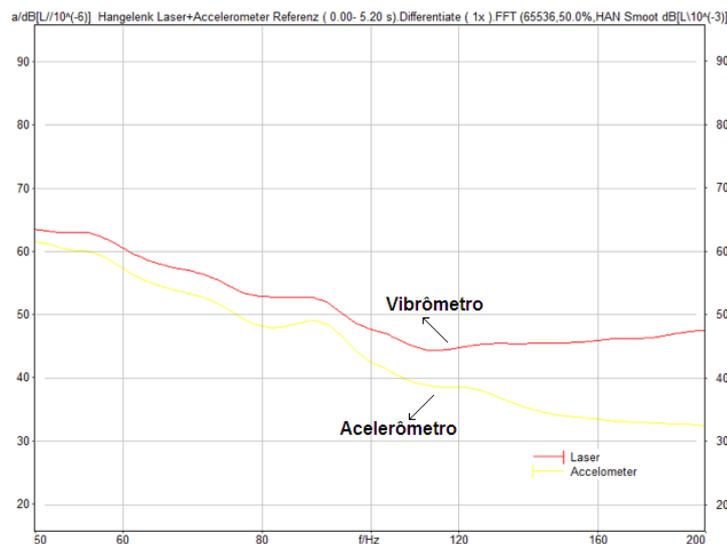


Figura 25 – Níveis de aceleração no pulso medidos pelo vibrômetro e pelo acelerômetro, sem o sinal de teste
Fonte: Autoria Própria

Agora pode-se observar uma pequena diferença nas curvas, principalmente após 100 Hz. Isso acontece devido aos níveis muito baixos de aceleração sendo medidos nesse caso, se comparado aos elevados níveis da medição no armário. Supõe-se que os níveis são tão baixos, que até o pequeno ruído presente no acelerômetro e no vibrômetro influenciam nos resultados. Para comprovar essa afirmação, outro ensaio foi realizado, em que foi medido o ruído presente nos instrumentos de medição, através da medição de uma das paredes da sala. Essa medição foi feita sem a geração de ruído branco, ou seja, sem gerar uma vibração/aceleração na parede. Na Figura 26 podem-se observar os resultados, provando que os maiores níveis do vibrômetro da Figura 25 se devem ao seu maior ruído, se comparado ao acelerômetro.

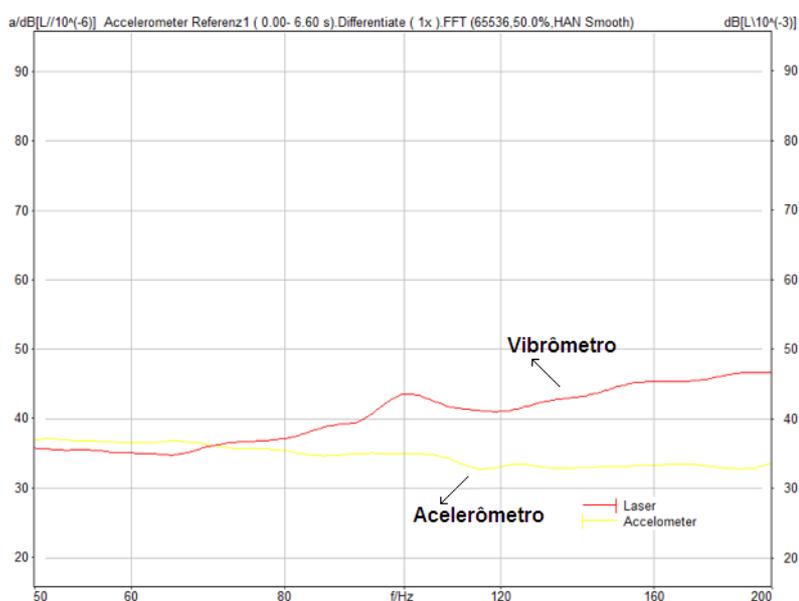


Figura 26 – Níveis de ruído do vibrômetro e do acelerômetro medidos na parede da sala, sem a geração de ruído branco
Fonte: Autoria Própria

3.2.3 Vibração do Vibrômetro Laser-Doppler

Outra verificação também foi feita, a fim de garantir que a aceleração medida pelo vibrômetro laser-doppler era realmente a aceleração do corpo e não a aceleração do próprio vibrômetro. Para isso a aceleração foi medida na parte direita do peito da pessoa de teste com o vibrômetro, e simultaneamente o acelerômetro foi fixado no próprio vibrômetro, para verificar sua aceleração. Primeiramente uma medição foi feita sem o sinal de teste sendo reproduzido, para verificar as vibrações inerentes. Essa medida foi considerada como referência. Após isso, o ruído branco foi reproduzido

pelo alto-falante e as acelerações foram medidas. Os resultados podem ser observados na Figura 27.

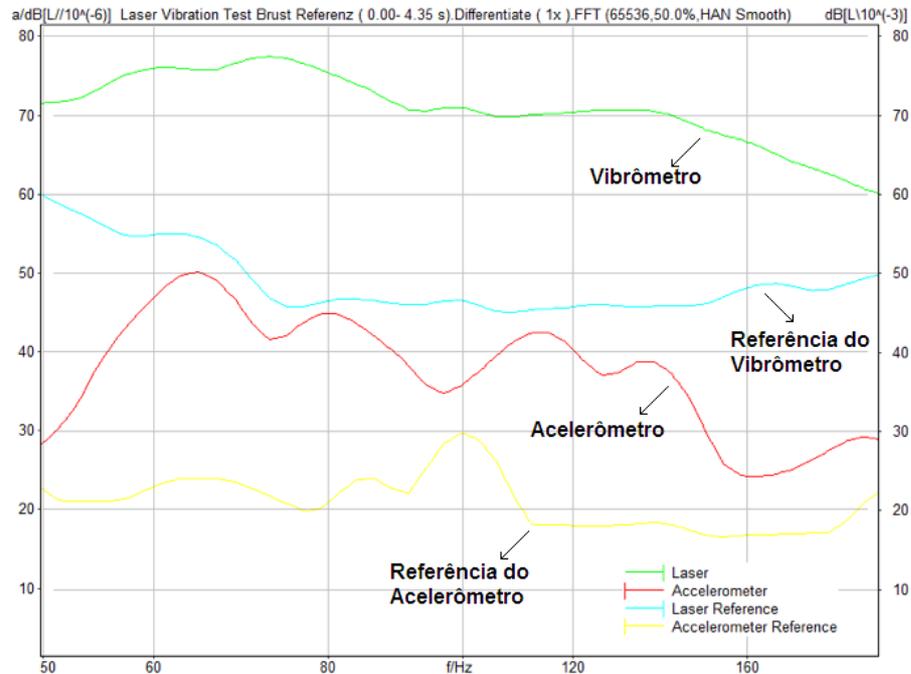


Figura 27 – Níveis de aceleração medidas no peito pelo vibrômetro e níveis de aceleração medidas no vibrômetro pelo acelerômetro, ambos com as medições de referência (sem o sinal de teste)

Fonte: Autoria Própria

A curva vermelha, referente à aceleração medida pelo acelerômetro, em relação à curva amarela (referência), mostra que com a reprodução do sinal de teste, o vibrômetro laser-doppler acelera (vibra) suavemente. Porém, essa aceleração é menor do que as vibrações inerentes do corpo, medidos pelo vibrômetro (curva azul), tendo nenhuma influencia sobre a aceleração medida pelo vibrômetro (curva verde), que é aproximadamente 30 dB mais alta. Assim, ficou claro que a aceleração medida pelo vibrômetro laser-doppler é determinada apenas pelo sinal de teste, e não pelo próprio vibrômetro.

3.3 ENSAIOS PERCEPTUAIS NA SALA SEM TRATAMENTO ACÚSTICO

Após as verificações do sistema de medição e das configurações dos ensaios, foram feitos os ensaios na sala sem tratamento acústico, medindo a aceleração do corpo. Primeiramente, a aceleração foi medida no lado esquerdo do peito, no pulso

esquerdo, na testa e no lado direito do pescoço, a fim de verificar a aceleração em diferentes partes do corpo (visualizado na Figura 28).

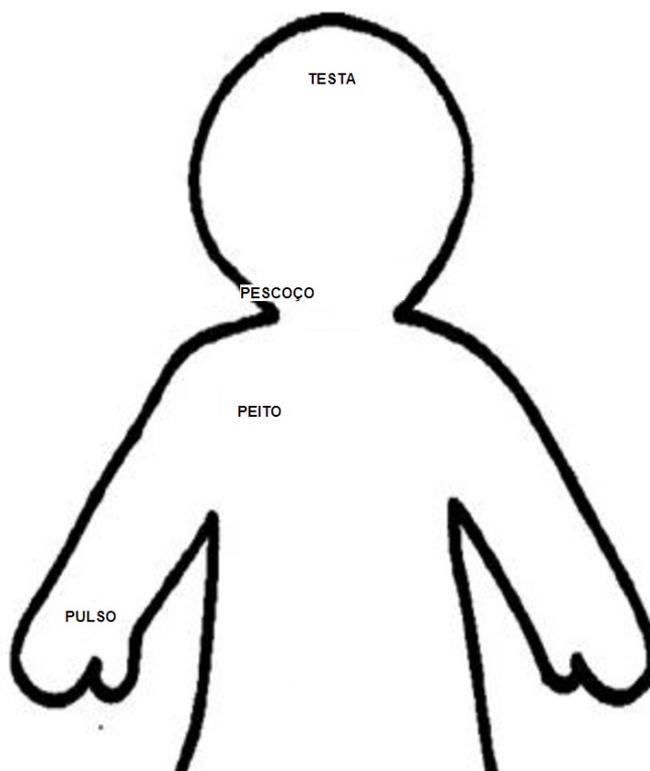


Figura 28 – Partes do corpo em que a aceleração foi medida na sala sem tratamento acústico

Fonte: Autoria Própria

Os níveis de aceleração em função da frequência medidos pelo vibrômetro laser-doppler e os níveis de pressão sonora do sinal de teste medidos pelo microfone podem ser visualizados nas Figuras 29 a 32, após o tratamento no *software* Artemis (análise de Fourier e cálculo dos níveis).

Para essas 4 figuras, não foi aplicada suavização na análise de Fourier, e mesmo assim pode-se observar que em todas medições, para frequências maiores que 120 Hz, os níveis de aceleração são praticamente constantes, e com uma amplitude elevada. Esse resultado é suspeito, considerando o formato das curvas para frequências mais baixas. Por isso, para tentar identificar a razão desse efeito, foram feitas medições de aceleração no armário da sala.

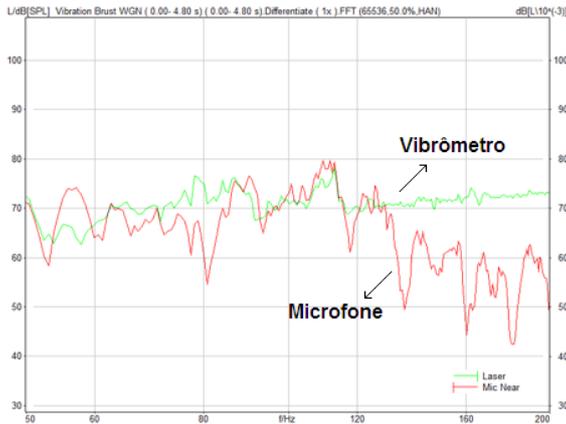


Figura 29 – Nível de aceleração no peito e nível de pressão sonora do sinal de teste
Fonte: Autoria Própria

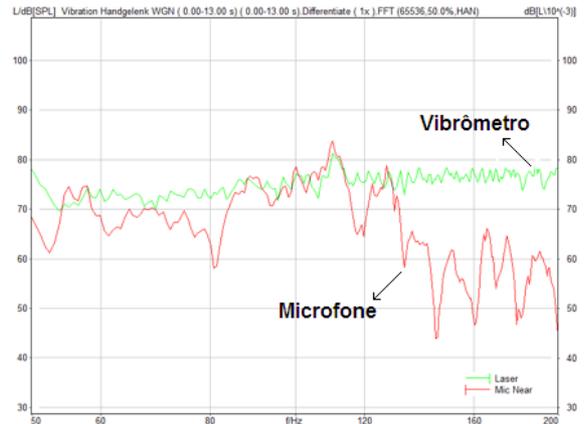


Figura 31 – Nível de aceleração no pulso e nível de pressão sonora do sinal de teste
Fonte: Autoria Própria

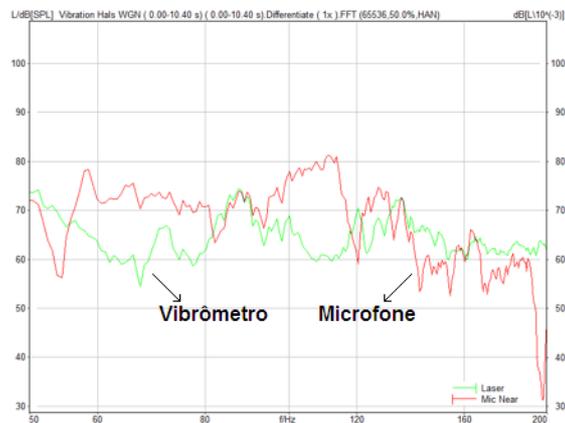


Figura 30 – Nível de aceleração no pescoço e nível de pressão sonora do sinal de teste
Fonte: Autoria Própria

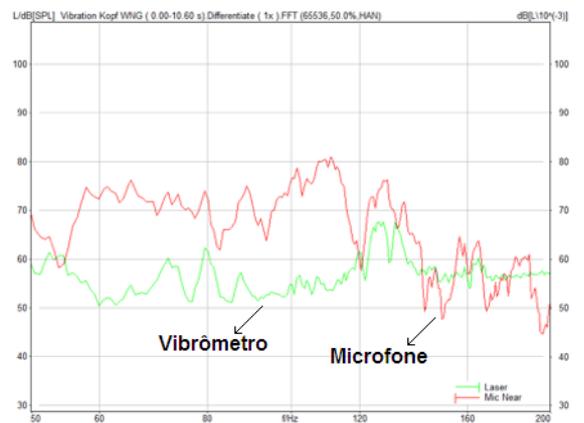


Figura 32 – Nível de aceleração na testa e nível de pressão sonora do sinal de teste
Fonte: Autoria Própria

A primeira medição foi realizada normalmente, com o ruído branco como sinal de teste, e o vibrômetro de laser-doppler medindo a aceleração do armário. A segunda medição foi realizada simulando-se a perda de sinal do laser, colocando rapidamente um papel na frente do feixe de laser apontado para o armário, e tirando-o novamente. Isso foi repetido algumas vezes durante a segunda medição. Após uma análise de Fourier, as curvas resultantes dessas duas medições podem ser visualizadas nas Figuras 33 e 34.

É possível perceber que mesmo com um nível de pressão sonora do sinal de teste praticamente idêntico nas duas medições, a curva no nível de aceleração medida pelo vibrômetro é muito diferente, tendo um comportamento praticamente constante nas frequências mais elevadas.

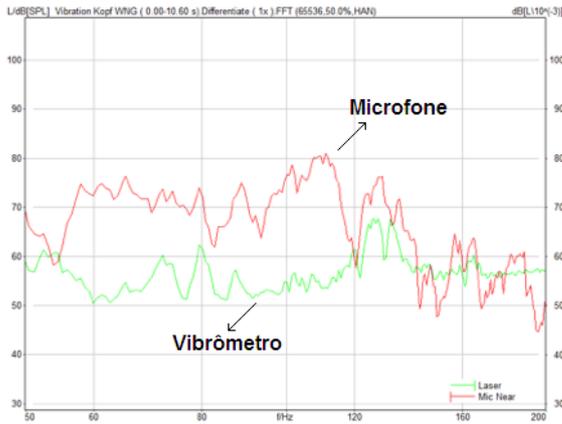


Figura 33 – Nível de aceleração do armário e nível de pressão sonora do sinal de teste
Fonte: Autoria Própria

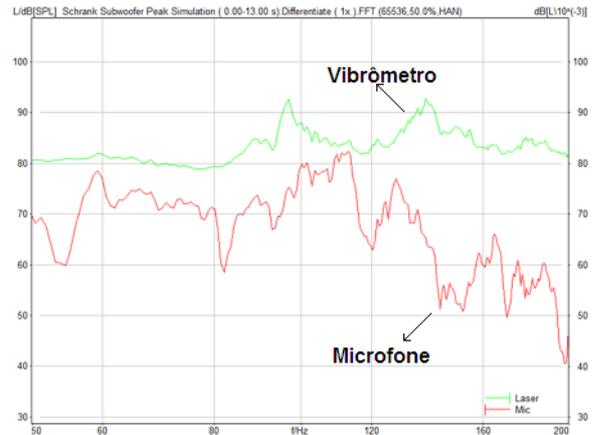


Figura 34 – Nível de aceleração no armário e nível de pressão sonora do sinal de teste com as simulações de perda de sinal
Fonte: Autoria Própria

Assim, pode-se comprovar que perdas de sinal do laser durante pequenos intervalos de tempo na medição, podem ter uma influência muito negativa sobre os resultados. Isso também pode ser explicado melhor analisando-se o espectrograma gerado pelo *software* Artemis para a segunda medição (com a simulação da perda de sinal). Esse diagrama pode ser visualizado na Figura 35.

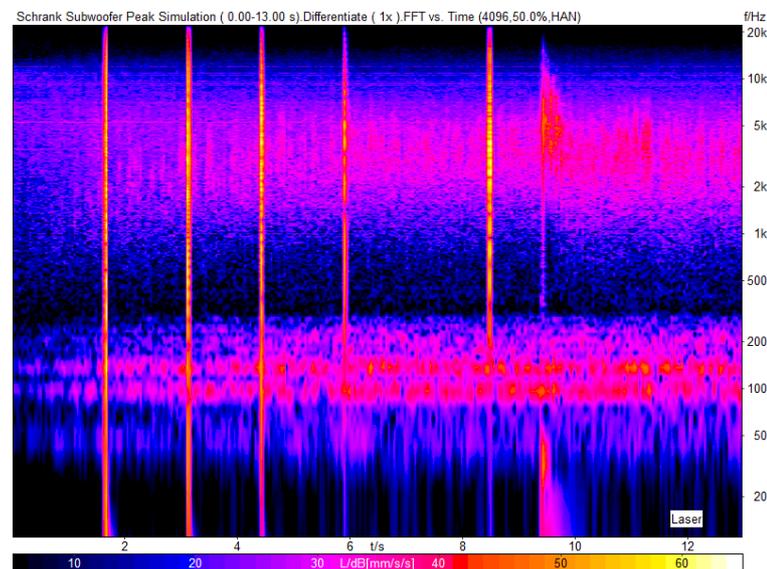


Figura 35 – Espectrograma da medição com simulação de perdas de sinal
Fonte: Autoria Própria

O eixo vertical da Figura 35 indica a frequência, enquanto o eixo horizontal indica o tempo. As cores mostram o nível de aceleração, em que quanto mais claro, mais elevado o nível. Assim, pode-se analisar como o nível de aceleração varia de acordo com o tempo e a frequência. Observa-se, então, que em alguns momentos do

ensaio houve alguns picos, indicado pelos elevados níveis de aceleração em todas as frequências. Esses momentos condizem exatamente com os momentos em que se simulou a perda de sinal com o papel interceptando o feixe de laser. Ou seja, uma perda de sinal do feixe de laser ocasiona os picos visualizados no espectrograma.

Como consequência desse elevado nível da aceleração em todas as frequências durante pequenas faixas do tempo (que resultariam, após uma análise de Fourier, em elevados e constantes níveis de aceleração), ao calcular a média da análise de Fourier, há uma forte influência no resultado, obtendo-se os elevados e constantes níveis de aceleração, que podem ser visualizados na Figura 34.

Assim, para todas as medições posteriores, o espectrograma sempre foi verificado, a fim de garantir que não houve nenhuma perda de sinal durante as medições. Caso houve algum indício de perda de sinal, o ensaio foi repetido, ou parte do sinal foi analisado, que não apresentava perdas. Com todas essas precauções sendo tomadas nos ensaios, verificou-se que, apesar de ter uma medição de aceleração sem contato com o corpo, o vibrômetro de laser-doppler apresenta uma desvantagem, que é a dependência desse equipamento exigir que a superfície do corpo iluminada o reflita para obtenção de medidas corretas.

Sabendo-se que perdas de sinal podem trazer uma forte influência sobre os resultados das medições, a aceleração no corpo foi medida novamente, no lado direito do peito e no pulso direito. Primeiramente, as vibrações inerentes do corpo foram medidas, e então o sinal de teste foi reproduzido com diferentes magnitudes. Para o pulso, 4 magnitudes foram utilizados, e para o peito, 3. A aceleração foi medida pelo vibrômetro laser-doppler e o nível de pressão sonora do sinal de teste por dois microfones presentes na sala. Após uma análise de Fourier, as curvas resultantes podem ser observadas nas Figuras 36 a 42, em que a curva das vibrações inerentes (referência) é sempre apresentada junta com as curvas do primeiro nível de pressão sonora, para comparação (determinação da relação sinal-ruído).

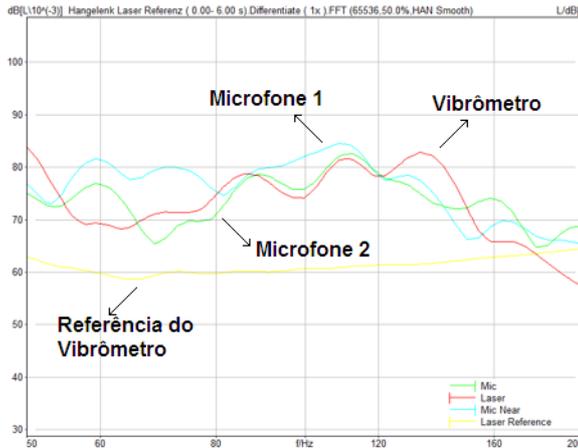


Figura 36 – Nível de aceleração do pulso e nível de pressão sonora para a primeira magnitude do sinal de teste, com referência
Fonte: Autoria Própria

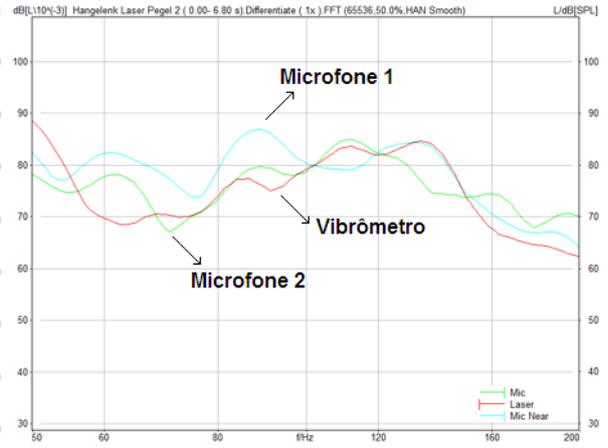


Figura 37 – Nível de aceleração do pulso e nível de pressão sonora para a segunda magnitude do sinal de teste
Fonte: Autoria Própria

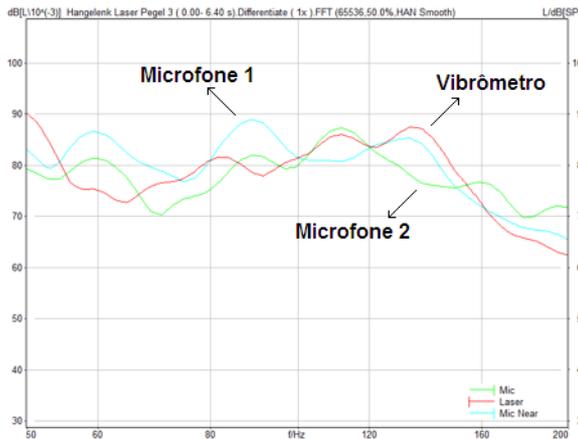


Figura 38 – Nível de aceleração do pulso e nível de pressão sonora para a terceira magnitude do sinal de teste
Fonte: Autoria Própria

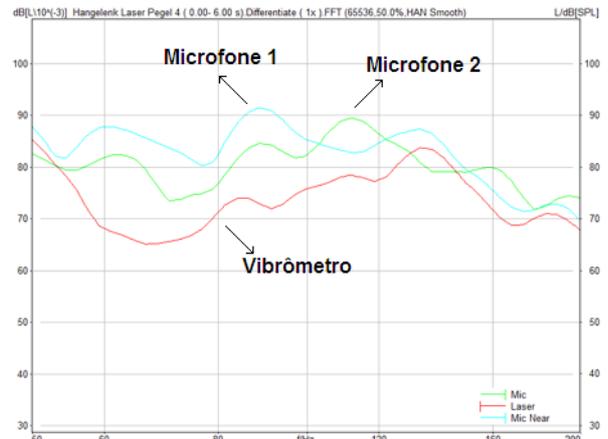


Figura 39 – Nível de aceleração do pulso e nível de pressão sonora para a quarta magnitude do sinal de teste
Fonte: Autoria Própria

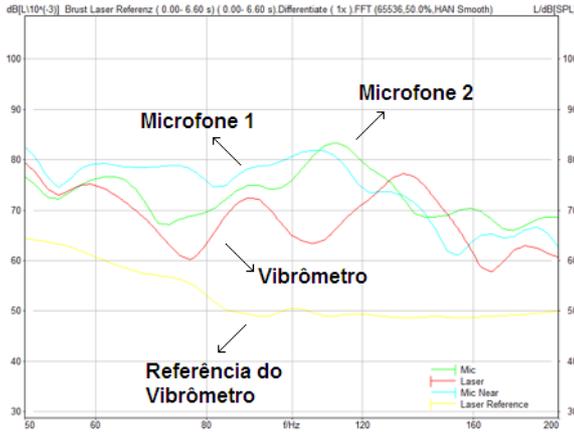


Figura 40 – Nível de aceleração do peito e nível de pressão sonora a primeira magnitude do sinal de teste, com referência
Fonte: Autoria Própria

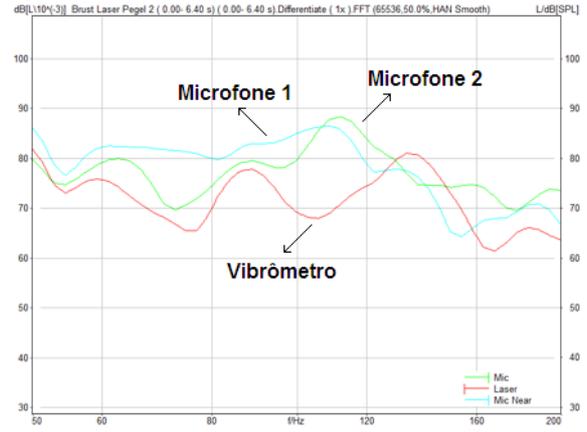


Figura 41 – Nível de aceleração do peito e nível de pressão sonora para a segunda magnitude do sinal de teste
Fonte: Autoria Própria

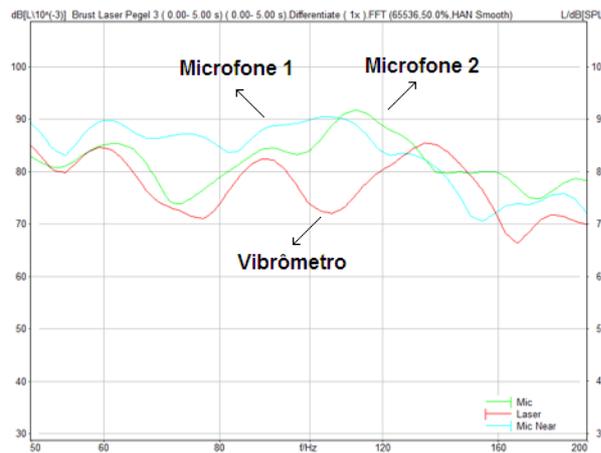


Figura 42 – Nível de aceleração do peito e nível de pressão sonora para a terceira magnitude do sinal de teste
Fonte: Autoria Própria

Pelas curvas resultantes, observa-se que a relação entre o nível de aceleração e o nível de pressão sonora permanece constante com os diferentes níveis no sinal de teste, porém não é constante em todas as frequências. A razão disso está nas várias interferências presentes nas medições, devido a sala em que os ensaios estavam sendo feitos. Isso pode ser observado comparando-se as curvas do nível de pressão sonora de ambos os microfones nas medições. As duas curvas, que deveriam ser iguais, pela distância relativamente pequena entre os microfones, diferem bastante.

Além disso, a curva resultante da medição do vibrômetro parece acompanhar a curva resultante da medição do microfone mais próximo em alguns momentos, porém em outros momentos parece acompanhar o microfone mais distante, como, por

exemplo, na Figura 39. Isso tudo indica a existência de modos acústicos no ambiente em que as medições estavam sendo feitas, tornando-o impróprio para qualquer ensaio. Portanto, outras medições foram realizadas na grande câmara anecoica do instituto, a fim de determinar qual nível de pressão sonora em frequências muito baixas é necessário para produzir uma sensação de vibração em uma pessoa. A grande vantagem da câmara anecoica é a ausência de qualquer tipo de reflexão acústica ou de modos acústicos, fazendo com que não haja nenhum tipo de interferência, garantindo os resultados corretos para os ensaios.

3.4 ENSAIOS PERCEPTUAIS NA CÂMARA ANECOICA

Na câmara anecoica, as medições de aceleração do corpo feitas previamente na sala foram repetidas (do peito e no pulso), e muitas outras medições de aceleração em diferentes partes do corpo também foram realizadas. As posições aproximadas das partes do corpo que foram medidas podem ser observadas na Figura 43.

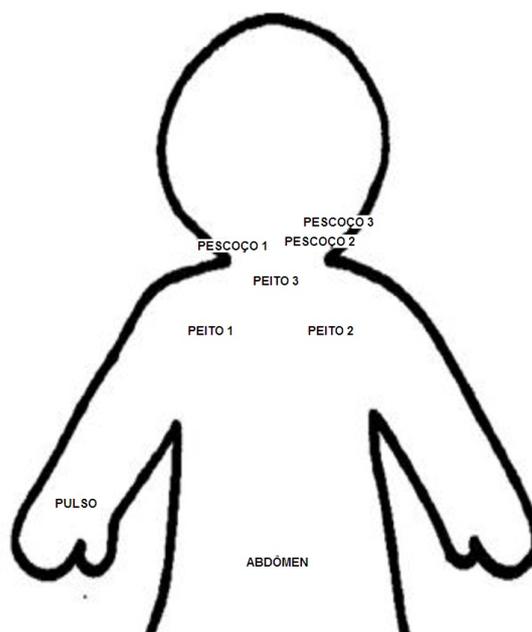


Figura 43 – Partes do corpo em que a aceleração foi medida na câmara anecoica

Fonte: Autoria Própria

Como já explicado na seção 2.3.1, para a medição da aceleração em uma parte do corpo, primeiro as vibrações inerentes foram determinadas. Então, o sinal de teste (ruído branco) foi reproduzido com diferentes magnitudes (aumentando-se o volume do sinal de teste em torno de 2 dB em cada medição), e a velocidade da parte do corpo foi medida pelo vibrômetro laser-doppler, assim como o nível de pressão sonora

pelo microfone. Utilizando o *software* Artemis da Head Acosutics, a análise de Fourier dos dados medidos foi realizada, assim como a diferenciação da velocidade, determinando assim a aceleração. Em seguida, foram determinados os níveis de aceleração e os níveis de pressão sonora, em função da frequência. As Figuras 44 a 69 mostram as curvas resultantes em todas partes do corpo. As vibrações inerentes (referência) em cada ponto de medição podem ser observadas sempre junto com a curva do primeiro nível do sinal de teste.

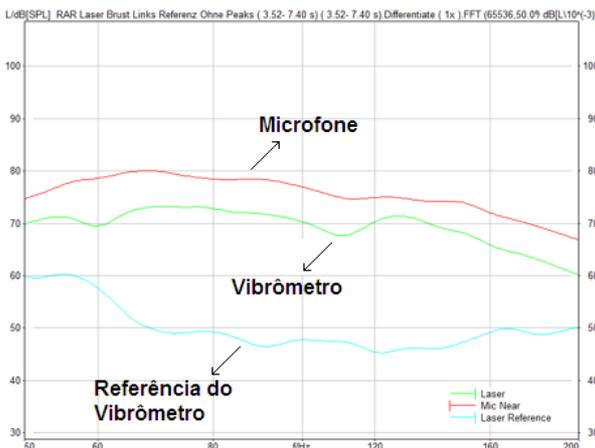


Figura 44 – Nível de aceleração na posição Peito 1 e nível de pressão sonora para a primeira magnitude do sinal de teste, com referência

Fonte: Autoria Própria

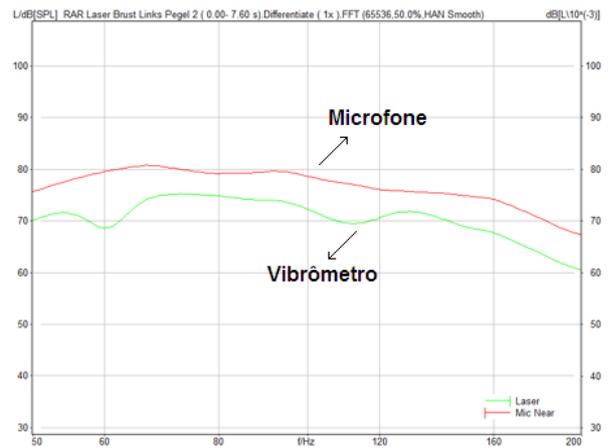


Figura 45 – Nível de aceleração na posição Peito 1 e nível de pressão sonora para a segunda magnitude do sinal de teste

Fonte: Autoria Própria

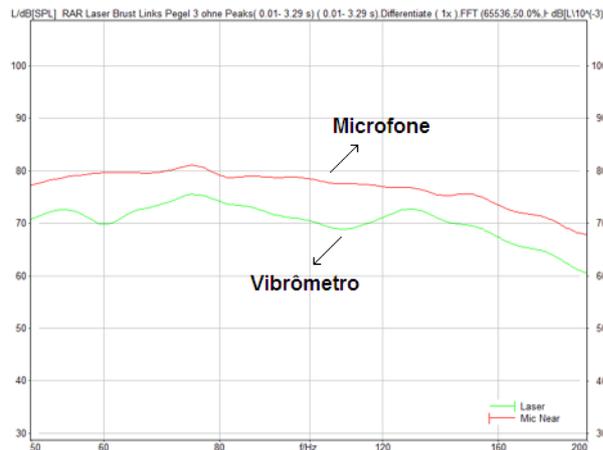


Figura 46 – Nível de aceleração na posição Peito 1 e nível de pressão sonora para a terceira magnitude do sinal de teste

Fonte: Autoria Própria

Os níveis de aceleração da primeira posição do corpo medida, Peito 1 (Figuras 44 a 46), mostram valores de aproximadamente 8 dB abaixo do nível de pressão

sonora. Também é possível observar que essa relação permanece aproximadamente constante para os diferentes níveis do sinal de teste, assim como para diferentes frequências. As vibrações inerentes medidas não possuem nenhuma influência sobre os resultados, pela boa relação sinal-ruído presente nas medições.

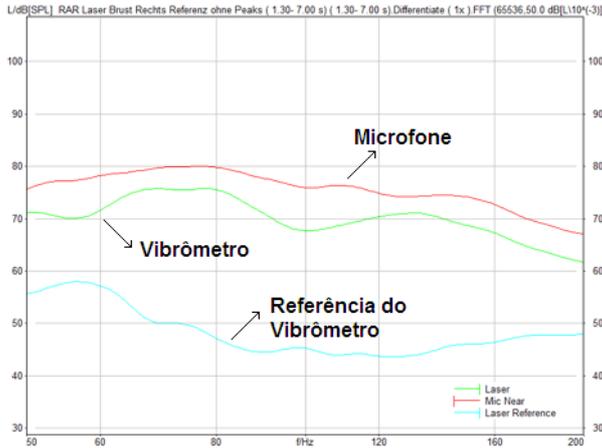


Figura 47 – Nível de aceleração na posição Peito 2 e nível de pressão sonora para a primeira magnitude do sinal de teste, com referência

Fonte: Autoria Própria

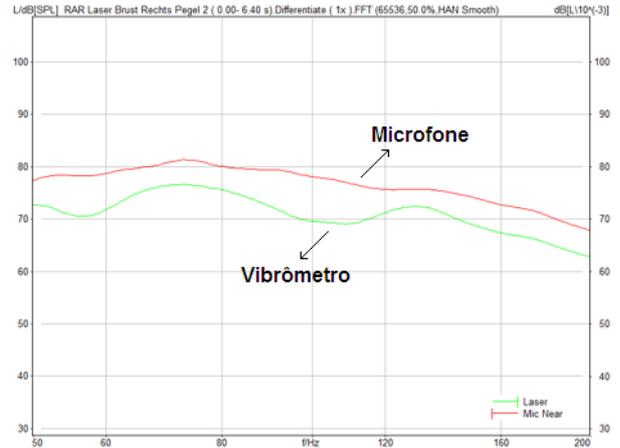


Figura 48 – Nível de aceleração na posição Peito 2 e nível de pressão sonora para a segunda magnitude do sinal de teste

Fonte: Autoria Própria

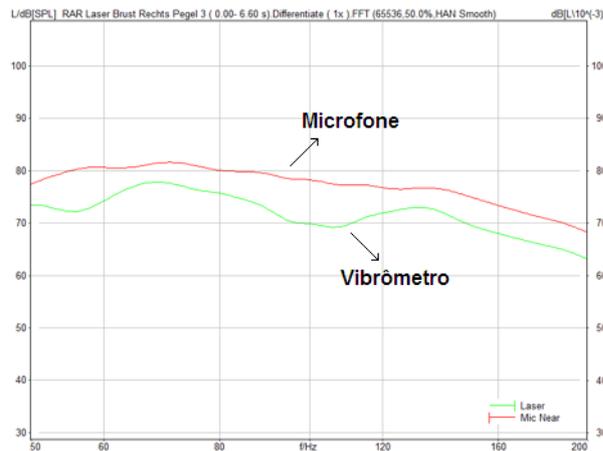


Figura 49 – Nível de aceleração na posição Peito 2 e nível de pressão sonora para a terceira magnitude do sinal de teste

Fonte: Autoria Própria

A segunda posição medida, Peito 2 (Figuras 47 a 49), também mostra níveis de aceleração com valores de aproximadamente 8 dB abaixo do nível de pressão sonora. Também é possível observar que essa relação permanece aproximadamente constante para diferentes frequências e para diferentes níveis do sinal de teste. As

vibrações inerentes medidas também não possuem nenhuma influência sobre os resultados, devido ao bom SNR.

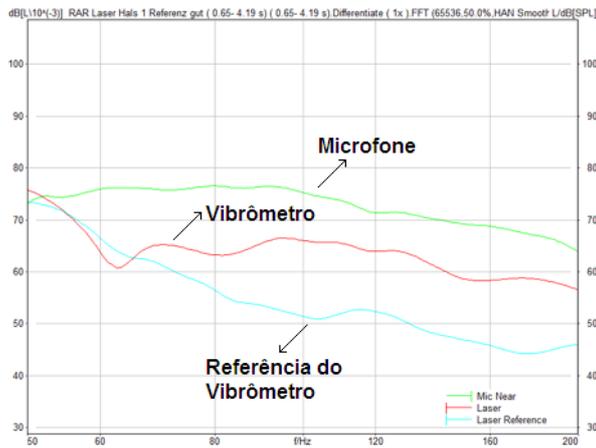


Figura 50 – Nível de aceleração na posição Pescoço 1 e nível de pressão sonora para a primeira magnitude do sinal de teste, com referência

Fonte: Autoria Própria

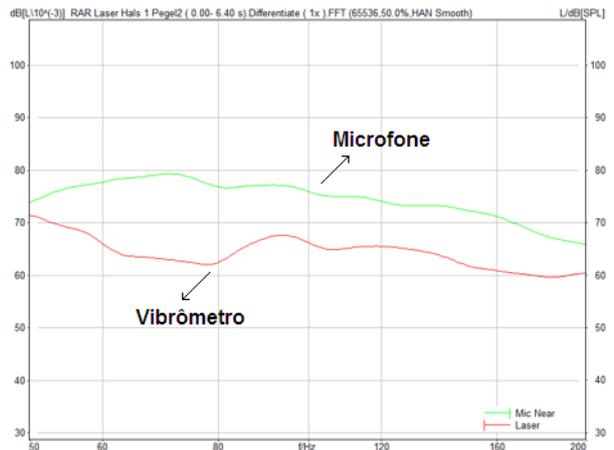


Figura 51 – Nível de aceleração na posição Pescoço 1 e nível de pressão sonora para a segunda magnitude do sinal de teste

Fonte: Autoria Própria

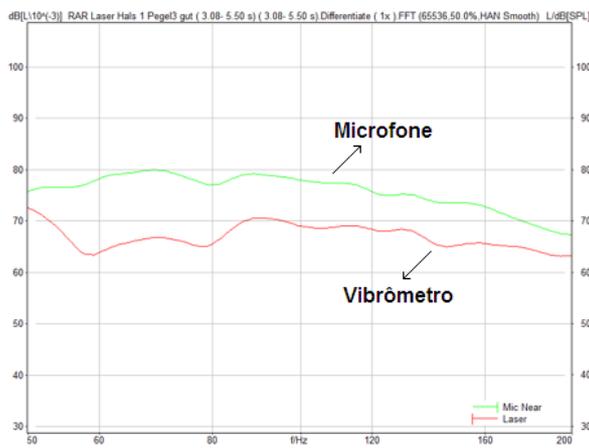


Figura 52 – Nível de aceleração na posição Pescoço 1 e nível de pressão sonora para a terceira magnitude do sinal de teste

Fonte: Autoria Própria

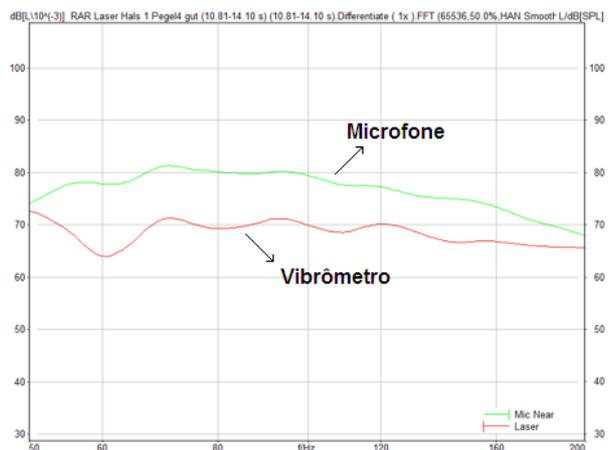


Figura 53 – Nível de aceleração na posição Pescoço 1 e nível de pressão sonora para a quarta magnitude do sinal de teste

Fonte: Autoria Própria

Os níveis de aceleração para a posição Pescoço 1 (Figuras 50 a 53) mostram valores com cerca de 10 dB abaixo dos níveis de pressão sonora. Essa relação permanece aproximadamente constante para os diferentes níveis do sinal de teste e

para diferentes frequências. Somente para frequências abaixo de 60 Hz essa relação tende a diminuir, devido a uma influência das vibrações inerentes. Em alguns casos, para frequências acima de 180 Hz essa relação também é um pouco menor, o que acontece provavelmente pelo fato da posição do corpo (Pescoço 1) ter a característica de vibrar menos nessas frequências.

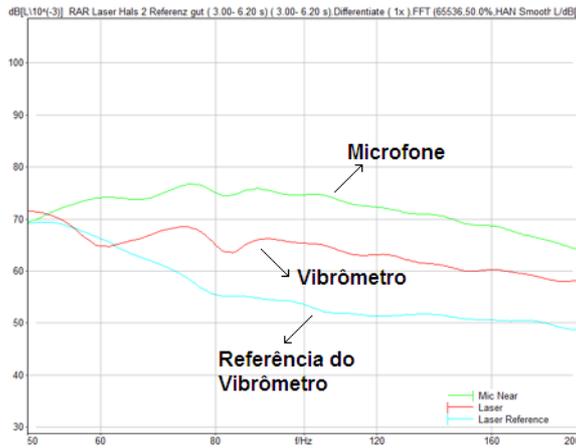


Figura 54 – Nível de aceleração na posição Pescoço 2 e nível de pressão sonora para a primeira magnitude do sinal de teste, com referência

Fonte: Autoria Própria

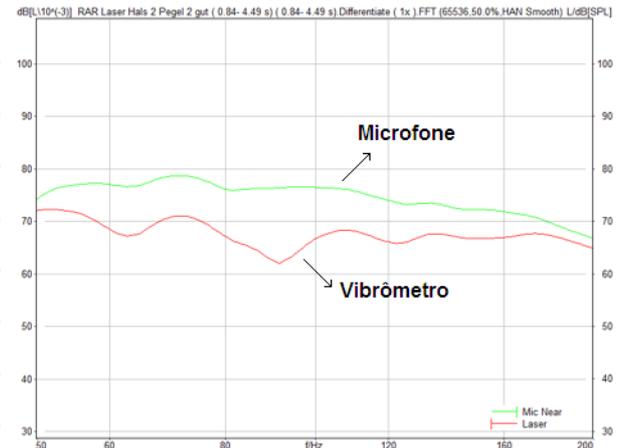


Figura 55 – Nível de aceleração na posição Pescoço 2 e nível de pressão sonora para a segunda magnitude do sinal de teste

Fonte: Autoria Própria

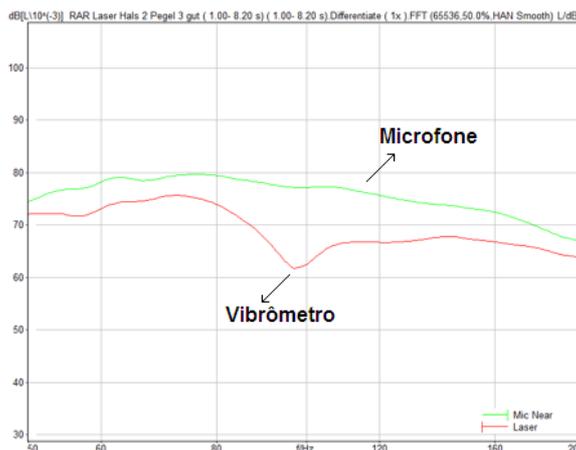


Figura 56 – Nível de aceleração na posição Pescoço 2 e nível de pressão sonora para a terceira magnitude do sinal de teste

Fonte: Autoria Própria

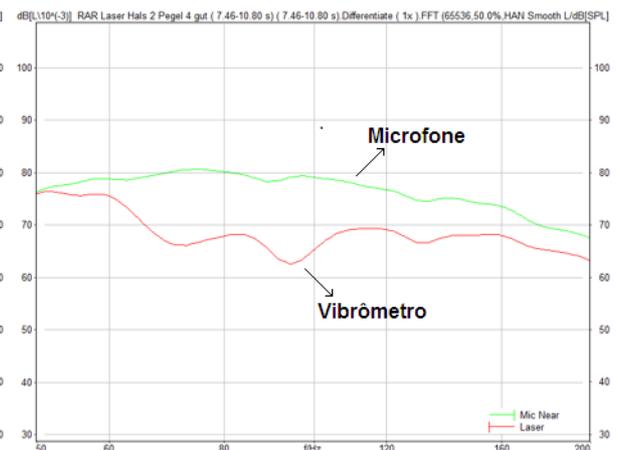


Figura 57 – Nível de aceleração na posição Pescoço 2 e nível de pressão sonora para a quarta magnitude do sinal de teste

Fonte: Autoria Própria

Na posição Pescoço 2 (Figuras 54 a 57), é possível observar que os níveis de aceleração tem valores de cerca de 10 dB maiores do que os níveis de pressão

sonora. Essa relação permanece aproximadamente constante para os diferentes níveis do sinal de teste e para diferentes frequências. Novamente, para frequências abaixo de 60 Hz essa relação tende a diminuir, devido a uma influência das vibrações inerentes.

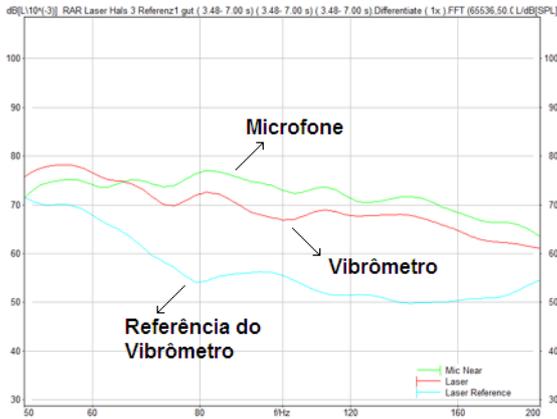


Figura 58 – Nível de aceleração na posição Pescoço 3 e nível de pressão sonora para a primeira magnitude do sinal de teste, com referência

Fonte: Autoria Própria

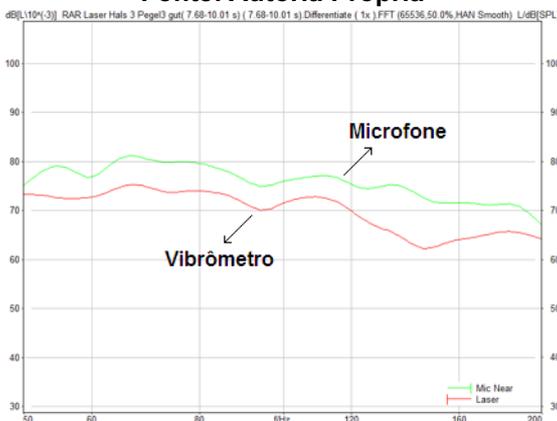


Figura 60 – Nível de aceleração na posição Pescoço 3 e nível de pressão sonora para a terceira magnitude do sinal de teste

Fonte: Autoria Própria

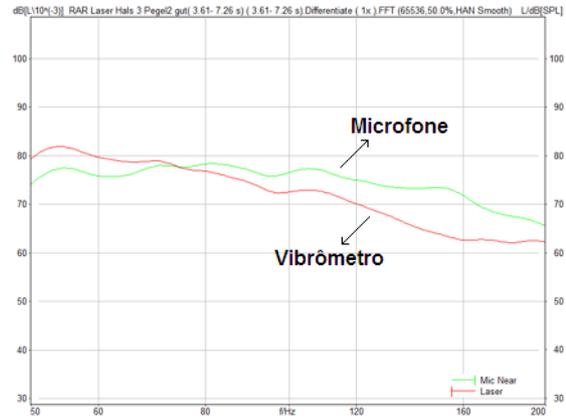


Figura 59 – Nível de aceleração na posição Pescoço 3 e nível de pressão sonora para a segunda magnitude do sinal de teste

Fonte: Autoria Própria

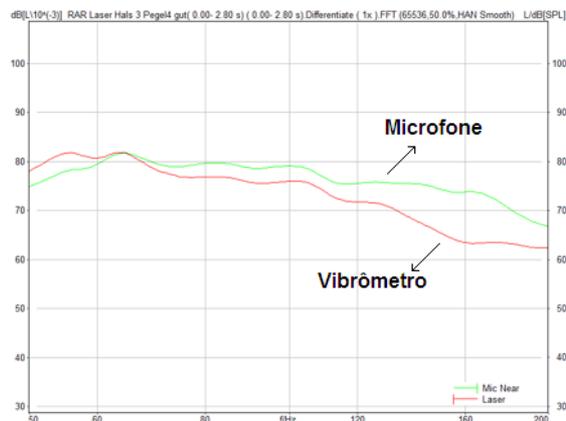


Figura 61 – Nível de aceleração na posição Pescoço 3 e nível de pressão sonora para a quarta magnitude do sinal de teste

Fonte: Autoria Própria

Analisando-se os níveis de aceleração da posição Pescoço 3 (Figuras 58 a 61), é possível observar que os valores são de aproximadamente 5 dB abaixo dos níveis de pressão sonora. Essa relação permanece aproximadamente constante para os diferentes níveis do sinal de teste e para diferentes frequências. Para frequências abaixo de 60 Hz essa relação tende a diminuir, devido a uma influência das vibrações inerentes.

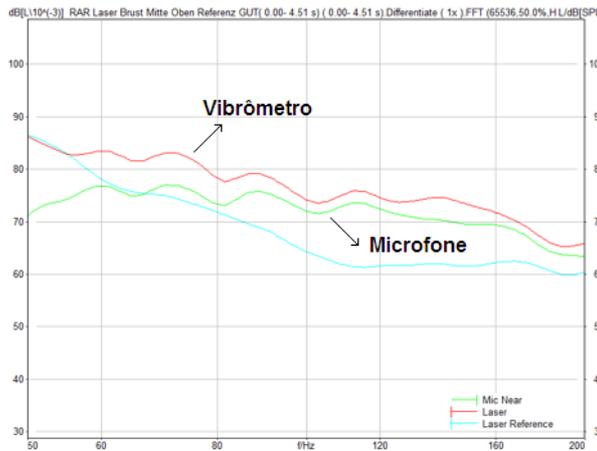


Figura 62 – Nível de aceleração na posição Peito 3 e nível de pressão sonora para a primeira magnitude do sinal de teste, com referência

Fonte: Autoria Própria

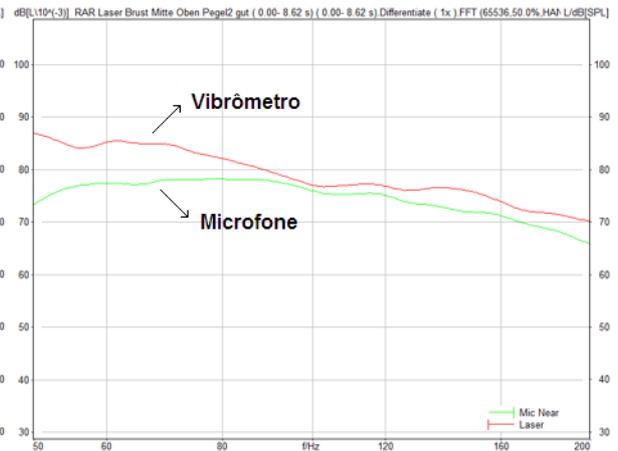


Figura 63 – Nível de aceleração na posição Peito 3 e nível de pressão sonora para a segunda magnitude do sinal de teste

Fonte: Autoria Própria

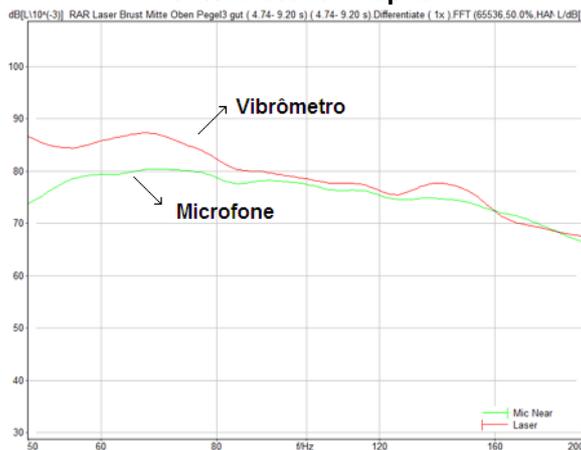


Figura 64 – Nível de aceleração na posição Peito 3 e nível de pressão sonora para a terceira magnitude do sinal de teste

Fonte: Autoria Própria

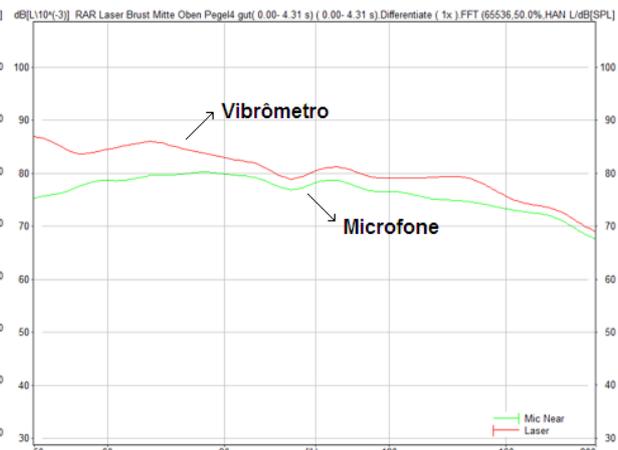


Figura 65 – Nível de aceleração na posição Peito 3 e nível de pressão sonora para a quarta magnitude do sinal de teste

Fonte: Autoria Própria

Diferentemente de todos os outros pontos de medição do corpo, os níveis de aceleração da posição Peito 3 (Figuras 62 a 65) mostram valores de aproximadamente 5 dB maiores do que os níveis de pressão sonora. Como se pode observar, essa relação também permanece aproximadamente constante para os diferentes níveis do sinal de teste e para diferentes frequências. Para frequências abaixo de 60 Hz essa relação tende a diminuir, devido a uma influência das vibrações inerentes.

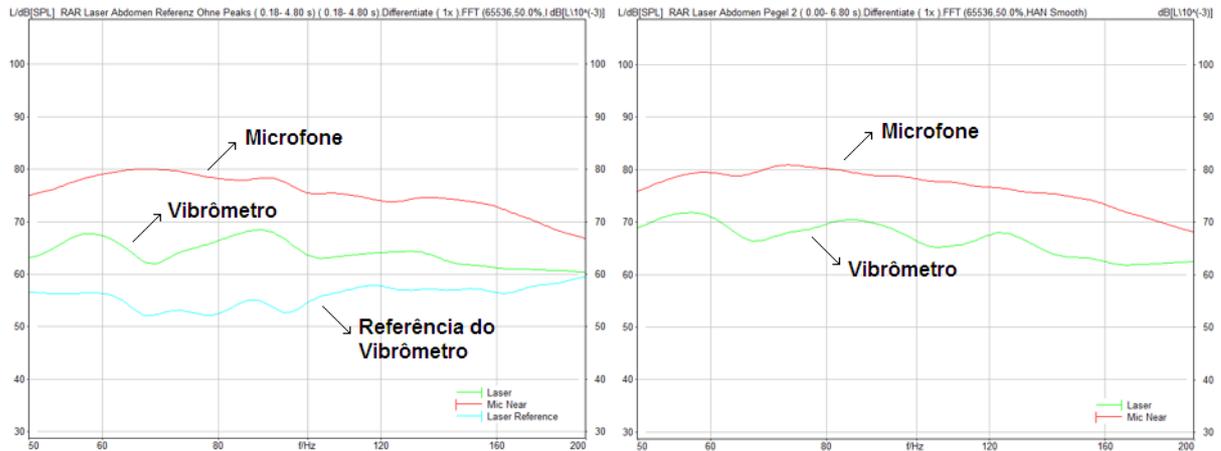


Figura 66 – Nível de aceleração na posição do Abdômen e nível de pressão sonora para a primeira magnitude do sinal de teste, com referência

Fonte: Autoria Própria

Figura 67 – Nível de aceleração na posição do Abdômen e nível de pressão sonora para a segunda magnitude do sinal de teste

Fonte: Autoria Própria

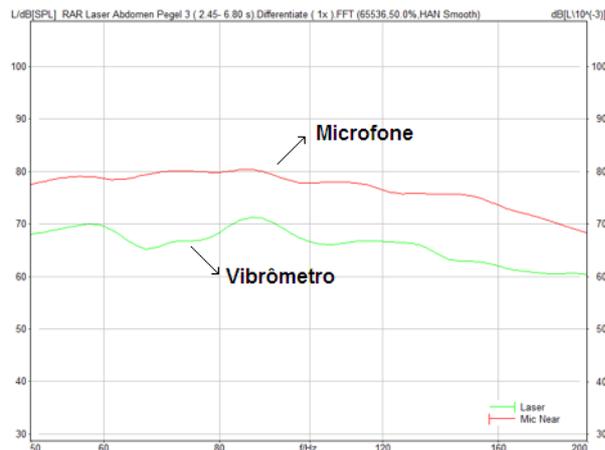


Figura 68 – Nível de aceleração na posição do Abdômen e nível de pressão sonora para a terceira magnitude do sinal de teste

Fonte: Autoria Própria

Na posição do Abdômen (Figuras 66 a 68), os níveis de aceleração mostram valores em torno de 10 dB abaixo dos níveis de pressão sonora, assim como na maioria dos outros pontos de medição. Como se pode observar, essa relação também permanece aproximadamente constante para diferentes frequências e para diferentes níveis do sinal de teste. As vibrações inerentes nesse caso não têm nenhuma influência sobre o resultado, por causa dos seus baixos níveis.

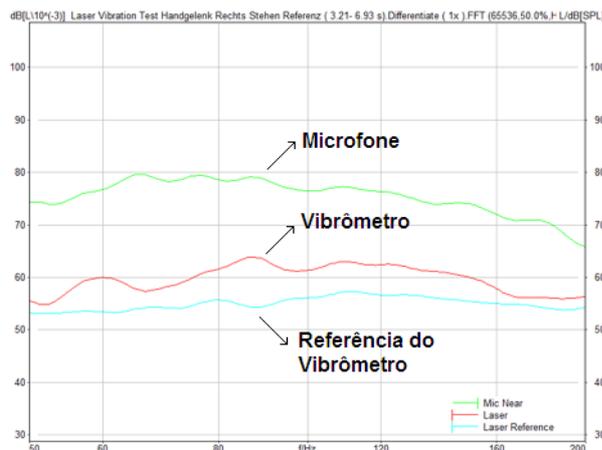


Figura 69 – Nível de aceleração na posição do Pulso e nível de pressão sonora para a primeira magnitude do sinal de teste

Fonte: Autoria Própria

Na posição do Pulso (Figura 69), somente uma magnitude do sinal de teste foi reproduzido, o que já foi o suficiente para mostrar que os níveis de aceleração possuem valores de aproximadamente 15 dB abaixo dos valores de pressão sonora. Também pode-se observar que essa relação permanece aproximadamente constante para diferentes frequências.

3.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS PERCEPTUAIS

Após as medições feitas na câmara anecoica, percebe-se uma grande melhoria em relação às medições realizados na sala anteriormente. A relação sinal-ruído aumentou, assim como não se visualizaram modos acústicos. Dessa maneira houve a necessidade de apenas um microfone nas medições. A curva do nível de aceleração é realmente influenciada somente pela aceleração do próprio corpo, fazendo com que a relação entre o nível de aceleração e o nível de pressão sonora seja determinada apenas pelo próprio corpo.

Com as curvas resultantes das medições, é possível observar que essa relação entre o nível de pressão sonora medida pelo microfone e o nível de aceleração do corpo medido pelo vibrômetro laser-doppler é praticamente constante ao longo de toda a faixa de frequência analisada. Também se pode observar que essa relação se mantém aproximadamente constante aumentando-se o nível de pressão sonora do sinal de teste, ou seja, com o aumento do nível de aceleração sonora, o nível de aceleração também aumenta.

Porém, o valor dessa relação não se mostrou a mesma para todas as posições do corpo medidas. No pulso, por exemplo, o nível de aceleração é 15 dB inferior ao nível de pressão sonora, enquanto na parte superior do peito (posição Peito 3), o nível de aceleração é em torno de 5 dB mais elevado que o nível de pressão sonora. A Figura 70 mostra essa relação para todas as partes do corpo medidas.

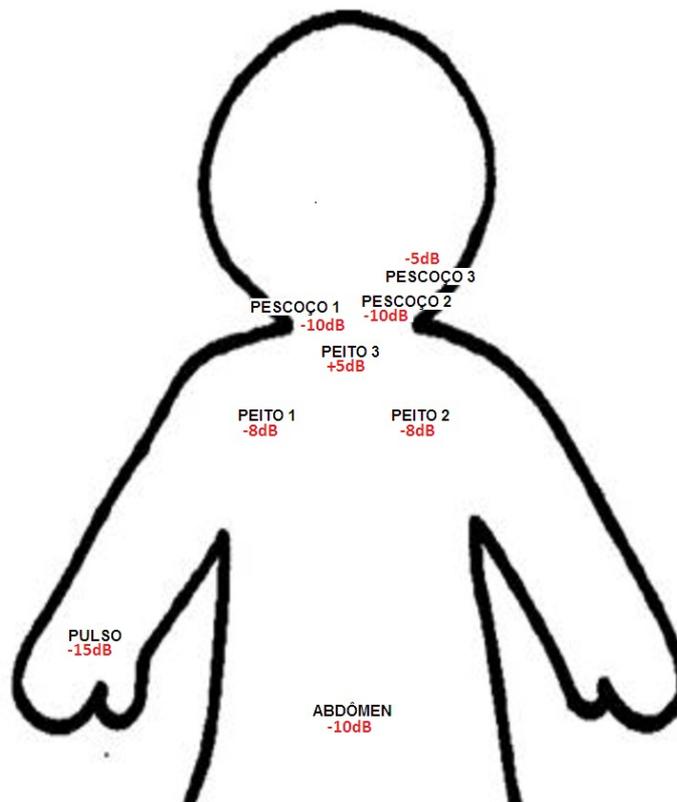


Figura 70 – Relação entre o nível de aceleração e o nível de pressão sonora nos pontos de medição

Fonte: Autoria Própria

Como se pode observar, as medições na maioria das partes do corpo mostram que o nível de aceleração é de aproximadamente 10 dB inferior ao nível de pressão sonora. Como essa relação é constante em toda faixa da frequência, acredita-se que ela também permanece a mesma para frequências inferiores a 50 Hz, ou seja, com o nível de aceleração 10 dB inferior ao nível de pressão sonora.

Essa afirmação condiz com os resultados de experimentos anteriores, em que a contribuição das vibrações do corpo para a sensação de vibração induzida por ruídos complexos de frequências graves e a elevados níveis foi estudada (TAKAHASHI, 2011, p. 7). Como se pode observar na Figura 71, o nível de aceleração (VAL) medido para um sinal de 31,5 Hz com 100 dB foi de aproximadamente 87 dB

+ 5 dB, o que corresponde a uma diferença de aproximadamente 10 dB. Também pode-se verificar que com uma diminuição do sinal de 31,5 Hz para 90 dB, o VAL diminui para aproximadamente 80 dB, o que também condiz com a afirmação de que a relação entre o nível de pressão sonora e o nível de aceleração permanece constante com uma mudança do nível de pressão sonora do sinal de teste.

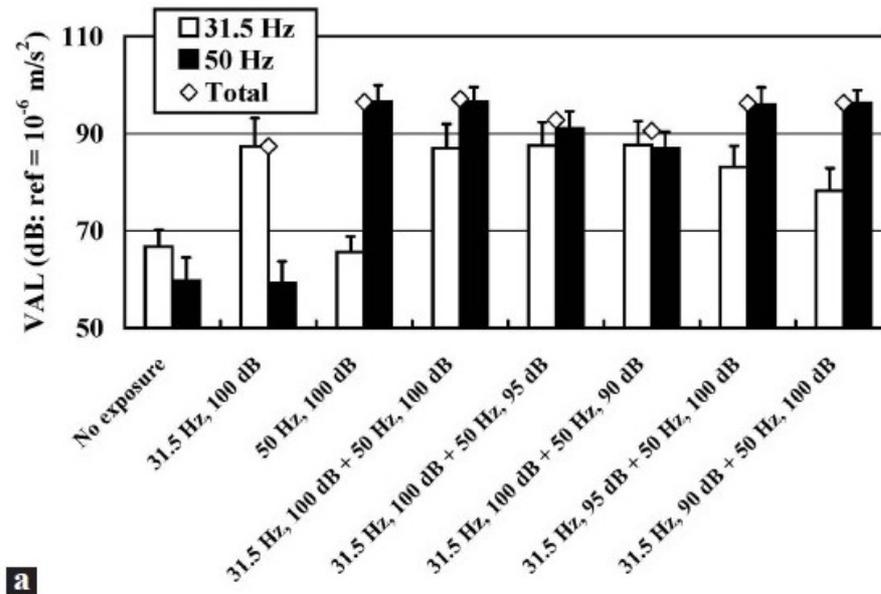


Figura 71 – Níveis de aceleração (VAL) para vibrações inerentes e induzidas por um sinal de teste, medidas no lado direito do peito

Fonte: TAKAHASHI (2011, p. 7).

Sabendo-se que a relação entre o nível de pressão sonora e o nível de aceleração é de aproximadamente 10 dB, ainda é necessário determinar que nível de aceleração faz com que uma pessoa tenha a sensação de vibração no seu corpo. A resposta para isso está no estudo realizado por Morioka e Griffin (2008), já citado anteriormente.

Neste estudo, foram determinados os limites absolutos para a sensação de vibração em termos da aceleração em três direções: frente e trás, lateral e vertical. Esses limites foram determinados para 3 posições: mão, assento e pé. Os resultados obtidos nesse estudo para a vibração vertical (perpendicular à superfície do corpo), mostram que para as três partes do corpo, em frequências entre aproximadamente 2 Hz e 400 Hz, o limite da aceleração para a sensação de vibração está entre 0,01 e 0,1 ms^{-2} (rms), o que equivale a níveis de aceleração entre 84 e 100 dB (Figura 72).

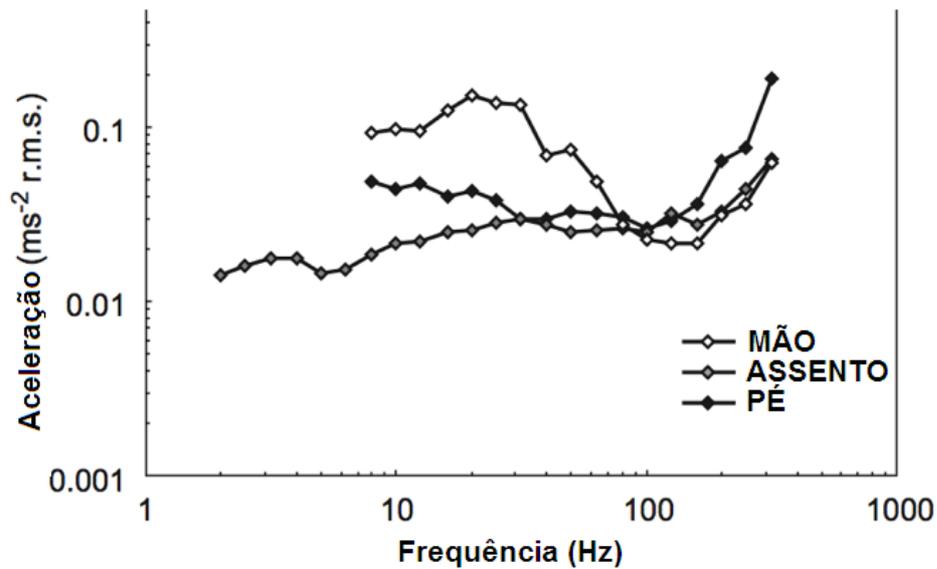


Figura 72 – Comparação do limite da aceleração do corpo para uma sensação de vibração entre a mão, pé e assento para vibração vertical

Fonte: MORIOKA; GRIFFIN (2008, p.364).

Com base nos resultados apresentados na Figura 72, conclui-se que o mínimo de aceleração do corpo necessário para garantir uma sensação de vibração em uma pessoa seria algo em torno de $0,01 \text{ ms}^{-2}$ para frequências localizadas na área do infrassom, o que equivale a 80 dB. Assim, com essa informação e com os resultados dos ensaios perceptuais, o nível mínimo de pressão sonora para gerar uma sensação de vibração em uma pessoa seria de 80 dB + 10 dB, resultando em 90 dB. Entretanto, para se garantir uma sensação de vibração, acima do nível mínimo de 90 dB, seria mais adequado escolher um valor levemente maior. Um aumento de mais 10 dB já seria o suficiente para isso, chegando-se ao valor de 100 dB de nível de pressão sonora.

Em outro estudo realizado nessa área (TAKAHASHI, 2009), o autor determinou o limiar da sensação de vibração induzido por ruído de baixas frequências, em termos no nível de pressão sonora, conforme pode ser visualizado na Figura 73.

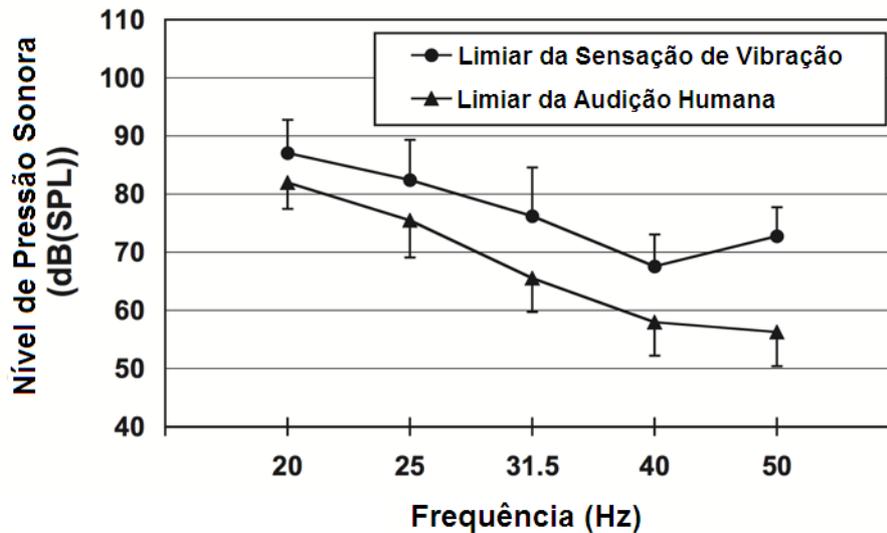


Figura 73 – Limiar da sensação de vibração e da audição humana em função da frequência

Fonte: TAKAHASHI (2009, p.248).

É interessante notar que os limiares de sensação de vibração determinados pelo estudo da Figura 73 não condizem com aqueles obtidos neste trabalho, pelo menos para as frequências de 20 a 50 Hz. Para a frequência de 50 Hz, por exemplo, o artigo sugere que o limiar da sensação de vibração se encontra em torno de 72 dB. Porém, analisando os resultados de Morioka e Griffin, da Figura 71, o nível de aceleração mínimo necessário para produzir uma sensação de vibração seria de aproximadamente 90 dB. O nível de pressão sonora nesse caso seria de 90 dB + 10 dB = 100 dB.

Uma explicação para essa diferença de 72 dB para 100 dB poderia ser o método e a configuração utilizado em cada um desses experimentos. Por exemplo, durante os experimentos do Morioka e Griffin, os voluntários que participaram dos ensaios foram expostos a ruído branco a 75 dB por um par de fones de ouvido, prevenindo, assim, que eles escutassem o ruído, e ajudando-os a se concentrar somente na sensação de vibração, por meio do mascaramento de qualquer som capaz de causar distração.

Esse mesmo cuidado não foi tomado em Takahashi (2009), em que os voluntários participantes não tiveram nenhum tipo de proteção auricular ou mascaramento de tons. Isso aconteceu pelo fato do autor querer investigar como os voluntários sentiriam o ruído de baixas frequências nas mesmas condições de um ambiente real.

Para frequências que ainda podem ser ouvidas (50 Hz, por exemplo), a influência que a audição do sinal de teste causa na sensação de vibração pode ser muito alta. Agora isso já não é o caso dos voluntários que estavam com fones de ouvido com um ruído branco tocando, já que qualquer tipo de som é mascarado.

Para frequências muito graves, o som não pode ser escutado, mas apenas sentido. Assim, os resultados com ou sem fones de ouvido poderiam ser os mesmos. Observando-se o limiar de sensação de vibração da Figura 73, que estão disponíveis apenas até 20 Hz, pode-se observar que com uma aproximação, o limiar de sensação de vibrações mais baixas tenderia a subir, chegando possivelmente nos 90 dB, o que estaria de acordo com as medições deste trabalho.

3.6 GERAÇÃO DE SENSAÇÃO DE VIBRAÇÃO

Após a determinação do nível de pressão sonora necessária para produzir uma sensação de vibração no corpo humano, aplicou-se esses conhecimentos para estudar a aplicação dos diferentes tipos de transdutores já existentes na geração de níveis suficientemente altos de infrassom. Os cálculos foram realizados para a geração de aproximadamente 100 dB de nível de pressão sonora, conforme determinado na seção 3.5.

Para o transdutor eletrodinâmico, existem vários modelos que descrevem o seu funcionamento, e o mais usado é o de membrana de pistão circular. Com esse modelo é possível calcular a potência sonora do transdutor, utilizando-se a resistência de radiação específica da membrana de pistão circular. A resistência de radiação específica é definida para $kR \ll 1$ (raio pequeno em comparação com o comprimento de onda), e é igual a:

$$\underline{Z}_{r,s} = \frac{1}{2} \rho_0 c_0 (kR)^2 + j\omega \rho_0 \frac{8R}{3\pi} \quad (6)$$

onde c_0 é a velocidade do som, $k = \frac{2\pi f}{c_0}$ o número de onda, R o raio da membrana de pistão circular e ρ_0 a densidade do ar (KÖLTZSCH, 2009).

A potência sonora de uma membrana de pistão circular é dada por:

$$P = S_0 \tilde{v}_0^2 Re(\underline{Z}_{r,s}) \quad (7)$$

onde $S_0 = \pi R^2$ é a área da membrana de pistão circular, \tilde{v}_0 a velocidade do pistão, e $Re(\underline{Z}_{r,s})$ a parte real da resistência de radiação específica (BLACKSTOCK, 2000) A

potência sonora então pode ser calculada utilizando-se a parte real da Equação (6), resultando em:

$$P = \frac{1}{2} S_0 \tilde{v}_0^2 \rho_0 c_0 (kR)^2 \quad (8)$$

Essa equação também pode ser escrita em função da frequência do movimento do pistão, assim como seu raio e o seu deslocamento. Para isso, a equação do deslocamento de uma oscilação harmônica foi utilizada:

$$\xi = \frac{\tilde{v}_0}{\omega} \quad (9)$$

em que $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular do pistão.

Rearranjando alguns termos, a potência sonora de uma membrana de pistão circular em função de sua frequência, raio e deslocamento, é:

$$P = \frac{8\pi^5 \rho_0 R^4 \xi^2 f^4}{c_0} \quad (10)$$

Utilizando-se dessa equação, é possível determinar a potência sonora de um alto-falante comum, em função da frequência. Considerando-se dimensões comuns de um alto falante de 15", com um deslocamento de no máximo 1 cm a uma frequência de 40 Hz, por exemplo, a potência sonora seria de aproximadamente 3 W. O nível de pressão sonora correspondente pode então ser calculado pelas seguintes fórmulas:

$$\text{Nível de potência sonora} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{ac}}{P_{ac_0}} \right) dB \quad (11)$$

em que P_{ac} é a potência sonora e $P_{ac_0} = 10^{-12}$ é o valor da referência de potência sonora, e:

$$\text{Nível de pressão sonora} = L_W - 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi r^2} \right) dB \quad (12)$$

em que L_W é o nível de pressão sonora, Q o fator de diretividade e r a distância para a fonte sonora.

Inserindo o valor de 3 W na Equação (11), e o resultado disso na Equação (12), o nível de pressão sonora seria de aproximadamente 100 dB a uma distância de 5m para a fonte $Q = 1$ (propagação esférica). Considerando o mesmo alto-falante, mas para uma frequência de 1 Hz e um deslocamento da membrana de 1,5 cm, a potência sonora é reduzida a $P = 2,56 \cdot 10^{-6}$ W, o que corresponde a um nível de pressão sonora de apenas 39,11 dB a 5 m de distância da fonte sonora.

Os resultados desses cálculos mostram que esse princípio de transdutor não é adequado para a reprodução de infrassom. Por exemplo, para se alcançar níveis de pressão sonora a 100 dB, a 5 m de distância para uma frequência de 1 Hz, um

deslocamento da membrana de 42 cm seria necessário, assim como um alto-falante de 94.49”.

Já foram realizadas construções de transdutores com dimensões nessas mesmas proporções, para testes. Um exemplo foi a construção de um transdutor com uma membrana de 51”, capaz de produzir 160 dB a uma frequência de 16 Hz. Ele foi construído em um episódio do programa *Mythbusters* do canal *Discovery Channel*, a fim de verificar se elevados níveis de pressão sonora em graves frequências seriam capazes de quebrar as janelas do automóvel (CONLEY, 2006). O *Mythwoofer* construído foi capaz de tirar o teto solar do lugar, porém logo após se desintegrou, devido ao elevado nível de pressão sonora, mostrando não ser adequado para a geração de infrassom.

Da mesma maneira, os outros princípios de transdutores como o *Ribbon Speaker*, o transdutor magnetostático, o eletrostático e o piezoelétrico também não poderiam ser usados na geração de infrassom, visto que o deslocamento da membrana é mínimo. Para a reprodução de infrassom, o tamanho da membrana teria que ser absurdamente grande, o que também torna a aplicação desses princípios inviável.

O transdutor Servo Drive possui uma vantagem em relação ao transdutor eletrodinâmico, que é um maior deslocamento da membrana, devido ao sistema de transmissão robusto por correia. Porém o princípio de excitação é o mesmo, ou seja, uma membrana produzindo a radiação do som. Dessa maneira, os cálculos da seção 3.5 também são válidos nesse caso, tornando os transdutores Servo Drive incapazes de gerar infrassom.

Portanto, como os transdutores já existentes no mercado não são viáveis para a geração de infrassom, novos princípios foram estudados no próximo capítulo.

4 GERAÇÃO DE INFRASSOM

4.1 DIFERENTES PRINCÍPIOS DE TRANSDUTORES PARA GERAÇÃO DE INFRASSOM

Além dos transdutores de princípio eletrodinâmico e Servo Drive, que possuem uma membrana que vibra a fim de gerar ondas sonoras, existem também alguns outros princípios de transdutor. Assim, uma pesquisa foi realizada para verificar a viabilidade da aplicação dos mesmos na geração de infrassom.

4.1.1 Transdutor com o Princípio de Excitação de Um Ventilador

Uma alternativa de princípio de transdutor que pode ser usado na geração de infrassom é o princípio de ventilador. O transdutor, também conhecido como *Rotary Woofer*, consiste em um controlador de motor e um motor elétrico, que gira uma série de lâminas a uma velocidade constante (aproximadamente 600 a 800 rpm) (WILKINSON, 2010). Essas lâminas são então inclinadas enquanto estão em rotação, gerando uma onda de pressão, cuja amplitude é controlada pelo grau de inclinação. Esse grau de inclinação é determinado pelo amplificador, ou seja, é proporcional ao sinal de áudio aplicado. Assim, como o ar passa através das lâminas, quando há uma oscilação na inclinação das mesmas, criam-se ondas sonoras durante o giro. Um exemplo de um *Rotary Woofer* pode ser visualizado na Figura 73.

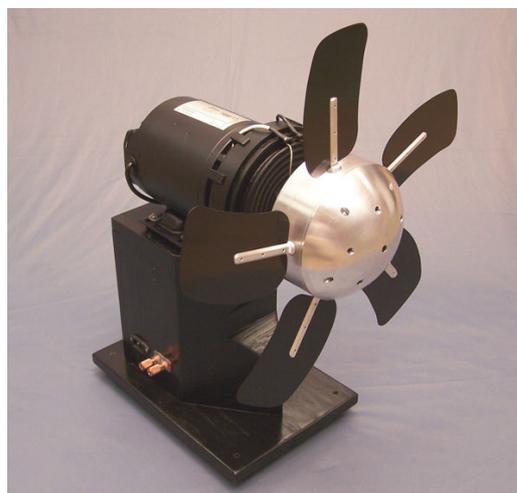


Figura 74 – Rotary Woofer

Fonte: WILKINSON (2010).

A principal diferença entre o transdutor com princípio de ventilador e o princípio de excitação por uma membrana é a sua impedância em relação ao ar. A densidade do ar é muito baixa para se ter um bom casamento da sua impedância com um alto-falante de membrana.

Para ilustrar melhor esta ideia, pode-se pensar na mão de uma pessoa como sendo uma membrana de um alto-falante. Ao tentar “pegar” o ar, ou tentar empurrar o ar com a maior velocidade possível com a mão esticada, percebe-se que a resistência do ar passa quase despercebida durante o movimento da mão, e as moléculas de ar simplesmente deslizam em torno dos dedos. Da mesma forma, observa-se quão fútil é a ideia de tentar mover o ar para criar uma pequena quantidade de pressão em frequências muito graves com um alto-falante de membrana.

Agora, com um carro em movimento, e a mão fora do mesmo, percebe-se que quanto mais rápido o movimento do carro, o ar parece cada vez mais denso. Além disso, com uma simples inclinação da mão, pode-se desviar um grande número de moléculas de ar. Isso ilustra a maneira como o *Rotary Woofer* trabalha, e como, através da inclinação das lâminas, é efetivo no acoplamento com o ar, a fim de gerar pressão sonora. Assim, o transdutor com o princípio de ventilador é muito mais eficiente para mover o ar em frequências na área de infrassom.

Por conta dessa eficiência, este princípio de transdutor possui várias vantagens. Entre elas está a necessidade de se ter muito menos potência no amplificador para poder alcançar uma boa potência sonora. Além disso, a resposta na frequência desse tipo de alto-falante é muito boa para frequências abaixo de 20 Hz, chegando a aproximadamente 100 dB de nível de pressão sonora, conforme a Figura 75.

Porém, apesar de ser um bom gerador de infrassom, o transdutor de princípio de ventilador possui uma grande desvantagem: para um bom funcionamento, o volume da caixa no qual ele precisa ser inserido deve ser muito grande. Tipicamente, a sua instalação necessita de um quarto inteiro, ático ou porão. Testes com o *Rotary Woofer* normalmente são realizados dentro de containers ou caminhões (única maneira de tornar o transdutor portátil), conforme a Figura 76.

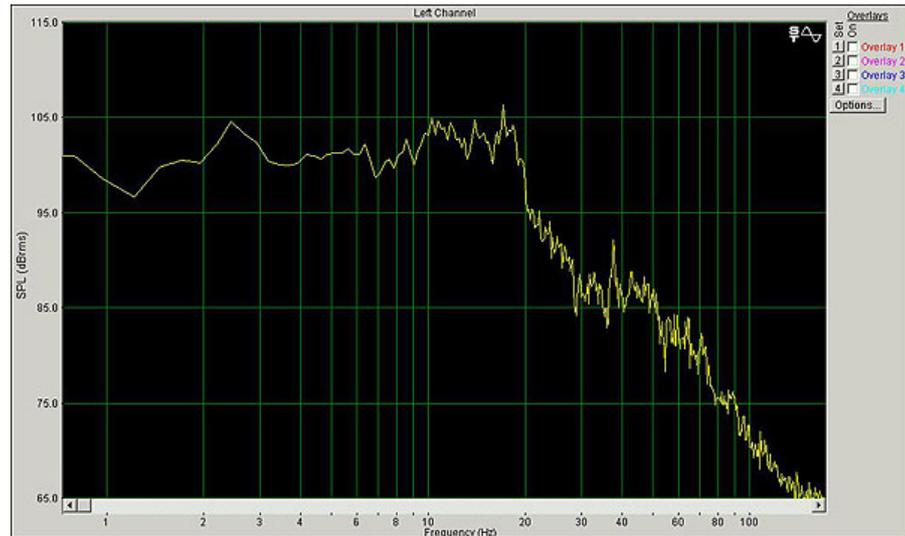


Figura 75 – Resposta na Frequência do Rotary Woofer

Fonte: WILKINSON (2010).

Outra desvantagem desse transdutor é o seu custo. Por exemplo, o *Rotary Woofer* TRW-17 da Eminent Technology, custava em 2007 um valor total de mais de 20 mil dólares (TIBU, 2007). Assim, pela praticidade da instalação e o seu preço, a aplicação do transdutor de princípio de ventilador na geração de infrassom também é inviável.



Figura 76 – Teste com o Rotar Woofer em um caminhão

Fonte: PARK; GARGES (2008).

4.1.2 Transdutor com o Princípio de Excitação Pneumático ou Hidráulico

Outra opção na geração de infrassom poderia ser o princípio de excitação de uma membrana, porém com o uso de um sistema pneumático ou hidráulico para a movimentação da membrana. No caso de um sistema pneumático, um tanque seria

necessário, assim como um compressor de ar, a fim de aumentar a pressão do sistema, sendo possível, assim, movimentar um cilindro pneumático (ligado à membrana do transdutor) controlado por uma válvula. O movimento deste cilindro acoplado à membrana poderia gerar então o infrassom desejado.

Para este sistema funcionar, o melhor tipo de cilindro seria o de dupla ação, capaz de produzir trabalho em ambos sentidos de movimento. Outras características importantes seriam a presença de uma haste simples e não giratória (na qual a membrana não pode girar), uma alta pressão de entrada (maior velocidade no movimento), amortecimento (impede a haste de bater no fim de seu curso), assim como sensores de fim de curso, controlando a válvula controladora do cilindro automaticamente (NESBITT, 2007).

Essa válvula de controle do cilindro também seria de grande importância no sistema, pois ela determinaria o movimento do mesmo. Para isso, deveria ser usada uma válvula direcionadora de 4 vias, pela dupla ação do cilindro, assim como um acionamento elétrico (vindo dos sensores de fim de curso).

Porém, a limitação desse tipo de sistema, fazendo com que a aplicação do transdutor de princípio pneumático ou hidráulico ainda não tenha sido implementada, é a baixa velocidade desses sistemas. Para uma frequência de 20 Hz, por exemplo, em um tempo de 1 segundo o cilindro teria que se movimentar 20 vezes para frente e para trás, algo impraticável nesse tipo de sistema.

Outro ponto a ser notado é que além da válvula e do cilindro, o sistema pneumático também deveria ter uma válvula simples piloto (para ligar e desligar o sistema), uma válvula reguladora (manter a pressão constante no cilindro), filtro, compressor de ar, entre outros. Todos esses componentes iriam aumentar muito a manutenção necessária para o sistema, tornando-se um sistema não muito robusto (MEAD FLUID DYNAMICS, 2012).

Portanto, a utilização de um sistema pneumático ou hidráulico na construção de um transdutor capaz de gerar infrassom não seria o mais adequado. Além da velocidade ser muito baixa para uma aplicação dessas, a potência sonora gerada pelo sistema seria tão baixa quanto a de um sistema eletrodinâmico, devido à movimentação da membrana ser limitada e ter um tamanho muito inferior ao necessário para gerar infrassom.

4.1.3 Transdutor com o Princípio de Excitação de Modulação de Fluxo de Ar

Para a geração de infrassom, outro princípio de transdutor foi estudado: o princípio de excitação de modulação de ar. A ideia deste princípio é ter um fluxo de ar à alta pressão modulado por uma baixa frequência, usando algum tipo de membrana ou válvula. Essa baixa frequência poderia alcançar até 1 Hz, para a qual somente um impulso seria gerado pelo transdutor, dando uma sensação de vibração. O nível de pressão sonora determinado na seção 3.5 foi utilizado como alvo nos cálculos para este princípio de transdutor.

Para a modulação de fluxo de ar produzir 100 dB de nível de pressão sonora na área do infrassom, uma grande quantidade de ar seria necessária. Considerando uma frequência de 1 Hz, o princípio de excitação de uma membrana, explicado na seção 3.6, necessitaria de um deslocamento de 42 cm e uma membrana de 94,49" para produzir o nível de pressão sonora desejado, a 5 m de distância da fonte sonora. Ao aplicar esse deslocamento por toda área da membrana, o resultado seria a oscilação de um volume de ar de $1,9 \text{ m}^3$, ou 1900 L, usando a Equação 13:

$$V = \xi \cdot A = \xi \pi R^2 \quad (13)$$

na qual ξ é o deslocamento e R o raio da membrana.

Essa oscilação iria ocorrer a cada segundo, criando a necessidade de um fluxo de ar de aproximadamente $1,9 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondente a $114 \text{ m}^3/\text{min}$ or $114000 \text{ L}/\text{min}$. Esses valores foram então usados para uma pesquisa de válvulas com a capacidade de fluxo de ar requerida.

4.1.3.1 Modulação de fluxo de ar com válvulas

Válvulas normalmente são dimensionadas pelo seu coeficiente de fluxo C_v . O coeficiente de fluxo é definido por uma fórmula usada para determinar o fluxo de uma válvula em diferentes condições, e para selecionar a válvula correta para uma determinada aplicação. O C_v foi criado para ser usado com fluxos de líquidos, e expressa o fluxo em galões por minuto de água a 60°F que passariam por uma válvula com uma queda de pressão por ela de 1 psi (NESBITT, 2007).

Porém, o C_v também pode ser usado para determinar o fluxo de gases (incluindo ar comprimido) por uma válvula. A fórmula se torna um pouco mais

complexa para gases, devido sua compressibilidade, significando que também são afetados pela temperatura. Para estimar corretamente o fluxo, duas fórmulas podem ser usadas. A primeira torna-se necessária quando a pressão de entrada é igual ou duas vezes maior do que a pressão de saída, também conhecido como “*choked flow*” ou fluxo crítico. A segunda é usada quando a pressão de entrada é menor do que duas vezes a pressão de saída, conhecido como fluxo subcrítico (NESBITT, 2007).

No caso da modulação de fluxo de ar, ao liberar o ar na atmosfera, obtém-se um fluxo crítico, e a fórmula a ser usada para a determinação do coeficiente de fluxo é apresentada na Equação 14.

$$C_V = \frac{Q_G \sqrt{SG \cdot T}}{816 P_1} \quad (14)$$

onde Q_G é o fluxo de gás em SCFH (*Standard cubic feet per hour*), SG a gravidade específica do gás, T a temperatura absoluta em °R (°F + 460), e P_1 a pressão de entrada em psia (psig + 14,7).

Com a aplicação da Equação 14, é possível determinar qual válvula seria adequada para a modulação de fluxo de ar. Para isso, é necessário saber o fluxo de ar através da válvula na unidade de SCFH e a pressão de entrada, usando condições normais de trabalho. Nessas condições, os valores seriam: $SG = 1$, para o ar a 70 °F, $P_1 = 14,7$ psi e $T = 70 + 460 = 530$ °R. Além disso, o fluxo de ar necessário para produzir 100dB a 5m da fonte sonora foi determinada em 114000 l/min, correspondente a 53808 SCFH. Aplicado estes valores na Equação 14, obtém-se o resultado do coeficiente de fluxo em função da pressão de entrada P_1 :

$$C_V = \frac{1518,08}{P_1} \quad (15)$$

Conhecendo-se o coeficiente de fluxo da válvula necessária para a modulação do fluxo de ar, foram então estudados dois tipos de válvulas que poderiam ser usados na aplicação desejada: válvula solenoide e válvula de escape rápido.

As válvulas solenoides são pequenas válvulas de isolamento, que são operadas magneticamente (NESBITT, 2007). Elas podem ser tanto normalmente fechadas (NF ou NC) como normalmente abertas (NA ou NO), e permitem a abertura ou o fechamento do fluxo de ar. Seu princípio de operação é simples: quando a solenoide é energizada, o núcleo da válvula abre o orifício de uma válvula NF, ou fecha o orifício no caso de uma válvula NA.

Existem diversos tipos de válvulas solenoide presentes no mercado. Um exemplo é o modelo 0330, produzido pela Burckert, conforme a Figura 77, que possui

uma faixa de trabalho de zero até 16 bar. Esse valor seria equivalente a 232,06 psi, e, substituindo-se este valor na Equação 15, seria obtido um coeficiente de fluxo igual a 6,54. Isso significa que, com uma pressão de 16 bar, por exemplo, a válvula deveria ter um coeficiente de fluxo de 6,54 para a modulação do fluxo de ar. Porém, a válvula 0330 da Burckert possui um Cv menor do que 0,3, tornando-se impossível a sua aplicação. Outro problema desse tipo de válvula é o seu tempo de abertura. Os 8 a 15 ms que esta leva para abrir poderia ter uma forte influência na modulação do fluxo de ar.



Figura 77 – Válvula Solenoide modelo 0330 da Burckert

Fonte: BURCKERT (2016).

A válvula de escape rápido já não teria esse problema do tempo de abertura. Ela é uma válvula que possui 3 orifícios, um para a entrada, outro para a saída e outro para o escape, conforme pode ser visualizado na Figura 78. O fluxo de ar a uma alta pressão passa do orifício de entrada (nº 1) para o orifício de saída (nº 2). Quando a pressão na entrada decai, o mecanismo interno da válvula faz com que todo o ar do orifício de saída (nº 2) se direcione para o orifício de escape (nº 3), acontecendo a exaustão do ar diretamente para a atmosfera. Assim, a válvula de escape rápido foi desenhada para fazer uma rápida exaustão do ar, assim que aconteça uma queda de pressão na entrada da válvula (PARR, 1999).

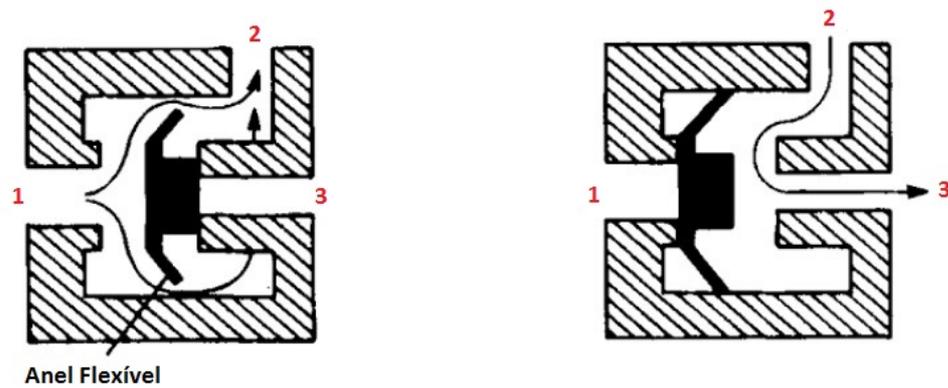


Figura 78 – Funcionamento da Válvula de Escape Rápido

Fonte: PARR (1999).

Um exemplo de válvula de escape rápido seria o modelo SEU-1/2 da Festo, que pode ser observada na Figura 79. O maior orifício presente nesse modelo de válvula possui 15 mm o que resultaria em um fluxo de ar nominal de aproximadamente 4000 L/min. Este valor é muito mais baixo do que os 114000 L/min calculados, se tornando o grande problema desse tipo de válvula.

Assim como a válvula solenoide, a válvula de escape rápido também possui um Cv muito baixo, o que resultaria em um fluxo de ar muito baixo, tornando a sua aplicação na geração de infrassom algo impraticável.



Figura 79 – Válvula de Escape Rápido modelo SEU-1/2 da Festo

Fonte: FESTO (2016).

Existem também muitos outros tipos de válvulas disponíveis além dos dois tipos já estudados, porém, da mesma maneira, os problemas para a modulação de fluxo de ar continuariam sendo um baixo coeficiente de fluxo, o tempo de abertura, e muitos outros casos, o preço da válvula.

Outro problema inerente a válvulas de sistemas pneumáticos, que seria gerado como consequência de um fluxo de ar à alta pressão, é o elevado nível de

ruído. Mesmo com um coeficiente de fluxo grande o suficiente para suportar o fluxo de ar desejado, a construção das válvulas com muitos cantos, além de outros aspectos construtivos, causaria ruídos muito elevados com o fluxo de ar, tornando as mesmas inviáveis para serem aplicadas na geração de infrassom.

4.1.3.2 Modulação de fluxo de ar com outros mecanismos

Ao invés de se utilizar válvulas já existentes no mercado para a modulação de fluxo de ar necessária para a geração de infrassom, outro mecanismo poderia ser desenvolvido, que possuísse um tempo de abertura e fechamento muito rápido, e tendo um orifício grande o suficiente para o fluxo de ar necessário. Com essas considerações, poderia-se utilizar a equação do fluxo de ar através de um orifício para determinar a quantidade de ar liberada por esse mecanismo, dada pela Equação 16 abaixo:

$$Q = 4,17C \left(\frac{d_0}{4,654} \right)^2 p_1 \left(1 - \frac{p_1 - p_2}{3F_\gamma x_T} \right) \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{T_a + 273,15}} \quad (16)$$

na qual C é o coeficiente de descarga, d_0 o diâmetro do orifício (em mm), p_1 a pressão primária (em kPa abs), p_2 a pressão secundária (em kPa abs), T_a a temperatura do ar (em °C), F_γ o fator de calor específico (1,401 para o ar) e x_T o fator de razão diferencial de pressão (igual à 0,72) (OWER; PANKHURST, 2014). Para obter um fluxo de ar Q de 114 m³/min, com p_2 igual a 1atm e $T_a = 20^\circ\text{C}$, uma possível combinação de valores necessários seria de: $p_1 = 4$ atm, orifício de 7 cm de diâmetro, e a $C=0,5$.

Esses valores encontrados mostram que mesmo para pressões não muito altas e orifícios não tão grandes, o fluxo de ar necessário para realizar a modulação, e, por consequência gerar o infrassom, é obtido. Para obter maiores detalhes desse princípio de transdutor, e a sua real aplicação na geração de infrassom, um protótipo foi construído e testes foram feitos com o mesmo, conforme será explicado na seção 4.2.

4.1.4 Outros Princípios de Transdutores

Além dos diferentes princípios de transdutores já citados, existem também muitos outros que poderiam ser usados para a geração de infrassom. Um exemplo seria o princípio de tubo de órgão. Teoricamente, se um tubo fosse construído no

tamanho adequado para se conseguir afinar o mesmo em frequências na área do infrassom, ele poderia gerar essas frequências. O problema é que o tamanho desse tubo de órgão teria que ser muito grande, tornando a sua aplicação na geração de infrassom não muito prática. Um exemplo de uma construção de um tubo desses pode ser observado na Figura 80.



Figura 80 – Tubo de órgão utilizado na geração de infrassom

Fonte: GUPFINGER, R (2009)

Além do tubo de órgão, também já foram construídos outros protótipos de princípios de transdutores alternativos, como em um estudo realizado em 1999 (OBIER, 1999). Nesse estudo, foi testado um princípio de língua vibrante, assim como o princípio de um cilindro ranhurado. Porém, foi demonstrado que para a geração de elevados níveis de infrassom, esses princípios também não são eficazes.

Algumas outras hipóteses ainda poderiam ser testadas para a geração de infrassom, como, por exemplo, um princípio de excitação acústico-químico, ou uma expansão de ar por explosão (como em um *airbag*), entre outras alternativas. Porém, pela questão de tempo disponível para isso, decidiu-se pela construção de um protótipo de transdutor com o princípio de modulação de ar, apresentado na próxima seção.

4.2 CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO COM O PRINCÍPIO DE EXCITAÇÃO DE MODULAÇÃO DE FLUXO DE AR

Através de um estudo realizado na seção 4.1 para analisar diferentes princípios de transdutores e sua aplicação na geração de infrassom, verificou-se que uma alternativa interessante seria a aplicação da modulação de fluxo de ar como princípio de excitação de um transdutor. Para melhor entender este princípio, construiu-se um protótipo de um transdutor com o princípio de excitação de modulação de fluxo de ar.

4.2.1 Construção

Para a construção do protótipo, foi utilizado um vaso de pressão com um volume de 40 L e com uma pressão máxima suportada de 15 bar. O vaso de pressão tinha uma abertura de 6 cm de diâmetro na sua parte superior, que foi utilizada para a modulação de fluxo de ar. Para a realização de testes, foi necessária a construção de uma membrana de ruptura nessa abertura com o fim de realizar a modulação.

Para isso, um furo de 6 cm de diâmetro foi feito em duas placas de MDF de 15 mm de espessura, que foram posicionadas na parte superior do vaso de pressão, acima da abertura, servindo de suporte para a membrana. Entre as duas placas uma película foi colocada na posição do furo, fazendo com que ele atuasse como uma membrana de ruptura. Foram realizados testes com a película, e foi verificado que ela possuía a característica de romper com uma pressão de aproximadamente 1 bar.

As placas de MDF foram então fixas ao vaso de pressão usando quatro grampos sargento. A dificuldade encontrada na construção do protótipo foi a vedação da conexão entre as placas de MDF e o vaso de pressão. Para solucionar esse problema, foi utilizado um anel de borracha.

Para a elevação da pressão no interior do vaso de pressão foi instalada uma válvula Schrader em uma das aberturas, e uma bomba de ar manual foi utilizada para encher o vaso de pressão. Além disso, um manômetro foi instalado outra abertura do vaso, a fim do controle da pressão no interior do mesmo. Todas as outras aberturas foram então fechadas.

Na Figura 81 pode-se visualizar um diagrama construção do protótipo. Na Figura 82 é possível observar o vaso de pressão e a fixação das placas de MDF na

sua parte superior. A válvula Schrader utilizada para conectar a bomba de ar a fim de elevar a pressão no interior do vaso também pode ser visualizada. Já na Figura 83 pode-se verificar a presença do manômetro na abertura lateral do vaso, assim como a bomba de ar utilizada para encher o vaso.

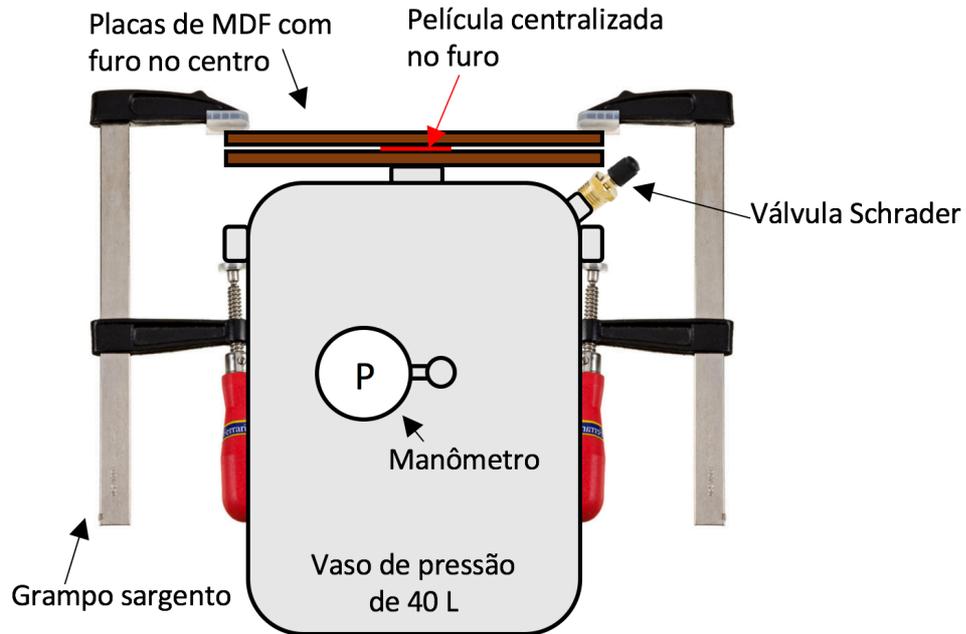


Figura 81 – Diagrama da construção do protótipo de transdutor para geração de infrassom

Fonte: Autoria Própria



Figura 82 – Construção do protótipo de transdutor para geração de infrassom

Fonte: Autoria Própria



Figura 83 – Vista lateral da construção do protótipo

Fonte: Autoria Própria

4.2.2 Ensaios e Resultados

Utilizando-se de um vaso de pressão de apenas 40 L, torna-se evidente que os cálculos realizados na seção 4.1 não são válidos, já que foi determinado que para se obter 100dB de nível de pressão sonora a 5 metros da fonte sonora, na frequência de 1Hz, seria necessário um volume de 1900 L. Portanto, substituiu-se a Equação 13 na Equação 10, obtendo-se a potência sonora em função do volume de ar, que pode ser visualizada na Equação 17.

$$P = \frac{8\pi^3 \rho_0 f^4 V^2}{c_0} \quad (17)$$

na qual V é o volume de ar.

Substituiu-se o valor de 40 L na Equação 17, obtendo-se uma potência sonora de 0,0014 W (para uma frequência de 1 Hz). Substituindo esse valor nas Equações 11 e 12, obteve-se um nível de pressão sonora de 86,49 dB a uma distância de 0,5 m da fonte sonora. Conforme demonstrado na seção 3.5, como o nível de aceleração apresenta um valor de 10 dB inferior ao nível de pressão sonora, o nível de aceleração para esse caso seria igual a 76,49 dB, valor utilizado como referência para os ensaios.

Além disso, aplicou-se também a Equação 16 a fim de verificar se o fluxo de ar através do orifício de 6 cm do vaso de pressão era o suficiente para liberar o ar do seu interior em menos de um segundo. Utilizando-se uma temperatura de 20 °C, a pressão no interior do vaso de 1 bar (pressão de ruptura da película) e no exterior de 0,010283 bar (pressão atmosférica em Dresden, Alemanha), encontrou-se uma vazão de 0,3167

m³/s. Dessa maneira, os 40 L (ou 0,04 m³) de ar poderiam facilmente ser liberados na atmosfera em um tempo inferior a 1 s.

Para verificar esses valores calculados na prática, ou seja, obter um nível de pressão sonora de 86,49 dB e um nível de aceleração de 76,49 dB na frequência de 1 Hz a uma distância de 0,5 m do protótipo, um ensaio foi realizado na câmara anecoica presente na Universidade Tecnológica de Dresden, com praticamente a mesma configuração dos ensaios da seção 3.4. Porém, a grande diferença foi na fonte sonora, que não era mais um alto-falante, mas sim, o protótipo construído.

Além disso, o microfone não foi posicionado ao lado da pessoa de teste, mas posicionado atrás da pessoa a uma distância de 4,7 m da fonte sonora, devido aos elevados níveis de pressão sonora gerados pelo protótipo, que poderiam danificar o equipamento. Em função desse deslocamento do microfone, foi necessária a realização de um pré-processamento no Software Artemis usado na aquisição, de maneira a compensar essa distância na medição do microfone.

Como a pressão sonora é inversamente proporcional à distância, isso significa que a relação entre a pressão sonora entre dois pontos à distâncias diferentes da fonte sonora é dada por:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{r_1}{r_2} \quad (18)$$

na qual P_1 e r_1 são a pressão sonora e a distância num primeiro ponto, e P_2 e r_2 a pressão sonora e a distância num segundo ponto (KOELTZSCH, 2009).

Dessa maneira, a razão entre a pressão sonora do ponto de medição do microfone (ponto situado a 4,7 m da fonte sonora) e a pressão sonora no ponto de localização da pessoa de teste (situada a 0,7 m da fonte sonora) foi calculada. Substituindo-se 0,7 em r_1 e 4,7 em r_2 na Equação 18, e isolando-se P_1 (pressão sonora na posição da pessoa de teste), encontrou-se que a razão entre os dois pontos é de 6,71.

Isso significa que a medição do microfone teria um valor aproximadamente 16,53 dB menor do que no ponto de localização da pessoa de teste. Para se compensar essa diferença na leitura do microfone, o valor de pressão sonora recebido do sinal do microfone foi multiplicado por 6,71. Com isso, os valores resultantes desse pré-processamento corresponderam aos números que seriam obtidos caso o microfone estivesse posicionado diretamente ao lado da pessoa de teste (igualando-se P_1 e P_2). A montagem e a configuração final do ensaio pode ser vista na Figura 84.

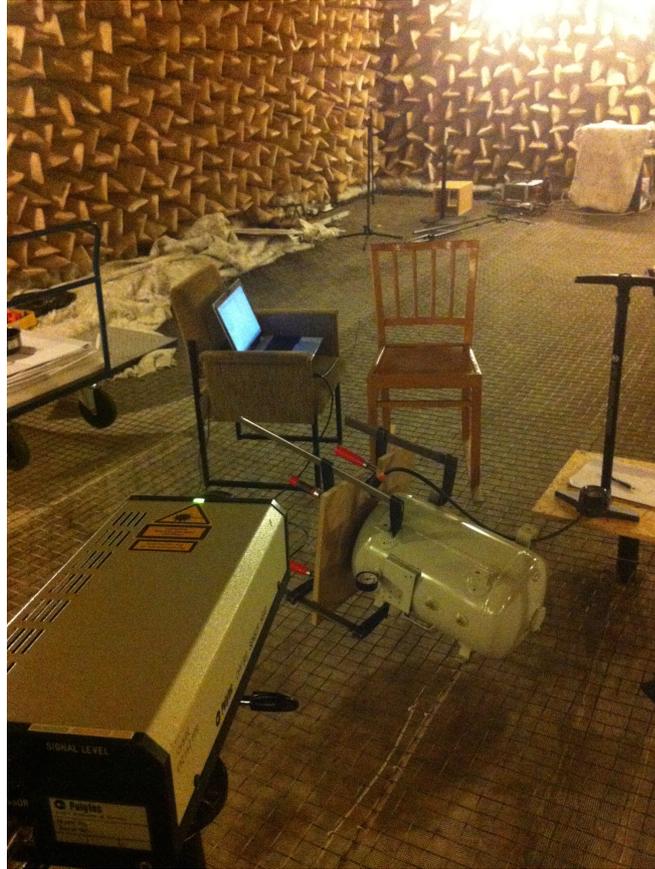


Figura 84 – Montagem e configuração do ensaio com o protótipo de transdutor.

Fonte: Autoria Própria

O ensaio foi então realizado da mesma forma que os ensaios da seção 3.4, porém com a diferença da fonte sonora ser o protótipo de transdutor. Dessa forma, uma pessoa de teste ficou sentada na cadeira, posicionada a uma distância de 0,5 m do protótipo, e com o vibrômetro Laser-Doppler apontado para a posição direita do peito. Outra pessoa, posicionada ao lado do protótipo, ficou responsável por elevar a pressão no interior do vaso de pressão, através da bomba de ar. Esse enchimento foi executado até o momento em que a película se rompeu (na pressão de aproximadamente 1 bar), resultando em uma descarga muito rápida do ar no interior do vaso para a atmosfera.

A pressão sonora e a aceleração do corpo da pessoa de teste resultantes dessa descarga foram adquiridos pelo *software* Artemis. Após uma análise de Fourier e o cálculo do nível de pressão sonora e do nível de aceleração do corpo, obtiveram-se as curvas presentes na Figura 85.

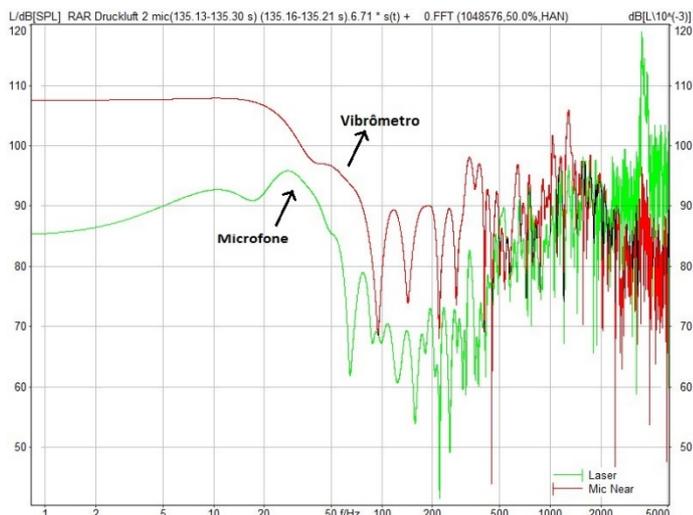


Figura 85 – Nível de pressão sonora e nível de aceleração resultantes da descarga de ar do protótipo de transdutor
Fonte: Autorial Própria

Através dos resultados obtidos na Figura 85, pode-se verificar que o protótipo não produziu um som a uma frequência de apenas 1 Hz, mas que foi produzido um impulso com um elevado nível de pressão sonora e de aceleração ao longo de toda banda de frequências. Também é interessante notar o comportamento de ambas as curvas em frequências abaixo de 20 Hz, que mesmo com uma análise de Fourier sem suavização, apresentam um valor aproximadamente constante, sem muitas variações.

Após uma verificação nas especificações do microfone utilizado para a medição da pressão sonora (Brüel&Kjaer, modelo 4188-A-021), foi notado que a resposta na frequência do microfone tinha um limite mínimo de 20 Hz. Dessa maneira, os dados medidos abaixo dessa frequência não poderiam ser utilizados, o que explica a curva constante abaixo de 20 Hz na Figura 85. Além disso, foi verificado que o equipamento utilizado para a aquisição da aceleração (Octobox da Head Acoustics) também possuía um limite mínimo na sua resposta de frequência, igual a 4 Hz. Assim, valores de aceleração nas frequências inferiores a 4 Hz não foram considerados.

Com as limitações dos equipamentos utilizados na medição, uma análise de dados diferente foi realizada, a fim de se verificar os resultados. A análise foi feita utilizando-se o nível de pressão sonora e de aceleração em função do tempo, e não em função da frequência. A Figura 86 mostra as curvas resultantes dessa análise, em que é possível observar um atraso entre o impulso medido pelo vibrômetro Laser-Doppler e pelo microfone.

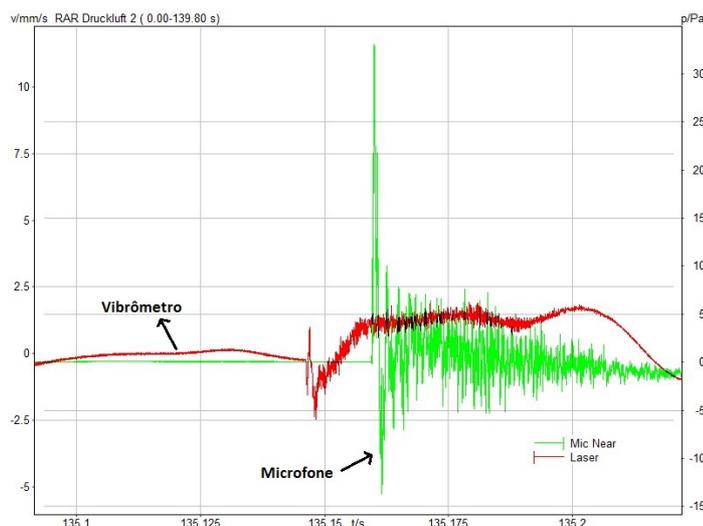


Figura 86 – Sinal do vibrômetro e do microfone em função do tempo

Fonte: Autoria Própria

Esse atraso é observado pelo fato do microfone estar posicionado a uma distância de 4,7 m da pessoa de teste. O som do impulso levaria um tempo de 14 ms a mais para chegar no microfone do que na pessoa de teste, devido a essa distância. Aproximadamente esse atraso que é verificado na Figura 86.

Devido ao microfone disponível para a realização dos ensaios ter sua utilização válida somente nas frequências mais elevadas do impulso gerado, outra análise foi feita somente com os valores de aceleração medidos. Foi determinada a curva do nível de aceleração RMS (calculado através da Equação 4) em função do tempo, conforme mostra a Figura 87.

Observando a Figura 87, pode-se verificar um nível de aceleração mais elevado no tempo de aproximadamente 3,53 ms. Esse momento coincide com o impulso medido pelo vibrômetro Laser-Doppler, conforme verificado na Figura 86. O elevado nível de aceleração obtido de 140 dB é impressionante, porém é plausível, levando-se em conta que no cálculo da aceleração RMS, é levada em conta a contribuição da aceleração em todas as frequências.

Para melhor interpretar este valor do nível de aceleração nesse momento de 3,53 ms, foram implementados alguns filtros passa-baixa no pós-processamento do *software* Artemis, possibilitando uma melhor verificação da contribuição de cada frequência nesse valor de 140 dB. O primeiro filtro passa-baixa implementado foi configurado para uma frequência máxima de 200 Hz, sendo possível, assim, verificar

qual a contribuição das frequências abaixo de 200 Hz no nível de aceleração RMS de 140 dB. A curva resultante após a aplicação desse filtro pode ser visualizada na Figura 88, com o eixo das abcissas indicando o tempo milissegundos, e o eixo das ordenadas o nível de aceleração RMS em dB.

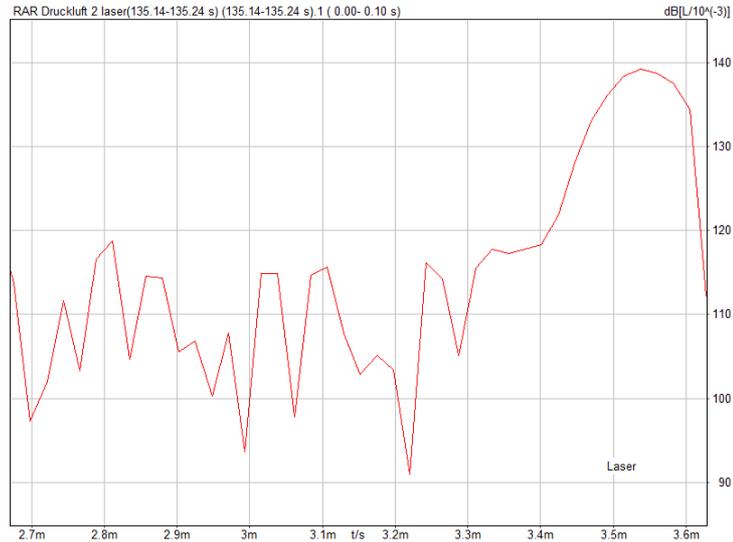


Figura 87 – Nível de aceleração RMS em função do tempo
Fonte: Autoria Própria



Figura 88 – Nível de aceleração RMS em função do tempo com um filtro passa-baixa de 200 Hz
Fonte: Autoria Própria

A curva da Figura 88 mostra que os níveis de aceleração foram consideravelmente reduzidos. No tempo de 3,53 ms (momento do impulso), por exemplo, o nível de aceleração foi reduzido para 96 dB. Após isso, reduziu-se ainda

mais a frequência de corte do filtro passa-baixa para um valor de 50 Hz, resultando-se em níveis de aceleração ainda menores, conforme a Figura 89.

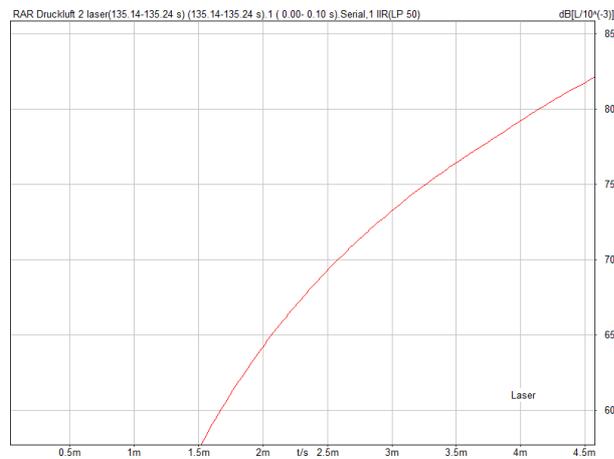


Figura 89 – Nível de aceleração RMS em função do tempo com um filtro passa-baixa de 50 Hz

Fonte: Autoria Própria

Pode-se verificar que no momento do impulso (3,53 ms), o nível de aceleração resultante de frequências apenas abaixo de 50 Hz foi reduzido para apenas 76 dB. Ou seja, as frequências muito baixas, incluindo as frequências na área do infrassom, estariam contribuindo para o nível de aceleração em apenas 76 dB dos 140 dB no momento do impulso.

Ao comparar esse valor do nível de aceleração de 76 dB obtido como o valor teórico do nível de aceleração calculado anteriormente de 76,49 dB (utilizando-se a Equação 17), verifica-se que os valores são condizentes. Porém, existe uma diferença importante entre o valor encontrado no ensaio e o valor calculado: o valor obtido na prática não é resultante de uma frequência de apenas 1 Hz conforme calculado, e sim de uma soma de todas as frequências abaixo de 50 Hz.

Assim, para melhorias futuras no protótipo de geração de infrassom através do princípio de excitação de modulação de fluxo de ar, novos cálculos devem ser realizados levando-se em conta não só a frequência de 1 Hz, mas também de outras frequências que podem vir a influenciar nos resultados.

5 CONCLUSÕES

A geração de infrassom poderia trazer diversas vantagens para a experiência musical, seja em grandes concertos, shows, assim como em cinemas ou até em residências, devido à forte influência da vibração na percepção de qualidade musical. Além disso, não seria necessário o aumento do volume a níveis muito elevados para proporcionar a sensação de vibração, já que o infrassom não pode ser ouvido, apenas sentido.

Existe uma quantidade muito pequena de estudos realizados nessa área, especialmente sobre quais níveis de pressão sonora de infrassom realmente são necessários para produzir uma sensação de vibração. Com este projeto, a relação entre o nível de pressão sonora de uma fonte sonora e o nível de aceleração resultante no corpo de uma pessoa foi determinada. Foi demonstrado que essa relação tem uma pequena variação, dependendo da região do corpo em que a aceleração é medida. Por exemplo, a parte superior do peito tem uma vibração maior do que o pulso. Porém, na maioria das posições do corpo medidas, os resultados mostraram que o nível de aceleração gerada por uma fonte sonora possui um valor de 10 dB menor que o nível de pressão sonora.

Através desse projeto também foi demonstrado que existem diversas limitações na geração de infrassom. Primeiramente, a potência sonora nessas frequências necessárias para produzir uma sensação de vibração precisa ser muito mais elevada do que os princípios de transdutores já existentes no mercado conseguem gerar. Mesmo os maiores *subwoofers* ou transdutores com princípios de excitação alternativos, como o *Servo Drive*, não possuem essa capacidade.

Além disso, para a utilização de outros princípios de transdutores, como o *Rotary Woofer* ou o tubo de órgão, se necessitaria uma dimensão muito elevada para a sua construção, inviabilizando seu uso nas mais diversas aplicações. O preço de sistemas desse tipo, assim como outros fatores, também torna o seu uso ainda menos provável.

Dessa maneira, alguns novos tipos de princípios de transdutores para a geração de infrassom foram estudados. O princípio de modulação de fluxo de ar foi o que apresentou os melhores resultados nos cálculos, sendo teoricamente possível produzir uma potência sonora suficiente para gerar uma sensação de vibração em uma pessoa. Porém, pela construção de um protótipo de transdutor, as medições

mostraram que a geração de infrassom por esse princípio de transdutor também não é tão simples. Ao invés de gerar um som de 1 Hz, é gerado um impulso com muita energia em uma banda de frequências muito ampla, sendo que o nível de aceleração gerado pelas frequências abaixo de 50 Hz é de apenas 76 dB.

Assim, ainda existem diversas possibilidades de continuar a otimização do princípio de excitação de modulação de fluxo de ar. Primeiramente os cálculos devem ser feitos levando-se em conta que o som gerado não consiste apenas de uma frequência de 1 Hz, que é o objetivo final, mas sim de uma ampla gama de frequências. Torna-se possível, assim, prever corretamente na teoria os resultados esperados na prática.

Além disso, a grande melhoria a ser desenvolvida é: mais energia em frequências na área do infrassom, e menos energia nas frequências mais elevadas. Utilizando-se de um vaso de pressão maior, por exemplo, um fluxo maior de ar seria modulado, gerando níveis de aceleração mais elevados. Outra alternativa seria aumentar a pressão no interior do vaso de pressão, fazendo com que o ar fosse liberado em um intervalo de tempo menor, aumentando o nível de aceleração gerado pelo impulso. Essa elevação da pressão poderia ser feita através de um compressor de ar comprimido, e não de uma bomba manual, mantendo-se, assim, constante a pressão no interior do vaso de pressão.

Aumentar o tamanho do orifício do vaso de pressão também poderia influenciar positivamente o intervalo de tempo de liberação do ar. Porém, através dessa ação, não só as frequências mais graves seriam geradas à níveis mais elevados, mas também as frequências mais elevadas. Para resolver esse problema, poderia ser implementado o uso de um silenciador ou um atenuador de frequências mais agudas. A utilização de silenciadores já é comum em válvulas de escape rápido da pneumática, por exemplo, assim como em armas de fogo, e poderia trazer bons resultados também para o princípio de transdutor estudado.

Outro ponto importante a ser desenvolvido é o componente responsável pela modulação do fluxo de ar do transdutor. Um disco de abertura e fechamento extremamente rápido, uma válvula ou outro mecanismo poderia ser desenvolvido, reduzindo assim o ruído das frequências agudas indesejadas. Para um vaso de pressão de 40 L, outra ideia seria refazer os cálculos de modulação de fluxo de ar com válvulas (seção 4.1.3.1). Foi demonstrado que para um volume de 1900 L as válvulas

estudadas não seriam adequadas, porém para um volume menor essa opção poderia ser considerada novamente.

Outra sugestão que poderia trazer bons resultados seria a implementação de um ressonador de Helmholtz. Em conjunto com o vaso de pressão, poderia se adicionar um tubo no orifício de saída do tubo, resultando-se assim num ressonador de Helmholtz, que poderia ser configurado para produzir apenas sons em frequências muito baixas (MÖSER, 2009). Essa implementação concentraria toda energia do impulso gerado pelo transdutor nas frequências configuradas pelo ressonador, diminuindo os níveis de pressão sonora nas frequências mais agudas, por exemplo.

Alguns ensaios similares já foram realizados em um estudo anterior (BEDARD JR; GEORGES, 2000, p. 5). Nesse estudo, resultados impressionantes foram encontrados: utilizando-se de um vaso de pressão de 300 L e um tubo de 1m conectado na sua saída, o ressonador de Helmholtz produziu uma onda sonora capaz de ser reconhecida a mais de 1 km de distancia da fonte sonora. Portanto, em dimensões menores, também se poderia encontrar resultados consistentes com um ressonador de Helmholtz.

Outra melhoria que poderia ser feita em ensaios futuros seria a utilização de equipamentos de medição específicos para a medição de infrassom. O microfone utilizado nesse projeto tinha um limite inferior de medição de 20 Hz, e o equipamento de gravação de dados (Octobox) de 4 Hz. Otimizando-se tais equipamentos, resultados mais consistentes e confiáveis poderiam ser obtidos.

Portanto, o futuro da geração de elevados níveis de infrassom é promissor. Um princípio de transdutor que poderia trazer resultados consistentes seria o princípio da modulação de fluxo de ar, onde o tamanho e o custo em relação a princípios de transdutores comuns são grandes vantagens. Diversas otimizações ainda podem ser realizadas, como a atenuação das frequências agudas geradas pelo transdutor, porém a sensação de vibração necessária para melhorar a experiência musical certamente pode ser produzida.

REFERÊNCIAS

AHONEN H.; DEEK P.; KROEKER J. Low Frequency Sound Treatment Promoting Physical and Emotional Relaxation Qualitative Study. **International Journal of Psychosocial Rehabilitation**. London, v. 17, n. 1, p. 45-58, jan. 2012.

BEDARD JR, A. J.; GEORGES, T. M. Atmospheric Infrasound. **Physics Today**. Melville, v. 53, n. 3, p. 32-37, mar. 2000.

BLACKSTOCK, D. T. **Fundamentals of Physical Acoustics**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2000.

BRONER, N. The Effects of Low Frequency Noise on People – A Review. **Journal of Sound and Vibration**. London, v. 54, n. 4, p. 483-500, nov. 1977.

BRYAN, M.E.; TEMPEST, W. Does Infrasound Make Drivers Drunk?. **New Scientist**. Londres, v. 53, p. 584-586, mar. 1972.

BÜRCKERT. 2/2 or 3/2-way Solenoid Valve, with pivoted armature and isolating diaphragm. Bürkert Fluid Control Systems, Ingelfingen, 2016. Disponível em: <<https://www.burkert.com/en/Media/plm/DTS/DS/DS0330-Analytical-US-EN.pdf?id=DTS00000000000000001000082396ENA>> Acesso em: 17 nov. 2016.

CAVALEIRO, M. Neli. **FQ 8-Sustentabilidade na Terra**. Lisboa: Edições Asa, 2006.

CONLEY, K. Episode 58: Shattering Subwoofers and Rough Road Driving, New York, 2016. Disponível em: <http://kwc.org/mythbusters/2006/08/episode_58_shattering_subwoofe.html>. Acesso em: 25 mai. 2017.

DALMONTE, J. **Caracterização Acústica de Salas Através da Medição da Resposta Impulsiva**. 2013. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

DIETRICH, Dieter. Neue Waffe: Infraschall? Zeit Online, Hamburg, 2 fev. 1968. Disponível em: <<http://www.zeit.de/1968/05/neue-waffe-infraschall/komplettansicht?print=true>>. Acesso em: 17 fev. 2016.

EVERS, Láslo G.; HAAK, Hein W. **Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009.

FESTO. **Quick exhaust valves SE/SEU**. Mississauga: Festo, 2016. 3p.

FOTH, H. et al. Measuring the motions in the human middle ear by Laser Doppler Vibrometry. **Optics and Lasers in Engineering**. Elsevier, v. 25, n. 4-5, p. 289-301, 1996.

FRANKS, D. **Entertainment Awards: A Music, Cinema, Theatre and Broadcasting Guide**. 3. ed. Jefferson: McFarland, 2004.

GUPFINGER, R. et al. INTERACTIVE INFRASONIC ENVIRONMENT: A New Type of Sound Installation for Controlling Infrasound. **Sound and Music Computing Conference**, Porto, 2009. Disponível em: <http://qxex0.w4yserver.at/wp-content/uploads/IIE_reinhard_gupfinger09.doc.pdf>. Acesso em 27 dez. 2016.

HARRIS C. S.; SOMMER H. C.; JHONSON D. L. The effects of infrasound on man: is there a demon in our midst? **Aerospace Medical Research Laboratory**. Ohio, 1974

HAUERSLEY, T. In Sensurround. **in70mm**, Copenhagen, mai. 2011. Disponível em: <http://www.in70mm.com/news/2011/in_sensurround/english/index.htm>. Acesso em 23 fev. 2016.

HAUSDORF, F. **Handbuch der Lautsprechertechnik**. 8. ed. Haan: Visaton, 2013.

HAWKINS JR., J. E.; STEVENS S. S. The Masking of Pure Tones and of Speech by White Noise. **Acoustical Society of America**. Melville, v.22, n.6, 1950.

ITWISSEN. Bändchenlautsprecher. DATACOM, Dietersburg, 2005. Disponível em: <<http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Baendchen-Lautsprecher-ribbon-loudspeaker.html>> Acesso em: 21 fev. 2016.

KOELTZSCH, P. **Akustik Vorlesung Skript**. 5. ed. Dresden: Technische Universität Dresden, 2009.

KUO, H. **White Noise Distribution Theory**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 1996.

LEVENTHALL, G. A review of published research on low frequency noise and its effects. **UK Department for Environment, Food and Rural Affairs**. Ashtead, mai. 2003

LEVENTHALL, G. Infrasound from wind turbines - Fact, fiction or deception. **Journal of the Canadian Acoustical Association**. Ashtead, v.34, n.2, p. 29-36, 2006.

MARTIN LOGAN. **ESL 101: Electrostatic Theory**. Lawrence, 2005.

MATHURANATHAN, V. Simulation and Analysis of White Noise in Matlab. Gaussianwaves, New York, 2013. Disponível em: <<http://www.gaussianwaves.com/2013/11/simulation-and-analysis-of-white-noise-in-matlab/>>. Acesso em: 25 fev. 2016.

MEAD FLUID DYNAMICS. Pneumatic Application and Reference Handbook. Bimba Manufacturing Company, Monee, 2012. Disponível em: <http://mead-usa.com/reference/media/pneumatic_handbook.pdf> Acesso em: 17 fev. 2016.

MERCHEL, Sebastian. **Auditory-Tactile Music**. Aachen: Shaker Verlag, 2014.

MORIOKA, M.; GRIFFIN, M. J. Absolute thresholds for the perception of fore-and-aft, lateral, and vertical vibration at the hand, the seat, and the foot. **Journal of Sound and Vibration**. Southampton, v. 314, p. 357–370, 2008.

MÖSER, M. **Messtechnik der Akustik**. Berlin: Springer, 2009.

MÖSER, M. **Technische Akustik**. Berlin: Springer, 2009.

NESBITT, B. (2007). **Handbook of Valves and Actuators**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007.

NOVACON. O Alto Falante. Novacon Vertex, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://www.novacon.com.br/audioafca.htm>>. Acesso em: 21 fev. 2016.

NOVOTNEY, A. Music as medicine. American **Psychological Association**, Washington, DC, v. 44, n.10, nov. 2013. Disponível em: <<http://www.apa.org/monitor/2013/11/music.aspx>>. Acesso em: 22 fev. 2016.

OBIER, T. **Leistungsgrenzen elektrodynamischer Schallquellen bei tiefen Frequenzen, dargestellt am Beispiel eines neuartigen Gleitlagerlautsprechers**. Dresden: Technische Universität Dresden, 1999.

OLSON, Harry Ferdinand. **Acoustical Engineering**. Princeton, N.J: Van Nostrand, 1957.

OWER, E.; PANKHURST, C. **The Measurement of Air Flow**. Oxford: Pergamon Press, 2014.

PARK, J.; GARCES, M. Portable Infrasound Generator Insonifies IMS Array I59US. University of Hawaii, Manoa, 2008. Disponível em: <http://www.rotarywoofer.com/KING_IS59_Summary.pdf> Acesso em: 15 nov. 2016.

PARR, A. **Hydraulics and Pneumatics**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999.

PAYNE, K. **Silent Thunder**. New York: Simon & Schuster, 1988.

SCHOENHERR, Steven E. Loudspeaker History. Audio Engineering Society, New York, 2011. Disponível em: <<http://www.aes.org/aeshc/docs/recording.technology.history/loudspeaker.html>>. Acesso em: 14 set. 2015.

SERVODRIVE, INC. **ContraBass Service Manual**. Glenview: Servodrive, 1998. 14 p.

SILVA, H. S. **Análise e Síntese de Alto Falantes & Caixas Acústicas Pelo Método de Thiele-Small**. 1. ed. Rio de Janeiro: H.Sheldon, 1996.

STEPHENS, R.W.B. Infrasonics. **Ultrasonics**. London, p. 30-35, jan. 1969.

STEPHENS, R.W.B. Summary of round table meeting on Wednesday, 26 September 193. **Proceedings of the Colloquium on Infrasound**. Paris: Centre National de la Recherche Scientifique, 1973.

TALBOT-SMITH, Michael. **Audio Engineer's Reference Book**. Oxford: CRC Press, 2013.

TAKAHASHI, Y. A study on the contribution of body vibrations to the vibratory sensation induced by high-level, complex low-frequency noise. **Noise & Health**. Kawasaki, v. 13, n. 50, p.2-8, 2011.

TAKAHASHI, Y. Vibratory Sensation Induced by Low-Frequency Noise: A Pilot Study on the Threshold Level. **Journal of low frequency noise, vibration and active control**. Kawasaki, v. 28, n.4, p. 245–253, 2009.

TIBU, F. Are Helicopters the Best Subwoofers? Eminent Technology TRW-17 Says YES!. Softpedia, Bucharest, 2007. Disponível em: <<http://news.softpedia.com/news/Are-Helicopters-The-Best-Subwoofers-Eminent-Technology-TRW-17-Says-YES-66257.shtml>> Acesso em: 15 nov. 2016.

VAN INGE, A. Sound Processing. Multimedia Programming Project, Amsterdam, 2012. Disponível em: <<https://staff.fnwi.uva.nl/a.vaninge/MM/Topics/soundProcessing.html>>. Acesso em: 03 fev. 2016.

WILKINSON, S. Eminent Technology TRW-17 Rotary Subwoofer. Sound and Vision, Los Angeles, 2010. Disponível em: <<http://www.soundandvision.com/content/eminent-technology-trw-17-rotary-subwoofer#Xmtch4JRtw20XJOY.97>>. Acesso em: 15 nov. 2016.

WALO, C. 4 Essential Meters for Live Sound. Pro Audio Files, Minneapolis, 2014. Disponível em: <<https://theproaudiofiles.com/4-essential-meters-for-live-sound/>>. Acesso em: 15 nov. 2016.