

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

**Aline Aparecida Lucas
Jéssica Bruna da Silva**

**Estudo da acústica da gravação digital e reprodução
sonora de geradores de ruído tipo buzina aplicado
na área de medicina**

**Taubaté – SP
2018**

**Aline Aparecida Lucas
Jéssica Bruna da Silva**

**Estudo da acústica da gravação digital e reprodução
sonora de geradores de ruído tipo buzina aplicado
na área de medicina**

Trabalho de Graduação apresentado para
obtenção do Certificado de Graduação do
curso de Engenharia Mecânica do
Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade de Taubaté.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Luis Nohara

**Taubaté – SP
2018**

SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

S586e Silva, Jéssica Bruna da

Estudo da acústica da gravação digital e reprodução sonora de geradores de ruído tipo buzina aplicado na área de medicina / Jéssica Bruna da Silva; Aline Aparecida Lucas. -- 2018.

40 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Evandro Luis Nohara, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Acústica. 2. Aquisição digital de som. 3. Cardiotocografia.
4. Reprodução sonora. I. Título. II. Lucas, Aline Aparecida. III. Graduação em Engenharia Mecânica.

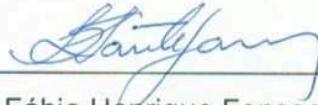
CDD – 620.2

**Aline Aparecida Lucas
Jéssica Bruna da Silva**

Estudo da acústica da gravação digital e reprodução sonora de geradores de ruído tipo buzina aplicado na área de medicina

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO APROVADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO COORDENADOR DE CURSO DE GRADUAÇÃO DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Me. Fábio Henrique Fonseca Santejani
Coordenador de Trabalho de Graduação

BANCA EXAMINADORA:



Prof. (Dr.) Evandro Luis Nohara
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ



Prof. (Me.) Ivair Alves dos Santos
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

07/12/2018

DEDICATÓRIA

Dedicamos esse trabalho aos familiares e amigos, que nos apoiaram durante toda a trajetória acadêmica e contribuíram com nossas escolhas.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus e a Nossa Senhora Aparecida, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

À Universidade de Taubaté – UNITAU, que ofereceu um bom ambiente educacional com profissionais qualificados

Ao meu orientador, *Prof. (Dr.) Evandro Luis Nohara* por todo o incentivo e motivação na orientação deste trabalho e ao *Prof. Ivair Alves dos Santos* por estar sempre disposto a nos ajudar.

Á minha base, minha mãe *Nidelsen*, que apesar das dificuldades enfrentadas, nunca mediu esforços para lutar por minha educação, me dando apoio em todas as etapas da minha vida. Essa vitória sem dúvidas é nossa.

Aos meus avós, *Helena e João*, ao meu irmão, *Paulo* e a minha tia, *Maria Inês*, por todo o apoio e incentivo.

Aos meus amigos e a todos que direta ou indiretamente me apoiaram nessa caminhada, o meu muito obrigada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pois tudo o que foi conquistado até o dia de hoje foi com o apoio dele, agradeço pela saúde e pela sabedoria que foi dada a todos os envolvidos nesse trabalho.

Ao meu orientador, *Prof. (Dr.) Evandro Luis Nohara*, o imenso prazer em ter estado esse período ao seu lado podendo vivenciar parte do seu vasto conhecimento, e mais uma vez obrigada pela oportunidade dada para desenvolver esse projeto e agradeço pela confiança depositada em nós. Ao *Prof. Ivair Alves dos Santos*, o meu mais profundo agradecimento, pela gentileza e por todas as horas de pronto atendimento com muito amor.

A minha família, meu pai, sem ele nada seria possível, pois foi ele quem patrocinou essa longa jornada de cinco anos, a minha mãe, pela compreensão de como a vida se tornou corrida nesses últimos meses. E por último, mas não menos importante, meu fiel amigo B. Beto, que durante todas as noites de pensamento inquietos me trazia paz e tranquilidade.

A todos os envolvidos, que nos ajudaram nessa jornada meu menso obrigada, sem vocês essa bela historia jamais teria sido escrita.

EPÍGRAFE

“O ontem é a história, o amanhã é um mistério, mas o
hoje é uma dádiva e por isso se chama presente.”

(MESTRE OGWAY, KUNG FU PANDA)

RESUMO

A evolução da área da medicina requer envolvimento de diversas áreas do conhecimento, como engenharia elétrica, engenharia mecânica, física, matemática, química, entre outras. Nesse aspecto, o presente trabalho agrupa as áreas da medicina com engenharia mecânica, com o objetivo de estudar a acústica da gravação digital e reprodução sonora de geradores de ruído tipo buzina (marca Kobo), aplicado no exame médico de cardiocardiografia. O trabalho envolveu a montagem em um Laboratório de Acústica no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté, capacitado para a gravação digital e reprodução sonora de áudio, entre 20 Hz – 20.000 kHz, equipado com ambiente semi-anecóico, microfone estéreo, decibelímetro, software de gravação digital, software analisador de espectro e sistema de reprodução sonora estéreo de alta fidelidade. O ruído da buzina Kobo foi gravado digitalmente e reproduzido em diversos aparelhos sonoros (três celulares sendo das marcas Apple, Asus e LG e dois modelos de caixas acústicas estéreo, sendo das marcas VCOM e Paradigm Studio 20 Reference), os quais foram comparados com a resposta do espectro sonoro e intensidade em 360° (gráfico polar) com o som original da buzina Kobo. Em relação aos resultados, os aparelhos sonoros utilizados que reproduziram o ruído da buzina Kobo possuem resposta relativamente próxima em relação ao espectro sonoro da buzina Kobo, entretanto possuem intensidade sonora frontal em 360° (gráfico polar) inferior em relação a buzina Kobo, em média de 20 dB.

Palavras-chave: Acústica. Cardiocardiografia. Aquisição digital de som. Reprodução sonora.

ABSTRACT

The evolution of the area of medicine requires the involvement of several areas of knowledge, such as electrical engineering, mechanical engineering, physics, mathematics, chemistry, among others. In this aspect, the present work groups the areas of medicine with mechanical engineering, with the objective of studying the acoustics of the digital recording and sound reproduction of horn-type noise generators (Kobo brand), applied in the medical examination of cardiocardiography. The work involved the assembly in a Laboratory of Acoustics in the Department of Mechanical Engineering of the University of Taubaté, qualified for the digital recording and sound reproduction of audio, between 20 Hz - 20.000 kHz, equipped with semi anechoic environment, stereo microphone, decibelímetro, digital recording software, spectrum analyzer software and high fidelity stereo sound reproduction system. The noise of the Kobo horn was digitally recorded and reproduced in several sound devices (three phones being Apple, Asus and LG brands and two models of stereo speakers, being VCOM and Paradigm Studio 20 Reference), which were compared with the response of the sound spectrum and intensity in 360° (polar graph) with the original sound of the Kobo horn. Regarding the results, the sound equipment used that reproduced the noise of the Kobo horn has a relatively close response to the sound spectrum of the Kobo horn, however they have a frontal 360° (polar graphic) sound intensity lower than the Kobo horn, on average 20 dB.

KEYWORDS: Acoustics. Cardiocardiography. Digital acquisition of sound. Sound reproduction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Campainha elétrica no interior de uma campânula de vidro	15
Figura 2 - Classes de sons.....	16
Figura 3 - Altura do som.....	17
Figura 4 - Esquema de observação	20
Figura 5 - Bastões imersos em água.....	23
Figura 6 - Ponte Tacoma Narrows	25
Figura 7- Contribuição das várias fontes de origem de um veículo automóvel	26
Figura 8 - Influências da largura do pneu no nível de ruído	27
Figura 9 - Espectro sonoro da buzina Kobo, iPhone 8 e caixa de som profissional ..	31
Figura 10 - Espectro sonoro da buzina Kobo, Smartphone da marca LG e Smartphone da marca Asus	32
Figura 11 - Espectro sonoro da buzina Kobo, Spinner e Caixa de som de computador	33
Figura 12 - Diagrama Polar de resposta de intensidade sonora na reprodução do ruído da buzina Kobo, em passos de 45°	34

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Um som, sua fundamental e seus harmônicos	18
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CTB	Ciência e Tecnologia da borracha
TV	Televisão
UNITAU	Universidade de Taubaté
D/A	Digital / Analógico
PC	Personal Computer

LISTA DE SÍMBOLOS

Km Quilômetros

dB Decibel

mm Milímetros

Hz Hertz

Pa Pascal

cm Centímetros

m Metros

W Watt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.1	O QUE É O SOM?	15
2.2	QUALIDADES FISIOLÓGICAS DO SOM	16
2.3	FUNDAMENTAIS E HÂRMONICOS	17
2.4	FREQUÊNCIAS PARCIAIS.....	18
2.5	OITAVAS.....	18
2.6	ESCALA SONORA DECIBEL	19
2.7	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO SOM	19
2.8	INTERFERÊNCIAS SONORAS	20
2.8.1	Reflexão.....	20
2.8.2	Difração	22
2.8.3	Refração	23
2.8.4	Difusão	23
2.8.5	Reverberação	24
2.9	MODOS DE RESSONÂNCIA.....	25
2.10	CONTROLE DE RUÍDO	26
3	METODOLOGIA	29
4	DESENVOLVIMENTO	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1	Comparação do espectro sonoro da buzina Kobo, Smartphone iPhone 8 e caixa de som profissional.....	31
5.2	Comparação do espectro sonoro da buzina Kobo, Smartphone da marca LG e Smartphone da marca Asus	32
5.3	Comparação do espectro sonoro da buzina Kobo, Spinner e caixa de som do computador	33
6	CONCLUSÃO.....	35
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

A acústica é a ciência que estuda o som, sendo classificado como um fenômeno ondulatório causado por diversos objetos e se propaga através dos diferentes estados físicos da matéria. O som, ocorrência natural observado pelos seres vivos é um dos mais importantes eventos vitais que faz parte do conjunto da percepção sensitiva da humanidade, gerado pela propagação de uma vibração em um meio elástico (sólidos, líquidos e gasosos).

Desde a comunicação (fala) entre si, até a emissão de sons produzidos pelas mais variadas fontes (automóveis, alto falantes, aviões, smartphones entre outros), a humanidade utiliza diariamente dessas vibrações para melhorar a sua sobrevivência.

O controle de ruído é um dos principais segmentos da acústica devido às evidências, cada vez mais concretas, dos efeitos negativos do ruído à saúde e ao bem estar do ser humano. O trabalho acústico volta-se para a implementação dos princípios físicos da mecânica no desenvolvimento métodos de projeto para o controle e isolamento sonoro em inúmeros ambientes aos quais os seres humanos estão expostos. Tais ambientes incluem automóveis, aeronaves, plantas industriais, ambientes de trabalho e, sobretudo, ambientes domésticos.

As ondas sonoras são utilizadas para fins diagnósticos e terapêuticos, por exemplo, na área de medicina é utilizado o som para realizar um exame clínico envolvendo o estímulo e a reação do bebê, denominado cardiotocografia, envolvendo a análise da reação do feto ao ser tocada uma buzina.

O presente trabalho envolve um estudo entre os Departamentos de Engenharia Mecânica e Medicina da UNITAU com o objetivo geral de realizar o estudo da acústica de gravação digital do som da buzina e sua reprodução sonora por diversos aparelhos reprodutores de som, tanto meios de alta fidelidade quanto de baixa fidelidade, aplicado no exame clínico cardiotocografia.

Os objetivos específicos do trabalho envolvem a montagem de um Laboratório de Acústica, envolvendo as seguintes etapas:

- a) Instalação e configuração do software de um computador tipo PC para aquisição de áudio com microfone profissional.

- b) Instalação e configuração de um software analisador de espectro, na faixa de frequências compreendidas entre 20 Hz – 20.000 kHz.
- c) Montagem de um ambiente semi-anecóico para aquisição de áudio.
- d) Gravação digital de áudio e obtenção da resposta em intensidade e frequência no software analisador de espectro, bem como a obtenção da intensidade sonora com um decibelímetro.
- e) Configurar a aquisição da resposta de intensidade sonora em 360° (gráfico polar), pela utilização de um decibelímetro.

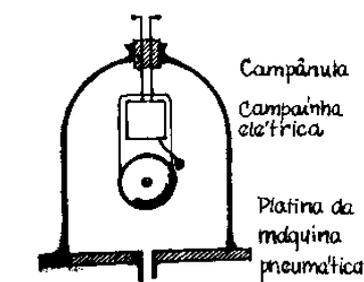
2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 O QUE É O SOM?

Define-se som como a energia que se propaga em meios materiais, podendo ser denominado também como um movimento de onda mecânica no ar ou em outros meios elásticos. Nesse caso, o som é um estímulo que pode ser percebido como uma excitação do mecanismo de audição, o qual resulta na percepção do som. Portanto, designa-se o som como uma sensação, sendo caracterizado por algumas propriedades físicas como, por exemplo, a frequência e amplitude. No meio de propagação as vibrações sonoras podem ser longitudinais (em meios de propagação sólido e fluído) ou transversais (em meios de propagação sólido, superfície de líquidos e fios) (BISCEGLI, 2003).

Reconhece que o aparelho auditivo é denominado íntegro quando um conjunto de órgãos seja capaz de captar as vibrações sonoras e repassá-las aos sensores nervosos da audição, classificando o “som” como vibração mecânica, o qual sensibiliza o aparelho auditivo íntegro. Quando uma fonte de som é colocada em um meio onde não há presença de ar atmosférico, como uma campainha em uma campânula de vidro (Figura 1), não é possível ouvir o som da campainha, pois o som não se propaga no vácuo devido à falta de matéria (JOHNSON, 1968).

Figura 1 - Campainha elétrica no interior de uma campânula de vidro



Fonte: Johnson (1968)

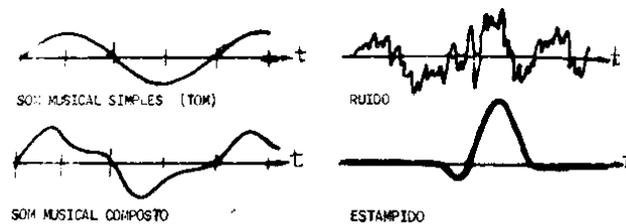
Nem todo corpo vibrante irá produzir ondas elásticas audíveis, pelo fato de sofrerem interferências da frequência e energia vibratória. É comum adicionar-se ao campo de acústica as variações devidas às vibrações mecânicas, sendo os infra-sons com frequências abaixo de 20 Hz e ultra-sons contendo frequências acima de 20000 Hz, variando assim a frequência para cada tipo de organismo, pois cada ser humano possui uma sensibilidade auditiva diferente (RAMOS, 2012).

A acústica tem como objetivo estudar a propagação das vibrações mecânicas em meios materiais como: velocidade, difração, reflexão, reverberação, difusão e ressonância do som; a definição física das vibrações tais como: frequência, amplitude, componentes harmônicas e intensidade; os princípios físicos da música; o isolamento acústico de ambientes e a execução de condições acústicas aprimoradas em auditórios para música e conferências (Acústica Arquitetônica); a capacidade industrial de aplicações em vibrações mecânicas; etc (NEPOMUCENO, 1968).

2.2 QUALIDADES FISIOLÓGICAS DO SOM

Os sons que os ouvidos humanos captam são classificados em sons musicais, ruídos e estampidos. Os sons musicais são produzidos de maneira a agradar o ouvinte, os ruídos são desagradáveis e estampidos possuem amplitude elevada. A Figura 2 mostra a variação da amplitude em função do tempo para cada tipo de som (JOHNSON, 1968).

Figura 2 - Classes de sons

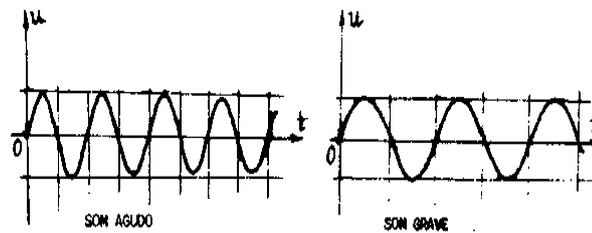


Fonte: Johnson (1968)

Os sons musicais podem ser simples ou complexos, sendo os simples equivalentes a vibração harmônica e os complexos equivalentes a vibração periódica não harmônica. O som apresenta três qualidades fisiológicas: amplitude, intensidade e timbre (JOHNSON, 1968).

A amplitude do som depende de sua frequência. Comparando os dois sons musicais (Figura 3), é agudo o de frequência maior e o grave de frequência menor como mostra o gráfico a seguir:

Figura 3 - Altura do som



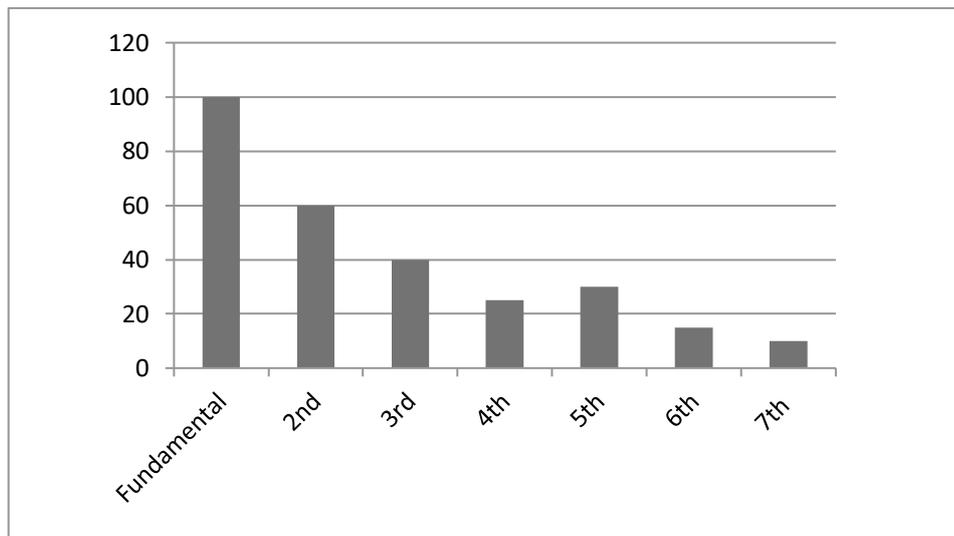
Fonte: Johnson (1968)

Intensidade de um som é um atributo que permite distinguir entre sons agudos e sons graves, sendo que os sons graves possuem frequências reduzidas enquanto os sons agudos possuem frequências elevadas (LUNA, 2012).

Os sons musicais simples que possuem a mesma amplitude e mesma intensidade são considerados idênticos, já os sons musicais complexos que apresentam mesma amplitude e mesma intensidade não são considerados iguais por contar de uma característica denominada timbre. O timbre é exclusivo de sons complexos, sendo estabelecido fisicamente pelas frequências e intensidades dos harmônicos que seguem a vibração fundamental (LUNA, 2012).

2.3 FUNDAMENTAIS E HÂRMONICOS

No instante em que uma corda ou o ar vibram, é gerada uma frequência fundamental, produzindo apenas uma frequência. Os instrumentos musicais vibram gerando uma frequência fundamental e várias outras frequências, sempre múltiplas inteiras da fundamental, denominadas harmônicas. Normalmente, a frequência fundamental (Gráfico 1) possui a maior intensidade, e as frequências harmônicas de menor intensidade em relação à fundamental, podendo ocorrer, sobretudo em instrumentos musicais com caixas de ressonância, como o violino ou violão, em que um determinado harmônico é mais intenso aos demais. Ao escutar um instrumento emitindo uma nota musical, o que se ouve é a propagação da frequência fundamental e os harmônicos produzidos por esse instrumento (BERSAN, 2008).

Gráfico 1 - Um som, sua fundamental e seus harmônicos

Fonte: Bersan (2008)

2.4 FREQUÊNCIAS PARCIAIS

Os músicos frequentemente utilizam o termo parcial em vez de frequência harmônica, mas há uma distinção entre os dois termos. As parciais de muitos instrumentos musicais não estão harmonicamente relacionados à frequência fundamental, isto é, as parciais não são múltiplos exatos da frequência fundamental, ainda que a riqueza do timbre possa ser transmitida por tais desvios da relação harmônica. Por exemplo, as parciais de sinos e tons de piano estão frequentemente em uma relação não harmônica com a frequência fundamental (EVEREST; POHLMANN, 2009).

2.5 OITAVAS

Engenheiros acústicos ou de áudio constantemente utilizam em seu discurso o termo harmônicos para relacionar ao aspecto físico do som. Os músicos, ao contrário, relacionam o aspecto físico do som com a terminologia de oitava. A oitava é um conceito logarítmico que está firmemente cravados em escalas e terminologias musicais por causa de sua relação com as características dos ouvintes (EVEREST; POHLMANN, 2009).

O intervalo de 100 a 200 Hz é uma oitava, assim como o intervalo de 200 a 400 Hz. O intervalo de 100 a 200 Hz é percebido como sendo maior que o intervalo de 200 a 400 Hz; isso demonstra que o ouvido percebe intervalos como proporções

em vez de diferenças aritméticas. Em particular, a percepção do ser humano em relação à frequência é logarítmica. Como a oitava é importante no trabalho acústico, é útil considerar a matemática da oitava (EVEREST; POHLMANN, 2009).

2.6 ESCALA SONORA DECIBEL

O decibel é uma das unidades de medida mais importantes no campo de áudio. O decibel é uma propriedade eficiente para descrever fenômenos de áudio, e a percepção humana. A escala sonora decibel é utilizada para medir níveis de som em várias aplicações. Os níveis de som expressos em decibéis demonstram a ampla gama de sensibilidade na audição humana, pois o limiar inferior da audição corresponde a níveis de pressão sonora baixos, enquanto que no limite superior o ouvido pode tolerar intensidades de som elevadas, e a escala decibel é uma maneira conveniente de lidar com a faixa de bilhões de vezes de pressão sonora entre os limites superior e inferior (EVEREST; POHLMANN, 2009).

2.7 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO SOM

Ao se deparar com um relâmpago e posteriormente o trovão, este só será percebido em um intervalo de tempo depois; as marteladas de um carpinteiro em uma obra que está longe do observador será ouvida com atraso; deste modo é possível inferir que a propagação do som não é instantânea. O som se propaga a uma determinada velocidade que depende do meio e de outros fatores. Quanto mais densa a estrutura molecular, mais fácil é para as moléculas transferirem energia sonora (JOHNSON, 1968).

A velocidade do som determina a velocidade com que a energia sonora se propaga através de um meio, sendo determinada pela intensidade do som. A velocidade de propagação do som pode ser definida por 3 processos: diretos, indiretos e teóricos. No processo direto determina-se o tempo empregado por um som rápido ou estampido para multiplicar-se através de certa distância. Já no processo indireto determina-se o comprimento de onda do som, através de ondas estacionárias ou demais fenômenos de interferência. O processo teórico se embasa em determinadas propriedades, como densidade do meio e módulo de elasticidade e termodinâmicas, como a relação entre os calores específicos sob pressão e volume constante (JOHNSON, 1968).

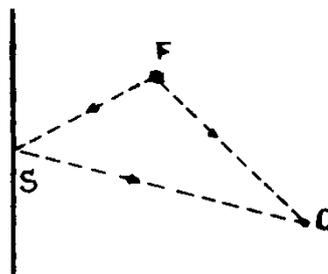
2.8 INTERFERÊNCIAS SONORAS

2.8.1 Reflexão

O som provém de uma fonte radial que se aplica em todas as direções e sentidos, e na sua propagação passa pelo observador e de acordo com as características do meio ambiente, pode não retornar. A localização da mesma fonte sonora em uma sala fechada, o som irá se propagar e quando atingir os limites da sala será refletido para a fonte de origem. As reflexões transpassam informações consideráveis sobre o tamanho, a forma e a composição de limites da sala, ajudando assim a definir a característica sonora de uma sala (EVEREST; POHLMANN, 2009).

Os fenômenos acústicos classificados como reforço, reverberação e eco são consequência da reflexão do som. Adotando uma fonte sonora (F) localizada em um recinto fechado, e um observador (O) e uma extensão refletora (S), como é mostrado na Figura 4, o som enviado pela fonte será breve e entrará em contato com o observador por duas vias, primeiramente a propagação do som vai da fonte até o observador, indicada por FO, e a segunda propagação chegará ao observador logo após refletir na parede (FSO), onde nesse caso houve reflexão. Assim, o som direto via caminho FO atingirá o observador antes do som refletido via caminho FSO (JOHNSON, 1968).

Figura 4 - Esquema de observação



Fonte: Johnson (1968)

Segundo Johnson, baseado na Figura 8, a propagação de som da fonte (F) até o observador (O) pode ser descrita em 3 situações :

a) O som direto e o refletido atingiram o observador quase no mesmo instante, de onde o reforço captado pelo observador, onde $FS+SO$ é superior a FO .

b) O som refletido atingirá o ouvido do observador quando o som direto está extinguido, ou no máximo 1/10 segundos após o termino do som direto; resulta-se portanto no aumento da sensação auditiva sem resposta de continuidade, denomina-se então o fenômeno de reverberação. Tem-se $(FS+SO)$ maior do que FO , e a discordância entre ambos deve ser menor que a discordância que o som percorre em 1/10 segundos.

c) O som refletido irá atingir o observador quando o som direto já estiver se extinguido a mais de 1/10 segundos, essa maneira ambos são ouvidos isoladamente um do outro; o som refletido é classificado como eco do som direto. O ouvido tem a capacidade de identificar sons que o atingem com espaço de tempo que não seja inferior a 1/10 segundos. Nesse tempo o som propaga no ar uma distância equivalente a 34 m e conseqüentemente, para que o observador possa ouvir o eco de sons curtos e isolados enviados pela fonte sonora, é necessário $(FS+SO) \geq 34$ m. Se o som for emitido pelo próprio observador ($F=O$), a distância à extensão refletora deve ser maior que 17 m; o trajeto da ida e da volta do som mede, portanto 34 m, e apresentará uma velocidade igual a 340 m/s que será percorrida pelo som na durante 1/10 segundos.

O reforço dos sons colabora para as boas propriedades acústicas dos auditórios; esse fenômeno é habitual em recintos de dimensões pequenas. A reverberação do som é comum em recintos vastos com superfícies lisas (residências, salões, estádios; quando desocupados). Em um meio livre não existe reforço nem reverberação, conseqüentemente a voz de um orador parece vazia, tênue, portanto torna-se difícil o entendimento claro do que foi dito (JOHNSON, 1968).

A reverberação beneficia a audição, pois ela multiplica os estímulos sonoros. Um ambiente vazio, com paredes que não absorvam o som, exhibe uma acentuada e prolongada reverberação, fato que atrapalha a percepção dos sons articulados em razão da superposição dos sons mais atuais aos sons originados por reflexão dos mais remotos. Simples objetos do nosso cotidiano, como tapetes, cortinas, roupas são maus refletores do som (pois absorvem a energia sonora), e deste modo cooperam para a diminuição da reverberação (CARVALHO, 2006).

Devido à reverberação em excesso os estados acústicos quando auditório encontra-se vazio, pode-se deixar a desejar em qualidade, já quando tem a maioria

de suas poltronas ocupadas, depara-se com qualidade superior. Ao entrar-se em um ambiente restrito por superfícies côncavas podem-se encontrar pontos combinados por reflexão do som (galeria de cochichos) e pontos mudos devido à interferência destrutiva de ondas sonoras (JOHNSON, 1968).

2.8.2 **Difração**

A onda sonora pode ter seu comprimento de onda alternando entre 2cm a 20m, em sua maioria mede alguns centímetros. Quando "obstáculos" do cotidiano como tronco de árvores, veículos, pessoas, janelas possuem medidas semelhantes às da onda do som a difração do som pode ocorrer com maior facilidade (BISQUOLO, 2006).

Como resultado da difração, o som consegue apresentar uma boa propagação pelos diferentes pontos do local, desviando com êxito dos possíveis obstáculos. Deste modo ao se falar em um recinto aberto (ar livre) sua voz será ouvida não só pela pessoa a sua frente, mas também por pessoas que estejam a metros de você. Esse fato é demonstrado por um simples ato, ao gritar no topo de uma montanha sua voz será ouvida com perfeição por pessoas que estejam a vários metros de distancia do local da fonte sonora (EVEREST; POHLMANN, 2009).

A mudança de direção do som ao incidir numa extremidade gera o fenômeno chamado sombra acústica, que ocorre com maior dificuldade com a presença da difração. Essa sombra só vai acontecer quando a dimensão do obstáculo for maior que o comprimento da onda do som, essa situação ocorre com maior facilidade em sons agudos do que em sons graves (MICHALSKI).

Um exemplo que se encaixa perfeitamente em sombras acústica é o seguinte: Em uma data comemorativa uma banda musical passará pelas ruas dos bairros, existe uma casa com um belo jardim envolto por muros altos e portão, as pessoas que estavam a observar de perto o jardim poderiam ouvir muito bem os sons graves lançados pela banda mesmo quando ela ainda estiver longe, já que os sons graves se difratam muito bem na parte superior do muro, ao mesmo tempo em que os sons agudos só serão ouvidos com maior clareza quando a banda se encontrar em frente da casa. Desde que a banda não esteja em frente da casa às pessoas que se encontrarem no jardim estarão em uma sombra acústica do muro relacionado aos

sons agudos e não aos sons graves. Com a difração, se torna muito difícil de descobrir a origem do som (JOHNSON, 1968).

2.8.3 Refração

A refração é a modificação na direção do deslocamento do som devido à alternância na velocidade de propagação quando ele encontra bordas afiadas e obstruções físicas. Normalmente, em situações cotidianas, é completamente possível que ambos os efeitos comprometam ao mesmo tempo o mesmo som (SILVA, 2015).

Como exemplo da refração (Figura 5), a imersão parcial de um bastão na água ilustra a refração da luz, criada porque as velocidades de propagação são diferentes no ar e na água. O som é outro fenômeno de onda que também é refratado por causa das mudanças na velocidade do som da mídia. É possível verificar experimentalmente que a velocidade de propagação nas superfícies de líquidos poder se alterada modificando-se a profundidade do local. As ondas diminuem o módulo de velocidade ao se diminuir a profundidade (EVEREST; POHLMANN, 2009).

Figura 5 - Bastões imersos em água



Fonte: Everest; Pohlmann (2009)

2.8.4 Difusão

Difusão é quando o som ao encontrar uma superfície, o som refletido é redirecionado para um melhor espalhamento sonoro no ambiente, ou seja, a qualquer momento o som pode chegar de varias direção. Na prática isso raramente ocorre especialmente em salas pequenas. Em vez disso, as características do som são bastantes diferentes na maioria das salas. Em alguns casos, isso é bem vindo, porque pode, por exemplo, ajudar um ouvinte a localizar a origem do som. Na maioria dos projetos de salas, a difusão é usada para distribuir mais eficazmente o

som e fornecer uma resposta mais igual ao longo de uma sala que imerge o ouvinte no som. Muitas vezes é difícil fornecer difusão suficiente, particularmente em baixas frequências e em pequenas salas, devido à resposta modal da sala. O objetivo da maioria dos projetos de sala é obter energia sonora através da faixa de frequência audível que é uniformemente distribuída por toda sala (EVEREST; POHLMANN, 2009).

Um exemplo para obter a resposta de frequência de um amplificador, um sinal de frequência variável é inserido e a saída é observada para medir a resposta. A mesma abordagem pode ser aplicada ao sistema de reprodução de uma sala reproduzindo um sinal de frequência variável através de um alto-falante e medindo o sinal acústico captado por um microfone localizado na sala. No entanto, a resposta acústica de sistemas de reprodução em salas nunca é tão plana quanto a resposta de dispositivos elétricos. Esses desvios são parcialmente devidos a condições não difusas na sala. A difusão é bem-vinda, pois ajuda a envolver o ouvinte no campo sonoro. Por outro lado, muita difusão pode dificultar a localização da fonte sonora (EVEREST; POHLMANN, 2009).

2.8.5 **Reverberação**

Trata-se do ruído de um som vindo de superfícies de ambientes fechados. Ele pode ser confundido com o eco, mas a diferença entre os efeitos sonoros é que o eco pode ser compreendido. Na reverberação, não há como distinguir o que é ouvido; é um efeito sonoro que faz com que não se entenda o que é dito, cantado e tocado em um ambiente. Ela causa risco para a saúde, refletidos em dores de cabeça e possíveis perdas auditivas (EMARKET, 2015).

Ambientes com características de revestimento e volume muito grandes tendem a sofrer com os efeitos da reverberação. Salas de aula, restaurantes, escritórios, igrejas, auditórios e até casas de show são alguns dos locais que podem passar por estes problemas. Quanto maior o espaço e a presença de vidros, paredes, superfícies e pisos lisos, maior a reverberação (EMARKET, 2015).

Se você pressionar o pedal do acelerador de um automóvel, o veículo acelera a uma determinada velocidade. Se a estrada estiver lisa e nivelada, esta velocidade permanecerá constante. Com uma força constante no acelerador, o motor produz potência suficiente para superar as perdas por atrito e aerodinâmicas, e resulta em

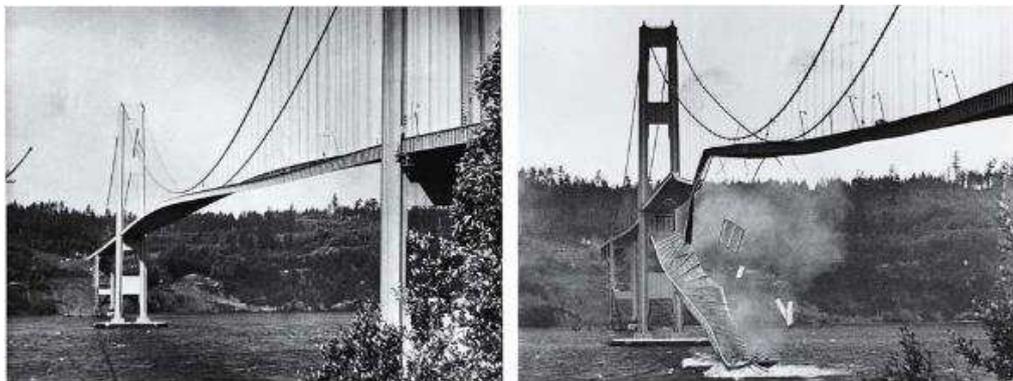
uma condição balanceada (estado estacionário). Se você tirar o pé do acelerador, o carro diminuirá gradualmente e parará. Som em uma sala se comporta de forma semelhante. Quando um alto-falante é ligado, ele emite um ruído em uma sala que cresce rapidamente até certo nível. Este nível é o ponto de equilíbrio ou estado estacionário em que a energia sonora irradiada pelo alto-falante é suficiente para superar as perdas no ar e nos limites da sala. Uma maior energia sonora irradiada do alto-falante resultará em um nível de equilíbrio mais alto, enquanto que menos energia para o alto-falante resultará em um nível de equilíbrio mais baixo. Quando o alto-falante é desligado, leva um tempo finito para que o nível de som na sala diminua para a inaudibilidade. Esse efeito posterior do som em uma sala, após o sinal de excitação ter sido removido, é reverberação e tem um impacto importante na qualidade acústica da sala (EVEREST; POHLMANN, 2009).

2.9 MODOS DE RESSONÂNCIA

Todas as estruturas mecânicas têm uma ou mais frequências naturais de oscilação. Se a estrutura for submetida a uma força externa periódica cuja frequência coincida com uma das frequências naturais, a amplitude de oscilação atingirá valores elevados que podem levar ao colapso da estrutura. Este fenômeno é denominado ressonância (DONOSO, 2012).

Um exemplo histórico do fenômeno de ressonância foi à queda da ponte pênsil do estreito de Tacoma Narrows (Washington, EUA) (Figura 6) quando ventos soprando sobre a ponte provocam oscilações acima da frequência de ressonância, levando então à sua destruição quatro meses depois de ter sido inaugurada. (DONOSO, 2012).

Figura 6 - Ponte Tacoma Narrows



Fonte: Mishalski

2.10 CONTROLE DE RUÍDO

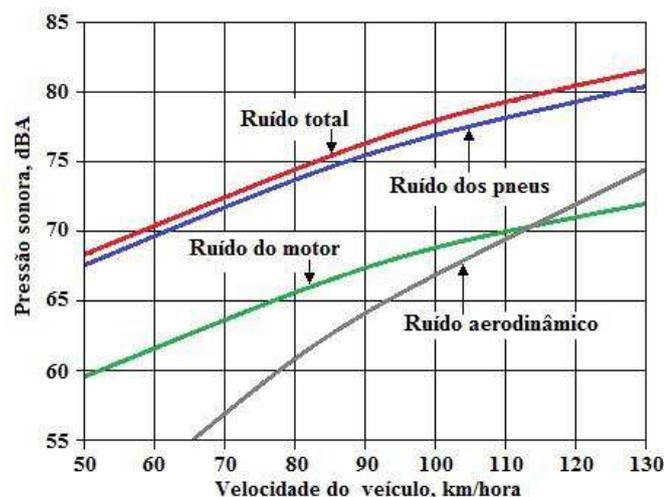
Para maior absorção dos ruídos nos automóveis, existem alguns métodos a serem utilizados para diminuí-los. O revestimento acústico de automóveis pode ser composto por mantas de isolamento, espumas de absorção, spray (de poliuretano, de lã de vidro, etc.) ou painéis de fibra. As utilidades de isolamento absorvem as ondas sonoras, atenuam a ressonância e amortecem vibrações (CAETANO, 2011).

O ruído produzido pelos pneus constituía alguma preocupação pelo incômodo gerado no interior do veículo ao condutor e passageiro. Contudo, o mesmo determina o ruído ambiente produzido pelo tráfego e, passou a ser também uma preocupação de natureza ambiental. O ruído produzido por um veículo automóvel tem as seguintes origens:

- a) Ruído produzido pelo rodado (pneus);
- b) Ruído produzido pelo motor;
- c) Ruído aerodinâmico.

Apresenta-se uma análise no gráfico abaixo (Figura 7) dos contributos destes três componentes, para diferentes velocidades do veículo, em Km/hora; a curva que representa o nível de ruído total é a soma logarítmica das três componentes referidas (CAETANO, 2011).

Figura 7- Contribuição das várias fontes de origem de um veículo automóvel



Fonte: Caetano (2011)

Para veículos de passeio o limite máximo permitido é de 75 dB. No caso de caso de caminhões e ônibus, o limite máximo permitido é de 78 dB. A largura do pneu, também influência no nível de ruído, como mostra na Figura 8.

Figura 8 - Influências da largura do pneu no nível de ruído

Largura do pneu, mm	Nível de ruído, dB
< 145	72,1
155 – 165	72,8
175 – 185	73,5
195 – 225	75,0
≥235	75,4

Fonte: Caetano (2011)

No caso das aeronaves um dos fatores que mais incomodam passageiros são os ruídos externos provenientes das turbinas e do atrito entre as correntes de ventos e a fuselagem. Por outro lado, nos carros o ruído advindo de sua condução na estrada é originado do funcionamento do conjunto formado por motor e transmissão, do atrito do solo com os pneus, na movimentação da suspensão, do acionamento dos freios e da aerodinâmica do veículo. Para atenuar esses ruídos indesejáveis que chegam às tripulações e aos passageiros, já são utilizados na fuselagem dos aviões e nas laterais dos veículos materiais de tratamento acústico passivos, constituídos por espumas, lã de vidro ou feltros que de certa forma dissipam parte dessas emissões acústicas. Esses materiais atualmente utilizados conseguem atenuar com sucesso as altas e médias frequências, mas oferecem limitações nas baixas frequências – sons mais graves, como os sinais sonoros emitidos pelo bumbo que compõe uma bateria ou por um contrabaixo (GALLO, 2011).

Existem também as plantas industriais, onde os isolantes industriais são aplicados no meio de indústrias, e seu funcionamento ocorre não por serem somente um obstáculo, mas uma série de barreiras, que faz com que o som tenha menos chances de ser transmitido.

Os materiais acústicos isolantes industriais são utilizados com grande frequência na retenção de energia sonora em pisos, janelas, portas, vidros e

máquinas, sendo excelentes para a dissipação da energia sonora, impedindo a propagação de vibrações, que podem causar rachaduras nas estruturas do local, que por sua vez podem causar estragos e prejuízos. O desenvolvimento de sistemas de atenuação de ruídos é um importante passo na acústica industrial para tornar o ambiente de trabalho para funcionários de fábricas mais confortável e seguro. Além disso, a aplicação de melhorias na acústica industrial previne problemas trabalhistas que a empresa possa vir a ter (CAETANO, 2011).

Uma solução nesse caso é a instalação de atenuadores de ruídos em locais como torres de resfriamento, salas de máquinas, condensadoras, salas de grupos geradores, exaustores, ventiladores, entradas e saídas de fluxos turbulentos e muito mais. Esses tipos de atenuadores são importantes em alguns setores específicos da indústria, como a indústria de mineração, a indústria automobilística e a indústria siderúrgica, por contarem com processos especialmente ruidosos (CAETANO, 2011).

Nos ambientes de lazer são utilizados isolantes acústicos para não causar incomodo aos vizinhos, em casas noturnas, em bares e restaurantes, pois a falta de um tratamento acústico adequado faz com que o som interno reflita nas superfícies, tornando a reverberação excessiva. Com isso, em uma conversa, as pessoas acabam aumentando o tom da voz em razão ao ruído do ambiente para serem ouvidas. Esses isolantes são encontrados em três materiais diferentes, sendo: lã de vidro, lã de rocha e celulose. Apenas a Celulose é um material inflamável, os outros dois não propagam a chama. Mas para usarmos a Celulose aplicamos um retardante (anti-chamas) para que o mesmo se torne um material não inflamável (CAETANO, 2011).

Como pode-se notar a acústica esta presente em vários ramos do nosso cotidiano: nos ruídos dos automóveis, em uma simples viagem de avião ou até mesmo num happy hour no fim do dia, e com a área da saúde não é diferente.

3 METODOLOGIA

No presente trabalho foram utilizados os seguintes equipamentos para a gravação digital e reprodução sonora, envolvendo a infra-estrutura presente no Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da UNITAU:

- a) Computador PC Workstation modelo HP Z230;
- b) Microfone de lapela marca Le Son ml-70/70-D
- c) Buzina elétrica marca Kobo;
- d) Absorvedor acústico marca Vibrason;
- e) Tripé marca fotodestway;
- f) Decibelímetro marca Radioshack, modelo cat. no. 33-2055.
- g) Handspinner com alto falante saída 1W;
- h) Caixa de som de computador marca VCOM;
- i) Amplificador estéreo marca ADCOM GFA 5500, processador D/A (digital/analógico) marca LF Audio e caixa acústica marca Paradigm Studio 20 Reference;
- j) Smartphones: Marca Asus modelo Zenfone3 modelo ze55kl; Marca LG modelo k2017; Marca Apple, modelo iPhone 8.
- k) Software *SimpleAudio Spectrum Analyzer* v 3.9.

A aquisição digital do áudio da buzina Kobo foi realizada com o microfone de lapela posicionado a 20cm, conectado ao computador e fixado em um tripé, envolto em 3 placas de absorvedores acústicos para minimizar a reflexão do som nas paredes. O som foi gravado pelo software de gravação de som do sistema operacional Windows.

Em seguida a aquisição do espectro sonoro da buzina também foi realizada utilizando a mesma configuração, com o software analisador de espectro, e sua intensidade sonora em 360 graus (com passos de 45 graus) no plano horizontal foi medida com o decibelímetro, a 20 cm da fonte sonora. Em uma segunda fase foi realizada a reprodução sonora do arquivo digital da buzina em todos os reprodutores de som listados anteriormente, onde foi realizada a aquisição do espectro sonoro, bem como a medição da intensidade sonora em 360 graus (com passos de 45 graus) no plano horizontal medido com o decibelímetro, a 20 cm da fonte sonora. Os resultados das medidas de intensidade sonora foram plotados em um gráfico polar.

4 DESENVOLVIMENTO

Ao longo do desenvolvimento do trabalho foram instalados e operados softwares de gravação sonora, pela utilização de microfones profissionais e computador tipo PC.

Deparou-se com a necessidade de obter um espectro sonoro para que fosse possível analisar sua resposta em frequência e amplitude sonora. Para isso foi preciso pesquisar um software compatível com o computador disponível, ouve-se a necessidade de baixar um extensor para utilizar um aplicativo que teria a função de captar o som da buzina através do microfone lapela. Feitos os testes notou-se que o aplicativo utilizado até então não iria atender todas as necessidades do nosso projeto. Notado que o software não atendeu as necessidades do projeto, procuramos outro e encontramos o software *Simple Audio Spectrum Analyzer v 3.9*, que atendeu todas as necessidades.

Foram testados vários alto falantes com o mecanismo do mais simples ate os mais complexos, para identificação do que reproduzia o mais fielmente o som da buzina Kobo. A partir dos testes conseguiu-se identificar que os aparelhos de reprodução que mais se aproximam da buzina Kobo foram o iPhone e a caixa acústica profissional tendo em vista que estes apresentaram pressão sonora de 118 dB e 119 dB respectivamente e a buzina Kobo sendo de 126 dB.

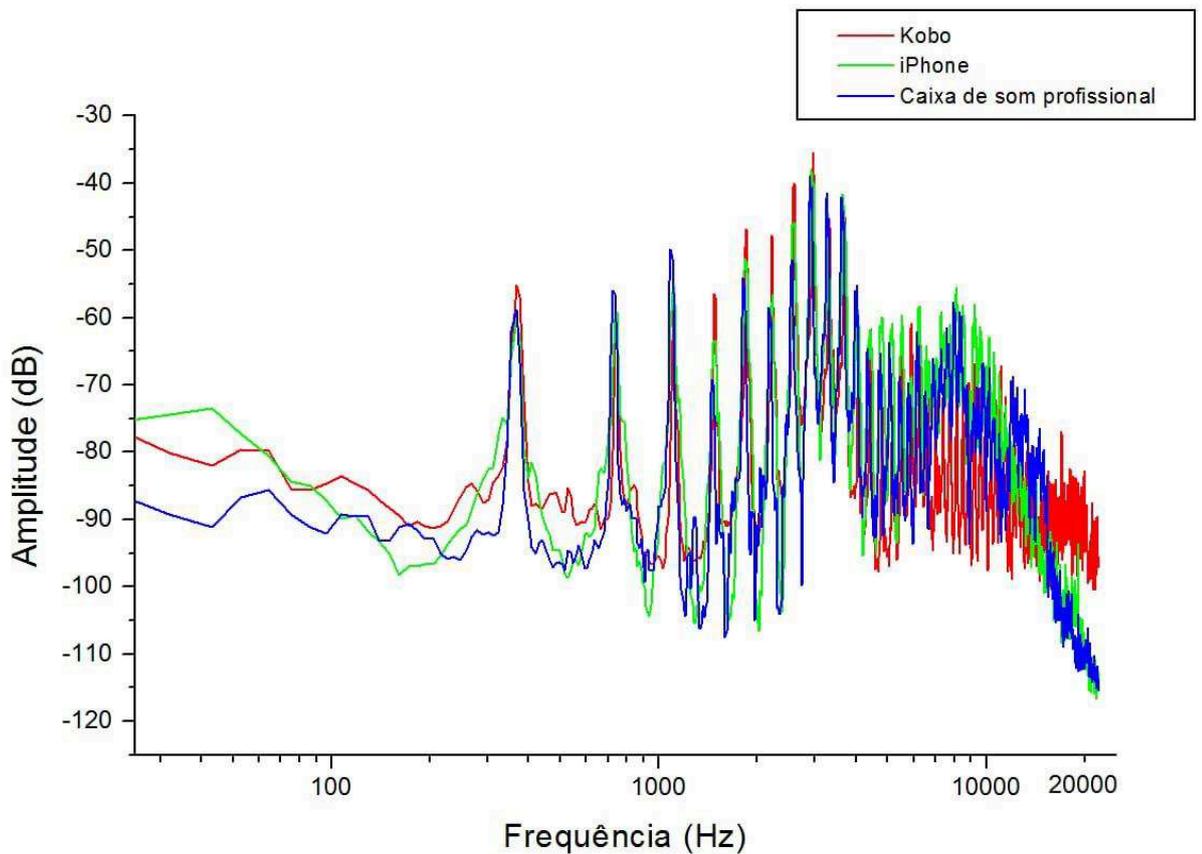
Foram estudados interferência sonoras que poderiam ocorrer no momento da aquisição sonora da buzina, tais como a reflexão, difração, refração, difusão, reverberação e modos de ressonância, sendo estes apresentados à fundo anteriormente e para maior fidelidade no momento da aquisição sonora foram colocadas placas absorvedoras.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Comparação do espectro sonoro da buzina Kobo, Smartphone iPhone 8 e caixa de som profissional

Pelo gráfico da Figura 9, observa-se que de todos os alto falantes testados, o smartphone da marca Apple, modelo iPhone 8 e a caixa som profissional foram os que obtiveram melhor desempenho da fidelidades da reprodução das frequências em relação aos demais aparelhos testados, (Smartphones Asus e LG, Spinner e caixa de som marca VCOM e Paradigm Studio 20 Reference). O valor de intensidade sonora da reprodução sonora do arquivo digital do ruído da buzina Kobo foi igual a 126 dB, sendo 118 dB e 119 dB para o iPhone 8 e a caixa de som profissional, respectivamente.

Figura 9 - Espectro sonoro da buzina Kobo, iPhone 8 e caixa de som profissional

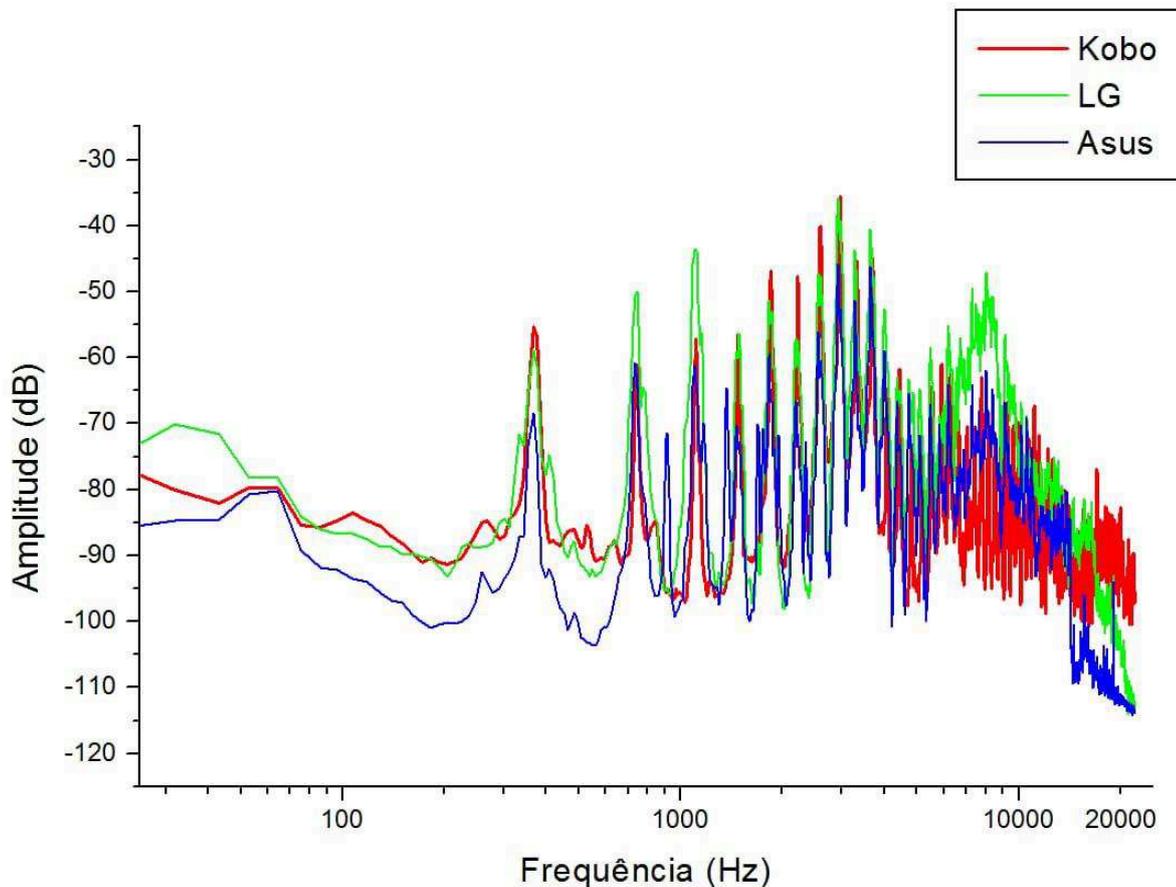


Fonte: Do autor

5.2 Comparação do espectro sonoro da buzina Kobo, Smartphone da marca LG e Smartphone da marca Asus

O gráfico da Figura 10 apresenta as respostas em frequência e intensidade sonora da buzina Kobo, smartphone marca LG e Asus. Pode-se observar pelo gráfico que abaixo de 2000 Hz o smartphone Asus não possui uma boa fidelidade em relação a reprodução sonora em frequência, pois alguns picos de frequência estão deslocados em relação aos picos da buzina Kobo. O smartphone LG possui uma fidelidade em relação a resposta de frequência melhor em relação ao smartphone Asus, uma vez que os picos de frequência se sobrepõem com os picos da buzina Kobo. O valor de intensidade sonora da reprodução sonora do arquivo digital do ruído da buzina Kobo dos smartphones LG e Asus foram iguais a 117 dB e 115 dB, respectivamente.

Figura 10 - Espectro sonoro da buzina Kobo, Smartphone da marca LG e Smartphone da marca Asus

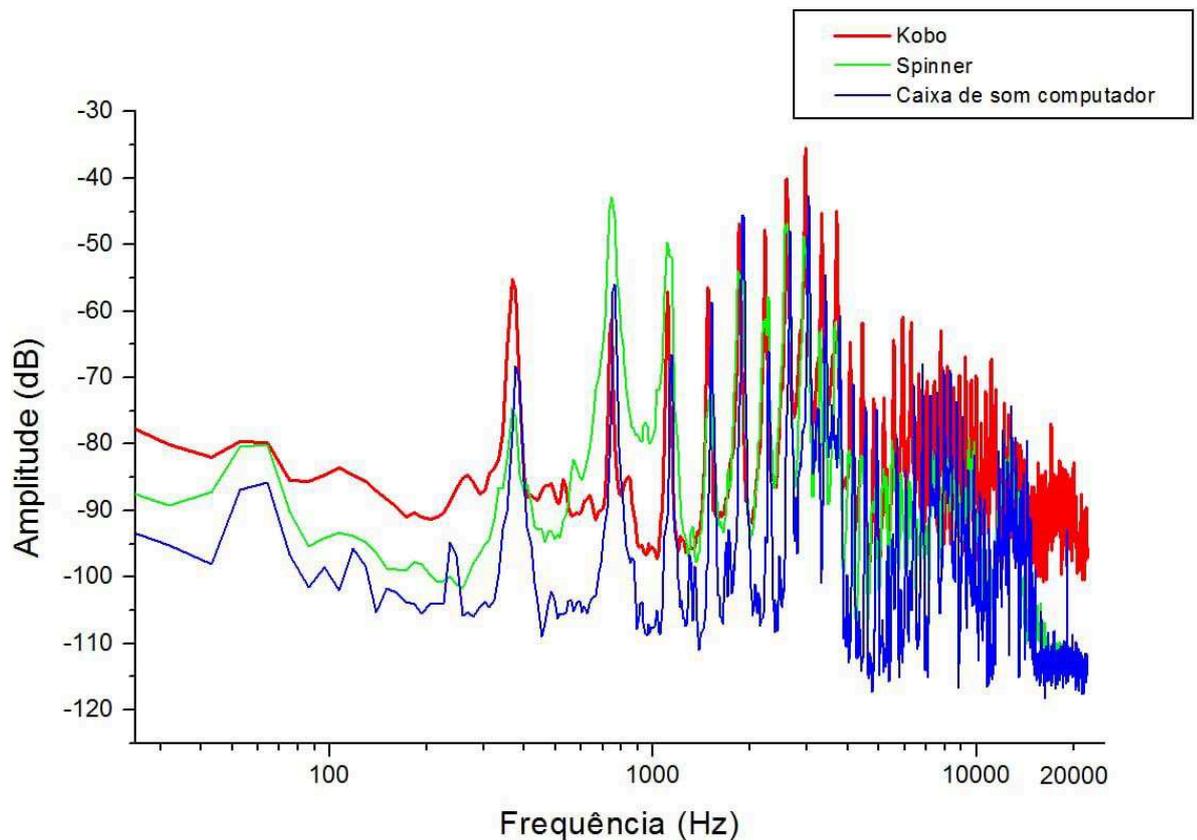


Fonte: Do autor

5.3 Comparação do espectro sonoro da buzina Kobo, Spinner e caixa de som do computador

Embora o Spinner seja apenas um aparelho de baixo custo e sem pretensões de reprodução sonora de alta fidelidade, os resultados obtidos do espectro sonoro se apresentam com uma fidelidade sonora boa, uma vez que os picos de frequência foram reproduzidos com boa precisão, similarmente a aparelhos de reprodução de maior custo, como pode ser observado no gráfico da Figura 11. Já na caixa de som de computador, a qual possui também um baixo custo, pode-se observar que obteve uma boa resposta de fidelidade de reprodução em frequências inferiores a 1000 Hz. A caixa de som de computador apresentou uma pressão sonora de 102 dB e o Spinner 104 dB.

Figura 11 - Espectro sonoro da buzina Kobo, Spinner e Caixa de som de computador



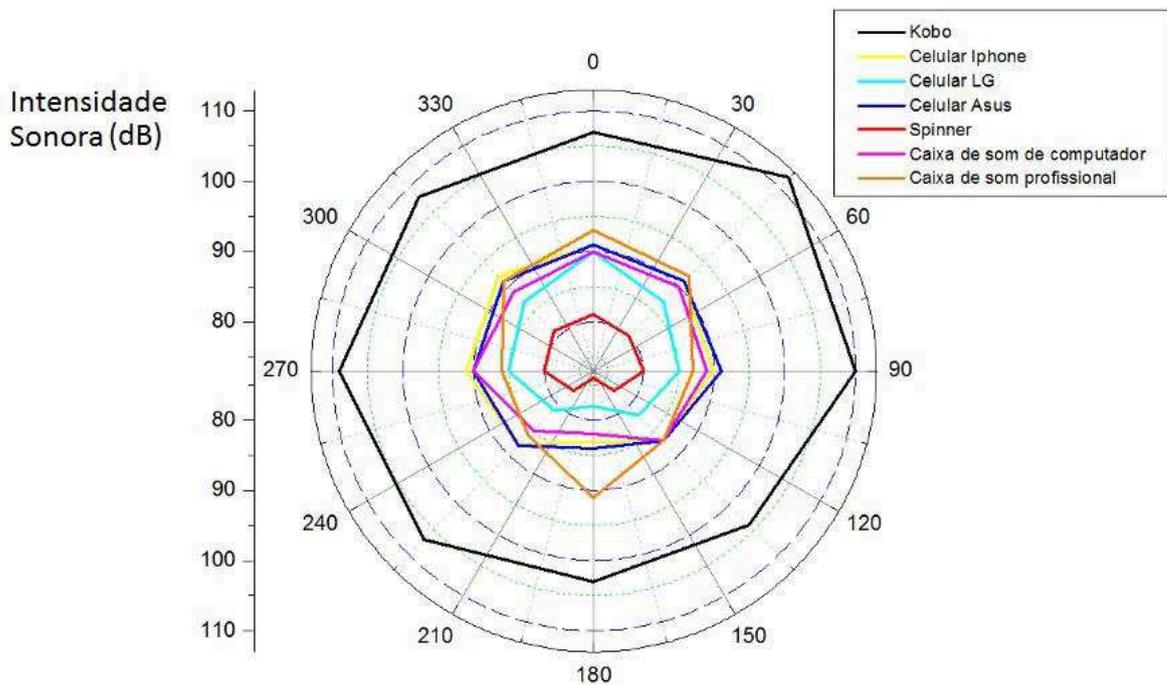
Fonte: Do autor

Em relação ao gráfico polar (Figura 12), a buzina Kobo apresenta um diagrama polar com maior intensidade sonora em relação a todos os outros reprodutores sonoros testados (smartphones, caixa de som profissional e de computador) tendo seu limite de abrangência muito maior que os outros, sendo seus valores de intensidade sonora altos em todos os ângulos, muito diferente se comparado com o Spinner e ao smartphone LG, que apresentam diagrama polar com as menores intensidades sonoras, tendo melhores respostas quando posicionado a 0°.

A caixa de som profissional, como pode notar apresenta bons resultados quando posicionado a 180° e a 0°, apresentando o segundo maior diagrama polar.

Os smartphones das marcas Asus e Apple e a caixa de som de computador apresentaram resultados semelhantes tendo melhor desempenho quando posicionados nos ângulos de 90° e 270°.

Figura 12 - Diagrama Polar de resposta de intensidade sonora na reprodução do ruído da buzina Kobo, em passos de 45°



Fonte: Do autor

6 CONCLUSÃO

Pela análise dos gráficos do espectro sonoro das diversas fontes reprodutoras de som em relação à buzina Kobo, pode-se observar que de uma maneira geral os picos principais da buzina Kobo foram reproduzidos, mas com uma mudança da frequência do pico, para maior ou menor frequência, e com ausência ou presença de alguns picos. Os reprodutores com as maiores diferenças da resposta da fidelidade do espectro sonoro em relação a buzina Kobo foram a caixa de computador e o spinner. Os smartphones da marca LG e Asus apresentaram respostas da fidelidade em intensidade e picos de frequência intermediários, e a caixa de som profissional e o smartphone da marca Apple apresentaram os resultados com maior fidelidade.

Em relação ao gráfico polar, a buzina Kobo obteve um diagrama polar com maior intensidade sonora em relação a todos os reprodutores sonoros, que se apresentaram muito direcionais (entre 270° e 90°) e com intensidade sonora menor, em média 20 dB.

REFERÊNCIAS

- BERSAN, F. **Teoria de áudio**. 2008. Disponível em: <<https://www.somaovivo.org/artigos/teoria-de-audio-o-que-e-vibracao-som-harmonicos-e-timbre/>>. Acesso em: 03 maio 2018.
- BISCOLO, P. **Difração de ondas**. 2006. Disponível em: <<https://educacao.uol.com.br/disciplinas/fisica/difracao-de-ondas-um-fenomeno-que-pode-ser-sonoro-ou-luminoso.htm>>. Acesso em: 28 jun. 2018.
- BRAGA, T. **Aquisição e Reprodução do som**. 2015. Disponível em: <https://prezi.com/m/cm5uywclc_to/aquisicao-e-reproducao-do-som/>. Acesso em: 27 ago. 2018.
- CAETANO, M. **Ruído**. 2011. Disponível em: <<https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/pneus/pneus-seu-desempenho-funcional-e-ambiental/ruído/>>. Acesso em: 18 ago. 2018.
- CARVALHO, T. **Reverberação**. 2006-2018. Disponível em: <<https://www.google.com.br/amp/s/www.infoescola.com/fisica/reverberacao/amp/>>. Acesso em: 10 jun. 2018.
- DONOSO, J. **Som e acústica**. 2012. Disponível em: <http://www.ifsc.usp.br/~donoso/fisica_arquitetura/13_som_acustica_2.pdf>. Acesso em: 15 maio 2018.
- EMARKET. **Isolamento acústico**. 2015. Disponível em: <<http://www.amplitudeacustica.com.br/blog/author/emarket/>>. Acesso em: 03 maio 2018.
- EMARKET. **Restaurante e bares devem investir em conforto acústico para reter clientes**. 2015. Disponível em: <<http://www.amplitudeacustica.com.br/restaurantes-e-bares-devem-investir-em-conforto-acustico-para-reter-clientes/>>. Acesso em: 15 ago. 2018.
- EVEREST, F.; POHLMANN, K. Master Handbook of Acoustics. 5th ed. EUA. 529 p.
- GALLO, C. **Menos ruídos em carro e aviões**. 2011. Disponível em: <http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje/ju/setembro2011/ju505_pag9a.php>. Acesso em: 04 maio 2018.
- JOHNSON, T. **Acústica**. São Paulo: Livraria Nobel S.A 1968. 157 p.
- MISHALSKI, R. **Comportamento sonoro**. Disponível em: <<http://www.fau.usp.br/arquivos/disciplinas/au/aut0135/04%20-%20Comportamento%20Sonoro.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2018.
- NEPOMUCENO, L. **Acústica Técnica**. 1 ed. São Paulo: Editora Técnico-Gráfica Industrial Ltda 1968. 578 p.

RAMOS, E. **Som, ultrassom e infrassom**. 2012. Disponível em:
<<http://www.pascal.com.br/som-ultrassom-e-infrassom>>. Acesso: 17 maio 2018.

SILVA, D. **Refração de ondas**. 2015. Disponível em:
<<https://www.google.com.br/amp/m.mundoeducacao.bol.uol.com.br/amp/fisica/refracao-ondas.htm>>. Acesso em: 25 jun. 2018.