

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO CAMPUS MACAÉ
ENGENHARIA MECÂNICA

IGOR DE OLIVEIRA PACHECO

**Fabricação aditiva de caixa sonora provida de
alto-falante piezoelétrico: metodologia e
desenvolvimento**

MACAÉ
JUNHO DE 2021

IGOR DE OLIVEIRA PACHECO

Fabricação aditiva de caixa sonora provida de alto-falante piezoelétrico: metodologia e desenvolvimento

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação submetido ao Corpo Docente da Engenharia Mecânica do Campus Macaé da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Necesio Gomes Costa, PhD.

MACAÉ
JUNHO DE 2021

Pacheco, Igor de Oliveira.

Fabricação aditiva de caixa sonora provida de alto-falante piezoelétrico: metodologia e desenvolvimento / Igor de Oliveira Pacheco. - UFRJ, 2021.

88 p.: il. 29,7 cm.

Orientador: Necesio Gomes Costa

Projeto de graduação - Universidade Federal do Rio de Janeiro Campus Macaé / Curso de Engenharia Mecânica, 2021

Referências bibliográficas p.

1. Manufatura Aditiva. 2. Gestão de Projetos. 3. Mecânica Acústica. 4. Impressão 3D. I. Gomes Costa, Necesio. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro Campus Macaé, Curso de Engenharia Mecânica. III. Título.

Fabricação aditiva de caixa sonora provida de alto-falante piezoelétrico:
metodologia e desenvolvimento

IGOR DE OLIVEIRA PACHECO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO
DOCENTE DA ENGENHARIA MECÂNICA DO CAMPUS MACAÉ DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À
OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado em 21 de junho de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Necesio Gomes Costa, PhD.

Prof. Ranulfo Martins Carneiro Neto, M.Sc.

Prof. Thiago Gomes de Lima, M.Sc.

Dedico esta monografia à minha mãe Nilza, a meus familiares, amigos e professores, que sem dúvida foram fundamentais para que eu chegasse até aqui, e ao meu pai, Antônio Rogério, minha fonte de inspiração, a quem atribuo minha escolha acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus companheiros Ezzt El Fishawy, Yuan Jin, Wilmer Chacon Romero e Fernando Albarran Ramirez, por terem feito parte da condução deste trabalho durante o período de intercâmbio na França, pelo projeto BRAFITEC.

Gostaria também de agradecer à École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, por terem cedido sua estrutura laboratorial, assim como seus professores doutores no desenvolvimento tanto da gestão de projeto como na fabricação e testes posteriores realizados.

Por fim, meus mais sinceros agradecimentos ao professor Dr. Necesio Gomes Costa pela oportunidade de estudo, visto que o projeto foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001.

*"A persistência é o caminho do êxito."
Charlie Chaplin*

RESUMO

Favorecidos pelos avanços da indústria 4.0 no mundo, a manufatura aditiva e o mercado de aparelhos sonoros vêm experimentando um verdadeiro crescimento nos últimos anos, com fortes indícios promissores para o futuro. O objetivo deste trabalho é fabricar e caracterizar um aparelho sonoro constituído de alto-falantes piezoelétricos com envoltório feito a partir da manufatura aditiva. Para isso, é proposta a divisão do trabalho em duas grandes áreas: gestão de projetos, em que são analisados os riscos e limites do trabalho, e fabricação e testes do produto, onde é realizado desde o primeiro esboço, até conclusão e ensaios acústicos finais. Os resultados finais mostraram um aparelho de baixo custo com maior performance em sons médios, alta taxa de distorção e diretividade não simétrica.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva; Gestão de Projetos; Mecânica Acústica; Vibrações; Impressão 3D.

ABSTRACT

Favored by the advances of the industry 4.0 in the world, the additive manufacturing and the market of sound devices have experienced real growth in recent years, with strong promising signs for the future. The objective of this work is to manufacture and characterize a sound device made up of piezoelectric speakers with its enclosure made from additive manufacturing. To this end, it is proposed to divide the work into two major areas: project management, in which the risks and limits of the work are analyzed, and product manufacturing and testing, where it is carried out from the first draft, to completion and final acoustic tests. The final results showed a low cost device with better performance in medium sounds, high total harmonic distortion and non-symmetric directivity.

Keywords: Additive Manufacturing; Project Management; Acoustic Mechanics; Vibrations; 3D Printing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mercado global de produtos e serviços de impressão 3D de 2020 a 2024 . . .	16
Figura 2 – Impressão 3D em material polímero	17
Figura 3 – Impressão 3D de uma casa	17
Figura 4 – Matriz SWOT comumente desenhada	20
Figura 5 – Diagrama PERT/CPM e suas respectivas tarefas e predecessores.	21
Figura 6 – Exemplo de gráfico de Gantt	21
Figura 7 – As quatro questões básicas do FMEA	22
Figura 8 – Passos gerais na produção de objetos através da impressão 3D	23
Figura 9 – Princípio de funcionamento do FDM	24
Figura 10 – Encaixe de alta exigência dimensional	25
Figura 11 – Empregabilidade de diferentes termoplásticos no FDM	26
Figura 12 – Estruturas de preenchimento com diferentes densidades e orientações	27
Figura 13 – Onda transversal e longitudinal, à esquerda e direita, respectivamente	28
Figura 14 – Gongo percutido	29
Figura 15 – Espectro eletromagnético	30
Figura 16 – Espectro sonoro	31
Figura 17 – Volume deslocado de ar num tubo aberto	32
Figura 18 – Energia sonora irradiada esfericamente por um fonte pontual	32
Figura 19 – Limiar de audibilidade de uma pessoa	33
Figura 20 – Diferentes modos normais em uma corda oscilada	34
Figura 21 – Diferentes modos normais em uma membrana vibrante	35
Figura 22 – Esquema representativo da conversão de sinais elétricos em sonoros	35
Figura 23 – Composição de um alto-falante dinâmico	36
Figura 24 – A membrana do alto-falante vibra, deslocando o ar adjacente	36
Figura 25 – Princípio de funcionamento de um material piezoelétrico	37
Figura 26 – Transdutor piezoelétrico normalmente empregado em alto-falantes	37
Figura 27 – Sistema oscilador piezoelétrico	38
Figura 28 – Modos normais de vibração em uma membrana	38
Figura 29 – Certas regiões do cone favorecem diferentes frequências	39
Figura 30 – Dois tipos de horns: cônico e exponencial, respectivamente.	40
Figura 31 – Influência da geometria do envoltório na resposta de frequência	41
Figura 32 – Resposta de frequência de um diafragma de alto-falante	42
Figura 33 – Típica câmara anecoica, na Universidade de Salford	43
Figura 34 – Resposta de frequência de um aparelho ideal	44
Figura 35 – Diretividade 2D segundo a frequência sonora de emissão	45
Figura 36 – Corte de um volume de diretividade 3D	46

Figura 37 – Uma onda não pura pode ser descrita como o somatório de ondas puras	46
Figura 38 – Nota dó (261.63 Hz) tocada em uma guitarra.	47
Figura 39 – Esquema de cúpula semiesférica utilizada na análise de nível de pressão sonora	48
Figura 40 – Modelos KSN 1056A, KSN 1141A e KSN 1001D da marca Piezo Source	49
Figura 41 – Resposta de frequência e diretividade do modelo KSN 1056A	50
Figura 42 – Tweeter cônico, modelo HT-22/8 da marca Monacor	51
Figura 43 – Tweeter de radiação direta, modelo KSN 1020A da marca Piezo Source	51
Figura 44 – Modelos JBL GO2, Philips SB500 e Sony XB12	51
Figura 45 – Fluxograma inicial do projeto	53
Figura 46 – Malha da simulação da caixa de som	54
Figura 47 – Modelo de cristal piezoelétrico utilizado no alto-falante	56
Figura 48 – Teste sonoro empírico dos diferentes formatos e materiais para o alto-falante	57
Figura 49 – Aparelhos sonoros piezoelétricos de diferentes formatos e materiais	57
Figura 50 – Impressora 3D replicator da marca MakerBot utilizada na fabricação aditiva	58
Figura 51 – Organização esquemática da aparelhagem de teste de resposta de frequência	59
Figura 52 – Amplificador de sinal utilizado nas análises acústicas do alto-falante	59
Figura 53 – Gerador de ruído branco utilizado na análise de resposta de frequência	60
Figura 54 – Gerador de frequência e sonômetro empregados na análise de diretividade	60
Figura 55 – Esquema das ligações entre os equipamentos do teste de diretividade	61
Figura 56 – Análise de diretividade em câmara anecoica	61
Figura 57 – Cúpula vazada feita em arame empregada na análise de nível de pressão sonora	62
Figura 58 – Visor do osciloscópio empregado no processo	63
Figura 59 – Procedimento de equalização de ruído branco	64
Figura 60 – Análise FOFA do produto e projeto	65
Figura 61 – Diagrama PERT do projeto	67
Figura 62 – Diagrama de Gantt do projeto	68
Figura 63 – Esboço do envoltório	69
Figura 64 – Desenho tridimensional assistido por computador do envoltório	70
Figura 65 – Malha de impressão de 0,5 mm em (a) e 0,1 mm em (b)	71
Figura 66 – Diferentes vistas da caixa de som montada	71
Figura 67 – Curva de resposta de frequência (0 Hz - 22 kHz)	72
Figura 68 – Curva de resposta de frequência (0 Hz - 8 kHz)	73
Figura 69 – Diretividade dos alto-falantes para um sinal de 4,7 kHz	74
Figura 70 – Curva NPS x Frequência pós transformada de Fourier da curva senoidal	75
Figura 71 – Curva de resposta de frequência dos alto-falantes pré filtro	77
Figura 72 – Resposta de frequência pós filtragem, em azul. Em verde, a curva pré filtragem	77
Figura 73 – Resposta de frequência pós filtragem ampliada	78
Figura 74 – Curva de resposta de frequência do modelo KSN 1141A	84
Figura 75 – Curva de resposta de frequência do modelo KSN 1001D	84

Figura 76 – Curva de resposta de frequência do modelo KSN 1020A	85
Figura 77 – Curva de resposta de frequência do modelo KSN 1001D	85
Figura 78 – FMEA do produto/projeto. Parte 1	86
Figura 79 – FMEA do produto/projeto. Parte 2	87
Figura 80 – FMEA do produto/projeto. Parte 3	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações de modelos de caixa de som encontrados no mercado	52
Tabela 2 – Tabela de nível de gravidade dos riscos do projeto	55
Tabela 3 – Tabela de nível de probabilidade de ocorrência dos riscos do projeto	55
Tabela 4 – Nível de probabilidade de ocorrência dos riscos do projeto	56
Tabela 5 – Tarefas a serem executadas no projeto	67
Tabela 6 – Nível de pressão sonora dos harmônicos da fundamental de 4,7 kHz	75
Tabela 7 – Valores de NPS correspondentes aos pontos de medição da análise	76
Tabela 8 – Medições de parâmetros importantes da análise	76

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivo geral	17
1.3	Objetivos específicos	18
1.4	Estrutura do trabalho	18
2	REVISÃO TEÓRICA	19
2.1	Gestão de projeto e análise de riscos	19
2.1.1	A análise FOFA (SWOT)	19
2.1.2	Diagrama PERT	20
2.1.3	Diagrama de Gantt	21
2.1.4	A análise FMEA	22
2.2	Impressão 3D e materiais utilizados	23
2.2.1	A impressão 3D FDM	24
2.2.2	Materiais utilizados na impressão 3D FDM	25
2.2.3	Parâmetros da impressão 3D	27
2.3	O som	28
2.3.1	Propriedades ondulatórias do som	29
2.3.2	Níveis de intensidade e pressão sonoros	31
2.3.3	Modos de vibração e ressonância	34
2.4	Os Alto-falantes	35
2.4.1	Princípio de funcionamento de alto-falantes	35
2.4.2	Alto-falantes piezoelétricos	36
2.4.3	Influência da geometria do cone	38
2.4.4	A caixa acústica e o amplificador	40
2.5	Testes em alto-falantes	41
2.5.1	Análise de resposta de frequência	42
2.5.2	Análise de diretividade sonora	44
2.5.3	Análise de taxa de distorção harmônica (THD)	46
2.5.4	Análise do nível de pressão sonora	48
2.6	O estado da arte	48
2.6.1	Alto-falantes no mercado atual	49
3	METODOLOGIA	53
3.1	Análise FOFA	54
3.2	Diagrama de Gantt e PERT	54

3.3	Análise FMEA	55
3.4	Desenho e manufatura aditiva da caixa de som	56
3.5	Resposta de frequência	58
3.6	Análise de Diretividade	60
3.7	Análise THD e nível de pressão sonora	62
3.8	Procedimentos posteriores: filtragem	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1	Análise FOFA	65
4.1.1	Forças	65
4.1.2	Fraquezas	66
4.1.3	Oportunidades	66
4.1.4	Ameaças	66
4.2	Diagrama de PERT e de Gantt	66
4.3	Análise FMEA	68
4.4	Fabricação da caixa de som	68
4.5	Análise de resposta de frequência	71
4.6	Análise de diretividade	73
4.7	Taxa de distorção harmônica e nível de pressão sonora	75
4.8	Filtragem da caixa de som	77
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	79
	REFERÊNCIAS	81
	APÊNDICE A – RESPOSTA DE FREQUÊNCIA DE APARELHOS DO MERCADO	84
	APÊNDICE B – ANÁLISE FMEA DO PROJETO	86

1 INTRODUÇÃO

A sociedade atual vem experimentando uma era de intensas e valiosas trocas de informações a cada segundo. Graças ao advento da internet, pessoas de todos os cantos do planeta compartilham entre si notícias, gostos pessoais e opiniões diversas. Segundo a World Internet Users Statistics (2021), o número de usuários da internet aumentou mais de 1312% em todo o mundo nos últimos 20 anos, abrangendo atualmente mais de 60% da população mundial. Além da rápida interação entre os usuários da rede, a internet permitiu a criação de novas empresas de tecnologia, entretenimento e de e-commerce, tais como a americana Amazon e a chinesa Alibaba.

O sucesso dessas e de diversas outras gigantes do ramo veio substancialmente graças a criação de novas tecnologias que permitem às máquinas corresponderem às limitações dos seres humanos, reduzindo custos e otimizando processos. Este conjunto tecnológico, o qual foi discutido abertamente pela primeira vez no fórum econômico mundial de 2016, é chamado de quarta revolução industrial. O autor deste termo, o professor alemão Klaus Schwab, previu em seu livro:

Estamos a bordo de uma revolução tecnológica que transformará fundamentalmente a forma como vivemos, trabalhamos e nos relacionamos. Em sua escala, alcance e complexidade, a transformação será diferente de qualquer coisa que o ser humano tenha experimentado antes (SCHWAB, 2016).

De fato, hoje, apenas poucos anos após a previsão de Schwab, é possível ver reflexos claros desta transformação. Milhares de serviços são disponibilizados todos os dias por meio da rede mundial sob forma de novos termos cada vez mais populares, entre eles o *IoT*, *Big Data*, *Inteligência Artificial*, *Segurança Cibernética*, *Cloud Computing* e *Manufatura Aditiva*. Com o simples apertar de uma tela ou tecla, até mesmo por comandos de voz, é absolutamente praticável adquirir quase qualquer bem ou serviço que se queira, em pouco tempo. Assim, isto mostra de forma clara como a indústria 4.0 - termo que designa a quarta revolução industrial - já é parte integrante do dia a dia da sociedade do século 21.

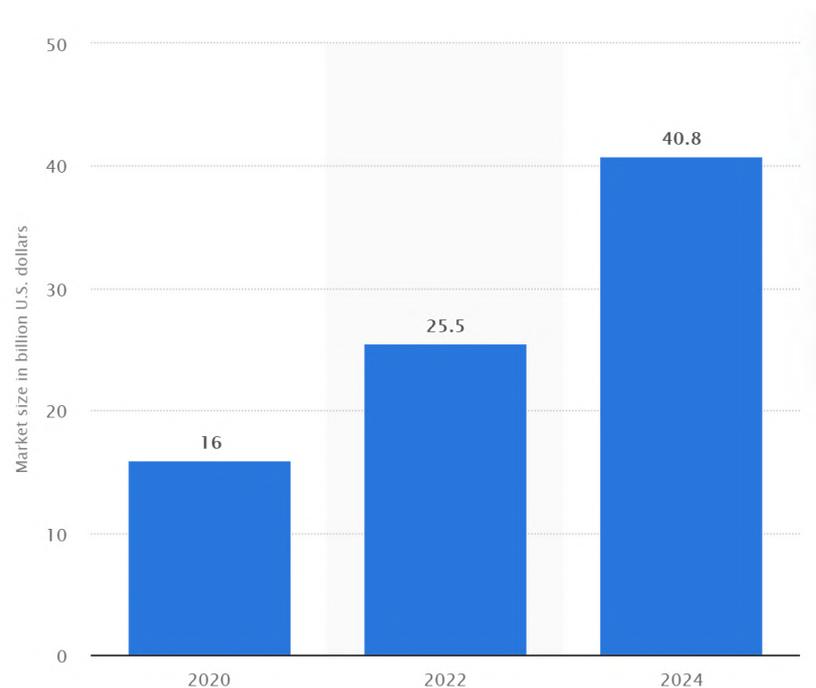
No que concerne a indústria do entretenimento, pode-se citar grandes empresas que não somente foram construídas nos pilares da indústria 4.0, como se utilizaram dela para revolucionar a forma como os seres humanos consomem seus serviços. Entre estas gigantes estão as empresas de áudio-visual Netflix, Amazon (Prime), Google (YouTube), Spotify e Deezer. Através da inteligência artificial e de gigantes bancos de dados, estas provedoras sugerem aos seus usuários serviços de streaming a gosto pessoal sem lhes exigir qualquer esforço, aumentando sua fidelidade e tempo dedicado ao seu consumo. Inevitavelmente, com toda a tecnologia disponível, novas necessidades surgem, de modo a acompanhar a evolução: um novo televisor inteligente e com imagens excelentes, um computador mais potente, um celular receptor de sinal 5G ou mesmo um aparelho de som de boa qualidade. Como consequência, os gastos dos usuários aumentam progressivamente com as novas tecnologias.

1.1 Justificativa

À medida que a evolução promovida pela indústria 4.0 atinge um maior número de pessoas, mais exposta é a necessidade de prover serviços de forma única a cada cliente. Mais que isso: é necessário que o produto seja recebido de forma rápida ou imediata. Segundo relatório de 2020 da CITE Research em parceria com a Dassault Systems apresentado na maior feira de tecnologia do mundo, a *Consumer Electronics Show* (CES), os consumidores querem produtos personalizados, mas não querem esperar muito para tê-los em mãos. Além disso, o relatório informa que consumidores pagariam 25,6% a mais para ter produtos que se adequassem ao seu estilo pessoal (DASSAULT SYSTEMS, 2020).

Visando atender a estas novas exigências de mercado, empresas do mundo inteiro desenvolvem novas tecnologias que possam dar suporte a esta realidade. Entre estas, é possível citar por exemplo a manufatura aditiva, conhecida popularmente como impressão 3D. Esta tecnologia possui números bem promissores para os próximos anos, chegando a um faturamento global de mais de 40 bilhões de dólares em 2024, Figura 1.

Figura 1 – Tamanho do mercado global de produtos e serviços de impressão 3D de 2020 a 2024.

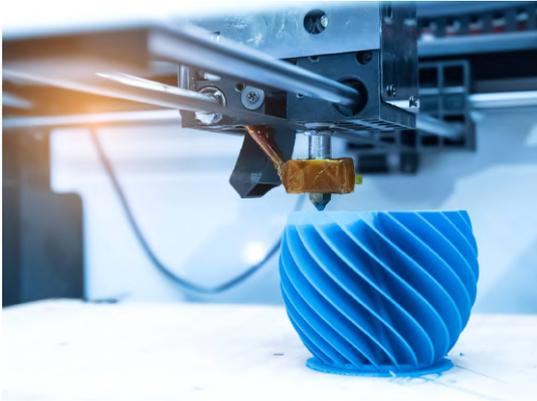


Fonte: STATISTA. *Global 3D printing products and services market size from 2020 to 2024*. 2020. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/315386/global-market-for-3d-printers/>>. Acesso em: 01-03-2021.

Resumidamente, a impressão 3D é uma tecnologia que permite a obtenção de objetos físicos precisos a partir de um modelo computacional. Os objetos podem tanto ser produzidos por modelagem de deposição fundida, estereolitografia ou sintetização seletiva a laser. Sua fácil implementação e versatilidade permitem variadas novas possibilidades de negócio, incluindo a

produção desde pequenos brinquedos a casas inteiramente personalizadas, como ilustradas nas Figuras 2 e 3.

Figura 2 – Impressão 3D em material polímero



Fonte: (FORTUNE, 2018).

Figura 3 – Impressão 3D de uma casa



Fonte: (KISSCOM, 2018).

Um dos segmentos que mais cresceram graças aos avanços industriais da última década foi o mercado da música. Somente em 2019, o Streaming de música cresceu 32% (COUNTERPOINT RESEARCH, 2020), correspondendo a mais de 50% da receita do ramo (IFPI, 2020). Para melhor aproveitar esta modernização, usuários têm investido cada vez mais em aparelhos sonoros, um mercado que promete crescer em esfera global mais de 3,3 bilhões de dólares até 2025, alavancado pela venda de aparelhos portáteis de som (REPORT LINK, 2020). Porém, ainda que haja um grande mercado nessa indústria, os aparelhos sonoros portáteis são ainda pouco personalizáveis e caros, variando de 120 a mais de 500 dólares.

Em geral, estes dispositivos são constituídos de um envoltório (caixa acústica) e de alto-falantes, que são transdutores que convertem energia elétrica em energia sonora. Os alto-falantes mais comumente utilizados são do tipo dinâmico, eletrodinâmico, eletroestático ou piezoelétrico. Os dois primeiros tipos listados possuem a característica de serem de extrema qualidade, porém são mais caros e requerem um maior espaço na carcaça do aparelho, quando comparados aos alto-falantes piezoelétricos. Os envoltórios, por outro lado, são em geral feitos de materiais polímeros ou madeira e tem o objetivo de proteger os alto-falantes e amplificar o seu som.

Assim, visando corresponder a esta demanda, a impressão 3D vem como uma possível solução que permite maior versatilidade na manufatura destes aparelhos, pois proporciona maior personalização, produção em diferentes materiais, além da redução de custos e do *lead time*.

1.2 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é a fabricação e caracterização de um aparelho sonoro constituído de alto-falantes piezoelétricos e de envoltório feito a partir de manufatura aditiva. Como requisitos, o aparelho deve ser capaz de permanecer na vertical, estar dentro de um volume

de 15 x 15 x 15 cm³ e possuir filtragem numérica implementada. Além disso, seu envoltório deve ser incorporado em ácido polilático (PLA). O trabalho será abordado tanto na gestão do projeto quanto na prática mecânica de fabricação.

1.3 Objetivos específicos

Na elaboração do trabalho, ficam os determinados seguintes objetivos específicos:

- Fazer a análise dos produtos similares existentes no mercado;
- Determinar o planejamento do projeto, por diagramas de PERT e Gantt;
- Fazer o análise de riscos do produto, que inclui análise FMEA e FOFA;
- Fazer a impressão 3D do envoltório da caixa de som;
- Conduzir testes sonoros da caixa de som, que incluem:
 - Análise de resposta de frequência
 - Análise de diretividade
 - Análise de nível de pressão sonora e eficiência do aparelho
 - Análise de taxa de distorção harmônica do aparelho
- Filtragem do sinal de entrada do aparelho

1.4 Estrutura do trabalho

O primeiro capítulo contempla a introdução do trabalho, descrevendo as justificativas do estudo, contextualizando-o e definindo seus objetivos específicos. O segundo capítulo reúne o acervo bibliográfico do trabalho. Nele são abordados definições e fundamentos que foram aplicados, além de conter estudos anteriores das mesmas áreas de conhecimento. O terceiro capítulo aborda a metodologia empregada tanto no projeto quanto na fabricação da caixa de som. O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos na gestão de projeto, também na fabricação e análises acústicas posteriores do produto. Por fim, o último capítulo aborda as conclusões do trabalho, além possíveis melhorias e sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo está concentrada a base teórica sobre a qual se apoia o trabalho. O trabalho é dividido em duas grandes partes, sendo elas a gestão do projeto e fabricação do produto.

2.1 Gestão de projeto e análise de riscos

Para Larson e Gray (2016), o "gerenciamento de projetos proporciona às pessoas um conjunto poderoso de ferramentas que aprimora a capacidade delas de planejar, implementar e gerenciar atividades para alcançar objetivos organizacionais específicos". Para este trabalho, serão utilizadas ferramentas de gestão e estratégia conhecidas no mercado, tais como diagramas SWOT, PERT, GANTT e FMEA.

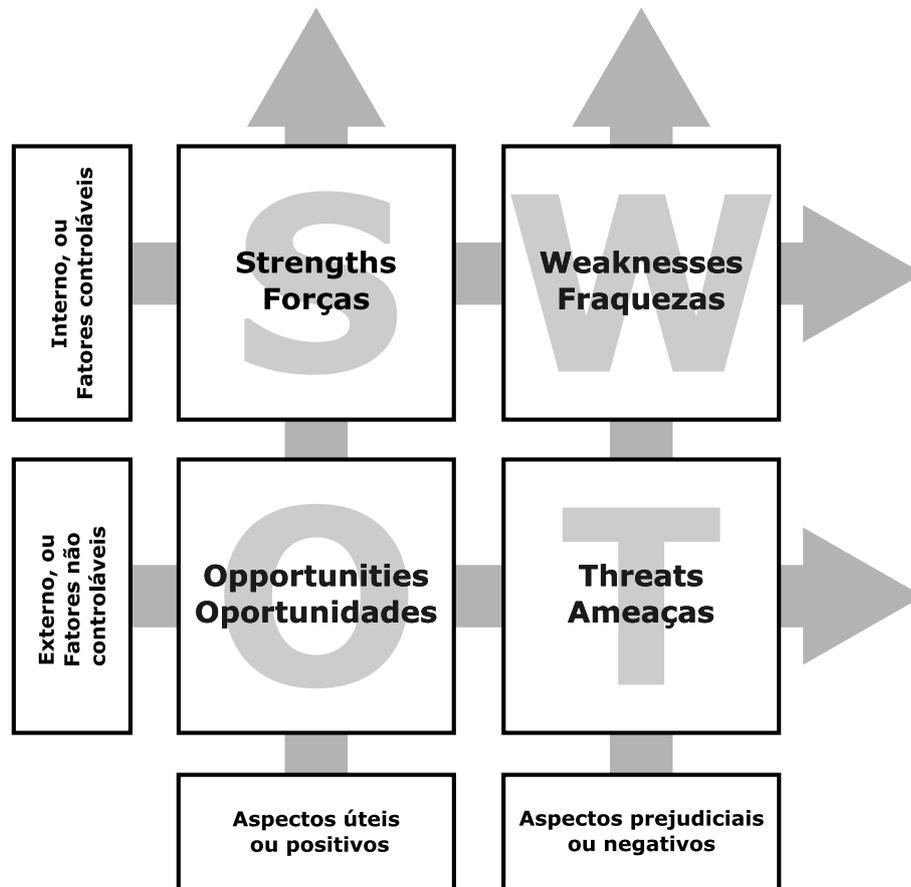
2.1.1 A análise FOFA (SWOT)

Dentro da elaboração de um projeto, um dos primeiros e mais importantes passos está no conhecimento de seus riscos embutidos internamente e externamente. Para tal, é em geral implementada uma metodologia para análise de diferentes cenários em planejamento estratégico, identificando as forças, fraquezas, ameaças e oportunidades da empresa/grupo. A ferramenta utilizada nesta análise preliminar de riscos é denominada matriz SWOT (do inglês, *strengths, weaknesses, opportunities e threats*) ou FOFA (Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças). Segundo Vieira et al. (2013), a análise SWOT é parte fundamental na implantação da estrutura organizacional de apoio de um projeto:

Aqui, basicamente, três dimensões devem ser exploradas em detalhes: o ambiente da empresa, o efetivo conhecimento em termos de gerenciamento de projetos e a capacitação dos recursos humanos. Isso permitirá produzir um retrato da realidade [...] e, por extensão, facilitar a definição das prioridades a ser privilegiadas na implantação do gerenciamento do projeto.

A matriz SWOT é dividida em 2 grandes partes, sendo elas os fatores controláveis (ou internos), e os fatores não controláveis (ou externos). Os fatores internos são aqueles que a própria empresa tem absoluto controle. Dentro desse grupo, encontram-se as forças e fraquezas da organização. Já os fatores externos são aqueles sobre os quais a empresa possui pouco ou nenhum controle. Dentro deste grupo estão as oportunidades e ameaças à organização (SARSBY, 2012). A Figura 4 ilustra uma matriz SWOT:

Figura 4 – Matriz SWOT comumente desenhada

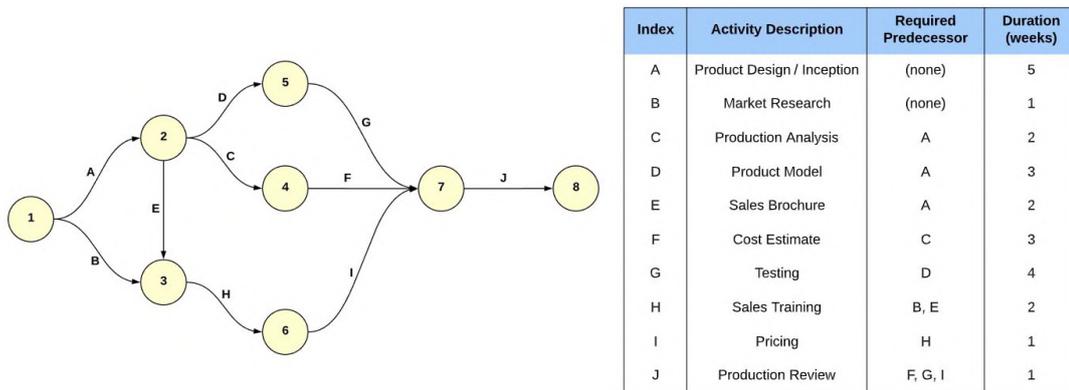


Fonte: Adaptado de SARSBY, A. *A Useful Guide to SWOT Analysis*. Nottingham: Pansophix Online, 2012.

2.1.2 Diagrama PERT

O diagrama PERT (*Program Evaluation and Review Technique*) é uma ferramenta de gerenciamento que permite planejar e visualizar a coordenação das atividades do projeto. Esta técnica utiliza um gráfico em rede, ligando tarefas entre si e indicando suas correlações com tarefas predecessores e seu tempo probabilístico de ocorrência. O PERT e técnicas relacionadas têm uma perspectiva mais macro, olhando os riscos gerais de custo e cronograma e pode ser usado em conjunto com o CPM (*Critical Path Method*) para encontrar a sequência de tarefas que mais consomem tempo no projeto. Um diagrama PERT/CPM é ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Diagrama PERT/CPM e suas respectivas tarefas e predecessores.



Fonte: LUCIDCHART. *O que é e como fazer diagrama de PERT.* – Disponível em: <<https://www.lucidchart.com/pages/pt/o-que-e-como-fazer-diagrama-de-pert>>. Acesso em: 24-02-2021.

O foco desta análise, então, não está em eventos avulsos, mas na probabilidade de que o projeto seja concluído no prazo e no orçamento. Esses métodos são úteis para avaliar o risco geral do projeto e a necessidade de fundos de contingência, recursos e tempo (LARSON; GRAY, 2016).

2.1.3 Diagrama de Gantt

Para que haja uma organização quanto as etapas do projeto, é indispensável que se sejam utilizados gráficos que possam auxiliar a equipe. O Gráfico de Gantt é uma representação na qual se utilizam barras, alocadas no eixo horizontal, para indicar o período de início e fim das atividades. É a forma mais comum, prática e sintética de se apresentar o cronograma do projeto (ROZENFELD et al., 2010). A Figura 6 ilustra um exemplo de gráfico de Gantt.

Figura 6 – Exemplo de gráfico de Gantt



Fonte: LARSON, E. W.; GRAY, C. F. *Gerenciamento de Projetos: o processo gerencial.* 6. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill education, 2016.

Desta forma, o balizamento de projeto incorporado no gráfico de Gantt permite que sejam avaliados o desempenho do projeto, tanto de forma local como global, possibilitando uma melhor conclusão a respeito de prazos e custos nele embutidos.

2.1.4 A análise FMEA

O FMEA (*Failure Mode Effect Analysis*), ou AMDEC (*do francês, Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité*), é uma metodologia qualitativa que permite, através de sessões de *brainstorming*, detectar potenciais modos de falhas e suas ocorrências (efeitos) dentro de uma indústria, projeto, processos, sistemas ou componentes. Além disso, ela identifica quais as melhorias a serem tomadas, uma vez que as falhas são detectadas.

Segundo Sakurada (2001), o modo de falha é a expressão utilizada para caracterizar o processo e o mecanismo de falha que ocorre nos itens analisados. O efeito, por outro lado, é a maneira como o modo de falha se manifesta. Cada item pode ter diferentes modos de falha. Um determinado modo de falha vai se tornar mais ou menos evidente, dependendo da função que o item está desempenhando naquele caso específico. O efeito, por sua vez, segue a mesma sistemática.

Para Puente et al. (2002), o FMEA é dividido em duas etapas. Durante o primeiro estágio, possíveis modos de falha de um produto ou processo e seus efeitos prejudiciais devem ser identificados. Durante a segunda fase, a equipe de engenharia que desenvolveu o FMEA determina o nível crítico (ou pontuação de risco) dessas falhas e prossegue para colocá-los em ordem, revisando cada detalhe do projeto e propondo as modificações relevantes. As falhas de maior grau de importância encabeçam a classificação e são consideradas em primeiro lugar durante a revisão do projeto. Os resultados desta análise são organizados perante uma matriz de gravidade de risco. A Figura 7 sintetiza as quatro perguntas básicas das seções do FMEA.

Figura 7 – As quatro questões básicas do FMEA

Modos de falha potencial	Possíveis efeitos	Possíveis causas	Plano de monitoramento
O que poderia ir mal?	Quais poderiam ser os efeitos?	Quais poderiam ser as causas?	Como fazer para enxergar estes modos de falha?

Fonte: Adaptado de LANDY, G. *AMDEC Guide pratique*. 2. ed. La Plaine Saint-Denis: AFNOR, 2007.

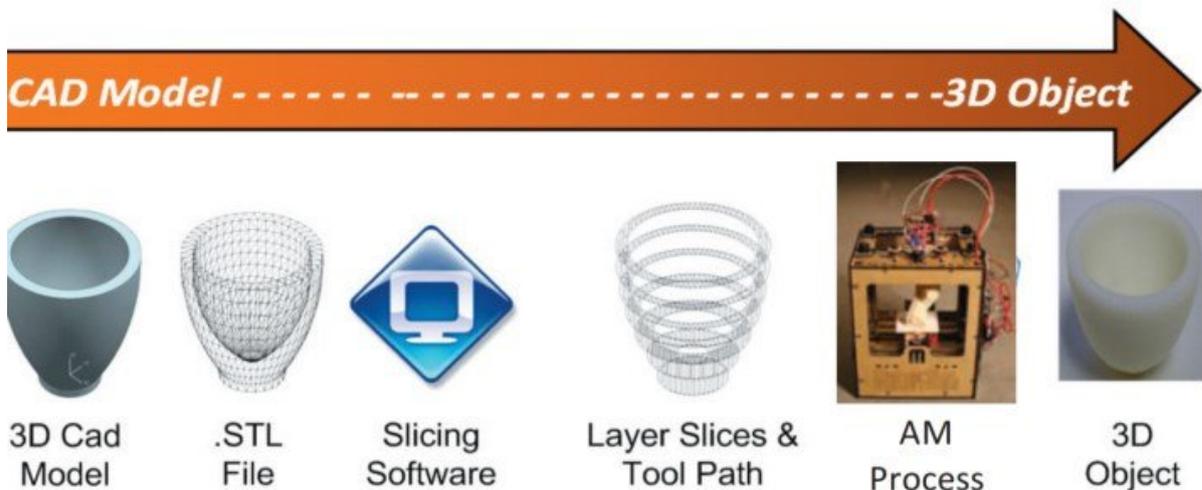
Desta forma, as principais vantagens de se utilizar o FMEA estão relacionadas com melhorias da qualidade, confiabilidade e segurança de produtos ou serviços, e na imagem e competitividade da empresa frente aos seus clientes e a satisfação destes. Além disso, o método seria instrumento de auxílio na escolha de alternativas de projetos que tenham melhor qualidade, confiabilidade e segurança, promovendo portanto a redução de tempo e custo de desenvolvimento (RABELO et al., 2012).

2.2 Impressão 3D e materiais utilizados

A manufatura aditiva, ou impressão 3D, é um processo que cria objetos físicos a partir de um arquivo numérico. Há diversos tipos de impressões 3D e com diferentes materiais, porém, todos seguem o mesmo princípio: um modelo digital se torna um objeto sólido tridimensional ao se adicionar matéria camada sobre camada.

Neste processo, o arquivo CAD inicial passa por tratamentos intermediários, como a conversão para um formato digital STL (*Stereo Lithography File Format*), que não possui quaisquer representações de cor e textura, como comumente são integrantes de desenhos CAD (IANCU et al., 2010). Na verdade, como aponta Laverne et al. (2016), o STL representa o objeto de forma estrutural através de elementos finitos triangulares, sendo ele um grande responsável pela qualidade impressa, pois em sua construção é determinada a densidade de elementos, bem como suas orientações. Após essa etapa, o arquivo é fatiado em camadas, de modo que a impressora o possa ler. A Figura 8 apresenta as diferentes etapas de uma impressão 3D.

Figura 8 – Passos gerais na produção de objetos através da impressão 3D



Fonte: CAMPBELL, T. et al. Could 3d printing change the world. Atlantic Council, Strategic Foresight Report, 2011.

A manufatura aditiva se mostra importante no mercado moderno dada a sua versatilidade quanto às formas impressas, sua fácil empregabilidade, além de permitir rapidez na visualização de pequenos protótipos. Além disso, há pouca necessidade de recurso humano na produção devido ao auto nível de automação empregado e também pouco desperdício de material. Portanto, a impressão 3D se torna um recurso atrativo devido ao seu baixo custo de produção e desperdícios controlados (ERASMUS, 2017).

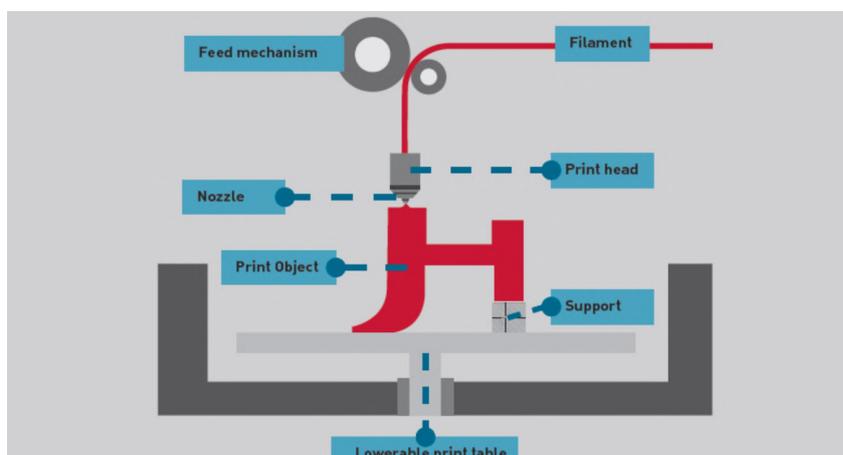
A integração da produção em massa, formatos padronizados e processos tecnológicos em sistemas de manufatura aditiva tornou-se uma tendência, estimulando a crescente capacidade de manufatura e software da indústria 4.0 (FORD SLN, 2014).

Mies et al. (2016) expõe 7 tipos diferentes de impressão 3D: laser melting (SLM), direct metal laser sintering (DMLS), selective laser sintering (SLS), fused deposition modelling (FDM), fused filament fabrication (FFF), stereo-lithographic (SLA), e laminated object manufacturing (LOM). Cada um destes tipos possui aplicações determinadas, preços distintos e com parâmetros de funcionamento específicos, tais como os materiais utilizados e a velocidade de impressão. Porém, para este trabalho, será melhor explorada a tecnologia FDM, que é uma das mais simples e a mais utilizada entre os tipos de impressão 3D existentes.

2.2.1 A impressão 3D FDM

O FDM -*Fused Deposition Modeling*-, em português Modelagem de Deposição Fundida é um método de prototipagem inventado em 1989, cujo mecanismo consiste na extrusão de material fundido, formando o sólido camada por camada (MAKERBOT, 2020). Seu simples e barato mecanismo fazem do FDM o tipo de impressão 3D mais comum em casas e empresas de tecnologia. O material em formato de filamento é fornecido por uma bobina giratória e extrudado por um bocal aquecido, como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Princípio de funcionamento do FDM



Fonte: ERASMUS. *IO1 – Methodology for defining 3D printing exercises suitable for transversal education*. [S.l.]: ERASMUS3D+, 2017.

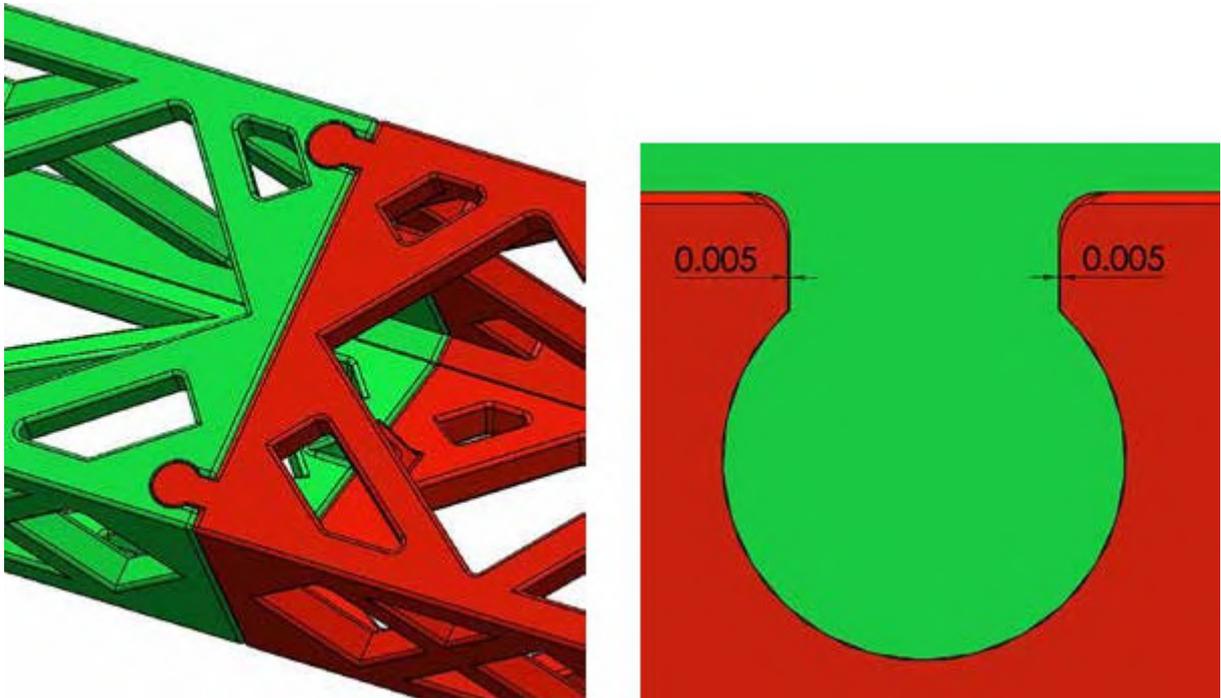
O princípio de funcionamento do FDM consiste em aquecer o material acima de sua temperatura de fusão e, em seguida, extrudá-lo por meio de um bocal que se movimenta num plano horizontal (LAVERNE et al., 2016). À medida que o material fundido é depositado, ele se solidifica quase instantaneamente. Após o término do desenho de uma camada, o bocal sobe (ou a plataforma desce) na espessura do filamento fundido para que a impressora comece a trabalhar sobre a camada seguinte e, assim, formando o objeto tridimensional.

2.2.2 Materiais utilizados na impressão 3D FDM

Desde que o FDM foi inventado, a tecnologia por trás de seus materiais obteve um grande avanço na indústria. O que no começo não passavam de materiais compostos de um misto de cera e plástico, hoje em dia uma grande gama de novos materiais vem sendo desenvolvida após a popularização das impressões 3D (MAKERBOT, 2020). Estes materiais podem variar conforme sua utilidade, podendo alguns serem mais resistentes, outros com melhor acabamento, mais ou menos densos, ou com preços mais acessíveis.

Mais especificamente, de acordo com a Stratasys (2015), as considerações na escolha de um material para a impressão 3D podem variar segundo sua aplicação, geometria, função e pós-processamento. No que diz respeito às aplicações e funções, um material, por exemplo, pode ser exposto à altas temperaturas ou condições extremas, além de estar sob fortes tensões. Já em relação à sua geometria, o material pode ter que corresponder a condições milimétricas únicas, tais como espessura e baixas tolerâncias dimensionais, Figura 10. Por fim, alguns materiais podem ser mais adequados para alguns métodos de pós-processamentos, tais como tratamentos térmicos ou pós cura de certos polímeros, por exemplo.

Figura 10 – Encaixe de alta exigência dimensional



Fonte: STRATASYS. *Design Considerations for FDM Additive Manufacturing Tooling*. 2020.

Como mencionado por Laverne et al. (2016), os materiais utilizados no FDM são polímeros termoplásticos. Estes materiais contêm estruturas lineares e ramificadas, e portanto possuem a característica de amolecerem quando aquecidos e endurecerem quando resfriados num processo totalmente reversível (CALLISTER; RETHWISCH, 2014). Assim, os termoplásticos, dadas

as suas características, são perfeitos para a aplicação da manufatura aditiva FDM, podendo ser reciclados, desde que suas propriedades moleculares não sejam degradadas devido a elevadas temperaturas.

MakerBot (2020) classifica os principais polímeros utilizados no FDM de acordo com as suas utilizações, Figura 11:

Figura 11 – Empregabilidade de diferentes termoplásticos no FDM

	Conceptual Prototyping	Functional Prototyping	Manufacturing Aids	End-Use Parts
ASA	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
ABS	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
NYLON	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
PET-G	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
TOUGH	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
PLA	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
PC-ABS	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
PC-ABS FR	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
Nylon Carbon Fiber	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓

Fonte: MAKERBOT. 2020 *Guide to 3d printing materials*. 2020.

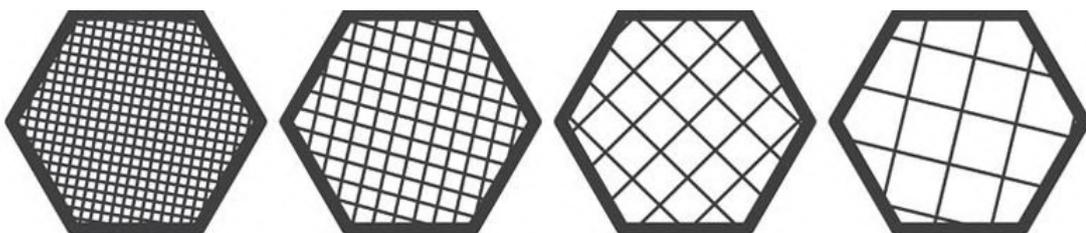
Como pode ser observado na Figura 11, o ácido polilático (PLA) é extremamente adequado para fabricação de protótipos. Isso se dá pela sua atrativa relação custo x propriedades mecânicas, além de boa disponibilidade no mercado e permitir a obtenção de bons componentes de tolerância razoável. Outra atratividade do PLA está no fato de ser biodegradável e não emitir odores durante o processo de impressão. Entretanto, as propriedades deste termoplástico devem ser levadas em consideração a depender de sua aplicabilidade: o PLA tem maior rigidez e resistência a tração, se comparado ao Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), o polietileno (PE) e polipropileno (PP), por exemplo (MAZZANTI et al., 2019).

2.2.3 Parâmetros da impressão 3D

Segundo Fernandes (2016), a quantidade de parâmetros que são possíveis de alterar numa impressão 3D varia com os softwares. Porém, os mais típicos são:

- **Altura da camada:** possui grande influência na qualidade de produto final, podendo variar 0,05 milímetros a 0,4 milímetros. Quanto menor a altura, melhor é o acabamento e mais longa é a duração da impressão.
- **Velocidade de impressão:** é definida como a velocidade de movimentação do bocal no plano horizontal. Quanto maior a velocidade, menor é a qualidade da impressão, entretanto, menor é tempo de obtenção do objeto. Um outro ponto a ser considerado é o fato de as impressões possuírem velocidades de impressão distintas segundo os materiais utilizados, visto que seus pontos de fusão diferem uns dos outros.
- **Densidade e orientação de preenchimento:** definem o formato do preenchimento e o quão oco o objeto impresso será, influenciando em suas propriedades mecânicas. Um objeto com um preenchimento denso terá maior resistência a tração e compressão, por exemplo. Entretanto, quanto mais denso é o preenchimento, mais demorada é a impressão e maior é gasto com o filamento. A Figura 12 apresenta diferentes orientações e densidades de preenchimento para um mesmo objeto.
- **Espessura da parede:** assim como as definições de preenchimento, é um parâmetro importante na construção mecânica do objeto. A escolha de uma parede mais espessa pode estar relacionada também ao pós processamento, a depender da necessidade de seu refino para um melhor acabamento. Paredes mais espessas consomem maior tempo e material de impressão.
- **Temperatura de impressão:** pode variar de acordo com o material utilizado devido as suas diferentes temperaturas de fusão, e também variar de acordo com a taxa de extrusão.
- **Suportes:** pode haver necessidade de suportes, dependendo do objeto a ser impresso, devido a ação da gravidade.

Figura 12 – Estruturas de preenchimento com diferentes densidades e orientações

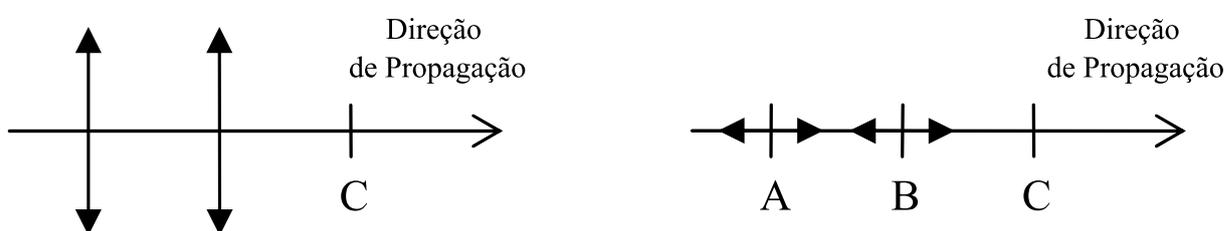


Fonte: FERNANDES, J. F. M. *Estudo da Influência de Parâmetros de Impressão 3D nas Propriedades Mecânicas do PLA*. Dissertação (Mestrado) — Técnico Lisboa, Lisboa, oct. 2016.

2.3 O som

Para entender a natureza do som, primeiramente deve-se recorrer à definição de ondas sonoras. Como elucida Borges e Rodrigues (2016), as ondas sonoras são ondas mecânicas que podem propagar-se através de um meio elástico, podendo ele ser um líquido, um sólido ou um gás. Os meios elásticos tendem a preservar a sua forma, comprimento e volume quando submetidos a forças externas, devido a ação de forças restauradoras. Se tratando de propagação de ondas através de um meio fluido, apenas poderá haver a transmissão de ondas longitudinais, também conhecidas como ondas de compressão, Figura 13.

Figura 13 – Onda transversal e longitudinal, à esquerda e direita, respectivamente. Ondas transversais provocam deslocamento perpendicular das partículas do meio em relação à direção de propagação. Ondas longitudinais provocam deslocamento paralelo das partículas do meio em relação à direção de propagação.



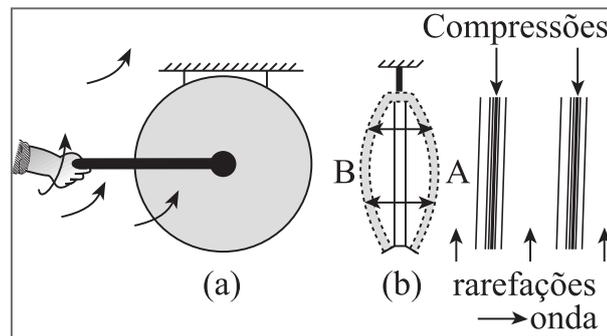
Fonte: Adaptado de BRUNEAU, M. *Manuel d'acoustique fondamentale. English*. London: Iste, 2006.

O som é o resultado da vibração de corpos materiais. Portanto, isto significa que sempre que se escuta um som, é porque algum corpo está vibrando. A propagação das diferenças de pressão no ar resultante de uma fonte de perturbação produz a vibração de materiais elásticos adjacentes, o que inclui o tímpano humano, por exemplo. Nussenzveig (2014) exemplifica a natureza do som com o soar de um gongo golpeado, como aquele ilustrado na Figura 14:

Quando o gongo está na posição A, ele comprime as porções adjacentes da atmosfera, e a compressão vai se transmitindo sucessivamente de cada camada às camadas adjacentes (onda de compressão). Quando o gongo retorna para trás, passando à posição B, cria-se uma zona de rarefação, e o ar da região contígua se desloca para preenchê-la, e assim sucessivamente, produzindo uma onda de expansão. A onda sonora resulta da propagação das camadas de condensação e de rarefação alternadas.

Dessa forma, ainda segundo o autor no dado exemplo, o deslocamento de ar provocado pelo gongo muda a densidade do ar na camada adjacente (condensação ou rarefação), resultando numa mudança de pressão (compressão ou descompressão).

Figura 14 – Gongos percutido



Fonte: NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica, 2: fluidos, oscilações e ondas, calor*. 5. ed. São Paulo: Blucher, 2014.

2.3.1 Propriedades ondulatórias do som

Sendo então o som uma onda mecânica, ele possui componentes tanto espaciais como temporais que o caracterizam. De um modo geral, o deslocamento longitudinal do elemento oscilante provocado por uma fonte sonora é dado por:

$$S = S_m \cos(kx - \omega t) \quad (2.1)$$

Em que k é o número de onda, ω é a frequência angular e S_m é a amplitude da onda, ou seja, o deslocamento máximo das moléculas de ar oscilantes. O deslocamento máximo S_m é muito menor que o comprimento de onda sonora. Isso acontece, pois, para este tipo de onda, as variações de pressão e densidade no ar são muito pequenas quando comparadas aos valores de equilíbrio dessas grandezas. Isso se reflete, por exemplo, na ordem de grandeza em geral da intensidade sonora, que é extremamente baixa.

Assim como o deslocamento longitudinal, a variação de pressão da onda para um determinado ponto do espaço e tempo pode ser definida por uma equação:

$$\Delta p = \Delta p_m \sin(kx - \omega t) \quad (2.2)$$

Em que Δp_m é a amplitude de pressão. Um valor negativo de Δp na Equação 2.2 corresponde a uma rarefação, ao passo que um valor positivo corresponde a uma compressão. O deslocamento máximo S_m e a variação de pressão máxima Δp_m se relacionam pela equação dada por:

$$\Delta p_m = v \rho \omega S_m \quad (2.3)$$

Em que v é a velocidade da onda e ρ é a massa específica do meio onde a onda se propaga. A velocidade da onda sonora, por sua vez, depende exclusivamente do meio de propagação. A

relação que dita como as ondas sonoras se propagam em diferentes fluidos é apresentada por:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \tag{2.4}$$

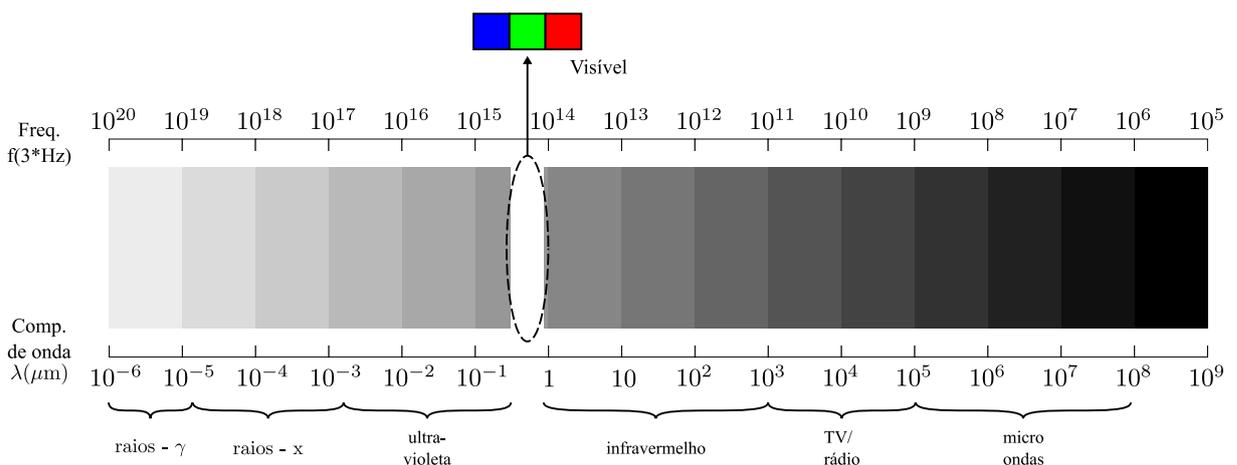
Em que B é o módulo de elasticidade volumétrico dos fluidos ou módulo de Young nos sólidos. Tanto B quanto ρ são sensíveis a diferentes temperaturas. Portanto, o valor da velocidade do som varia não somente com o fluido ou sólido de propagação, mas também com mais essa condição física. A velocidade do som no ar ao nível do mar é de cerca de 343 m/s, a uma temperatura de 20°C (BORGES; RODRIGUES, 2016).

Se tratando de ondas e movimentos oscilatórios, uma característica fundamental é a frequência de emissão de onda ou do movimento. Em relação às ondas, suas diferentes frequências correspondem a distintos níveis de energia e características. A frequência, medida em Hertz, se relaciona com a frequência angular por:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \tag{2.5}$$

Em ondas eletromagnéticas, o espectro eletromagnético ilustra os tipos de ondas, que podem ser visíveis ou não - o que caracteriza suas cores ou transparência - e ao mesmo tempo indica seus níveis energéticos. Dessa forma, ondas com diferentes frequências possuem nomenclaturas variadas, como raios X, raios gama, micro-ondas, ondas de radio e luz visível. Além das anteriores, outras classificações dentro do espectro são as ondas do infra vermelho e ultra violeta, sendo estas as bordas daquilo que o ser humano é capaz de ver, como ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Espectro eletromagnético

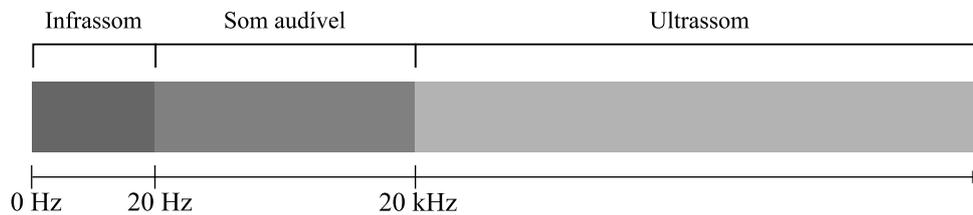


Fonte: Adaptado de MICHA, D. N. et al. "vendo o invisível". experimentos de visualização do infravermelho feitos com materiais simples e de baixo custo. 2011.

É interessante notar que, assim como em ondas eletromagnéticas, também há um espectro para ondas sonoras. Este, porém, é constituído de menos divisões, entre elas o infrassom e o ultrassom. O infrassom é uma onda sonora que possui uma frequência inferior a 20 Hz. Já o

ultrassom é uma onda sonora que possui 20.000 Hz de frequência. A banda de frequência entre 20 Hz e 20.000 Hz compreende as ondas sonoras que os seres humanos, na média, são capazes de ouvir. Esta faixa é conhecida como som audível. A Figura 16 ilustra o espectro sonoro.

Figura 16 – Espectro sonoro



Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados apresentados por Borges e Rodrigues (2016)

Se para as ondas eletromagnéticas, a frequência distingue os tipos de ondas existentes, nas ondas sonoras não é diferente. É chamada altura de um som a característica que permite distinguir entre sons mais graves e mais agudos. Quanto maior a frequência, mais agudo (alto) o som é. Por outro lado, quanto menor a frequência, mais grave (baixo) o som é.

Além disso, se para ondas eletromagnéticas tem-se a cor branca, que é composta de todas as cores do espectro, i.e., das frequências de cores, nas ondas sonoras tem-se o que é chamado de ruído branco. Um ruído, por definição, é uma oscilação acústica aperiódica produzida com a soma de várias oscilações audíveis em diferentes frequências (BORGES; RODRIGUES, 2016). Assim, o ruído branco é um ruído que possui intensidade constante para diferentes frequências. Ou seja, ele é um sinal de potência para uma largura de banda centrada em f_0 que não se altera se f_0 se altera (CARTER; MANCINI, 2017).

2.3.2 Níveis de intensidade e pressão sonoros

Uma outra importante propriedade de uma onda sonora é a sua intensidade. A intensidade de energia de uma onda sonora é entendida como a razão da taxa média de energia transmitida por área. A taxa média da energia transmitida pela onda é a potência, definida como $P = \Delta E / \Delta t$. Dada a definição de intensidade, tem-se que:

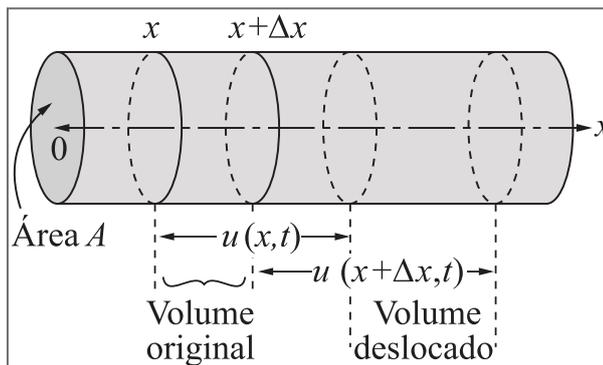
$$I = \frac{P}{A} = \frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t} \quad (2.6)$$

Em que P é a potência e A a área. Supondo o tubo da Figura 17 e supondo uma onda unidimensional que se propaga dentro do tubo, pode ser demonstrado que a intensidade I da onda é expressa pela seguinte equação:

$$I = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 S_m^2 \quad (2.7)$$

Em que ρ é a densidade do meio de propagação, v é a velocidade de propagação da onda, ω a frequência angular e S_m a amplitude do deslocamento longitudinal da onda.

Figura 17 – Volume deslocado de ar num tubo aberto com uma onda de compressão se propagando em seu interior



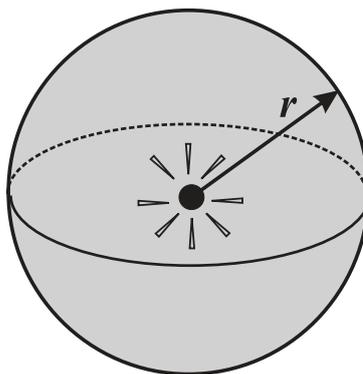
Fonte: NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica, 2: fluidos, oscilações e ondas, calor*. 5. ed. São Paulo: Blucher, 2014.

Verifica-se, então, que a intensidade de uma onda sonora é proporcional ao quadrado da frequência, bem como ao quadrado da amplitude. Assim, quanto maior a frequência e amplitude de uma onda sonora, mais energia ela transmite.

Para o caso de uma fonte pontual, como apresentada na Figura 18, tem-se que a intensidade da onda decai com o inverso do quadrado da distância da fonte:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \tag{2.8}$$

Figura 18 – Energia sonora irradiada esfericamente por um fonte pontual

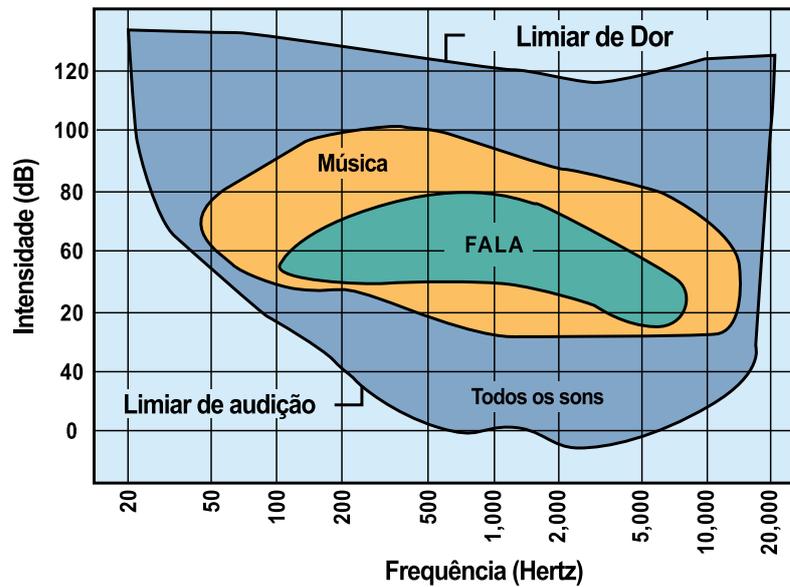


Fonte: BORGES, A. N.; RODRIGUES, C. G. *Introdução à física acústica*. 2016.

Como consequência física, pode ser demonstrado que tanto o deslocamento S_m da onda quanto a sua amplitude de pressão Δp_m decaem com $1/r$.

O limiar de audibilidade é definido como o som mais fraco que pode ser ouvido. O seu valor depende essencialmente da frequência da onda, Figura 19. Para uma frequência de 1000 Hz, por exemplo, o ser humano é capaz de ouvir um som com intensidade mínima de $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

Figura 19 – Limiar de audibilidade de uma pessoa



Fonte: NISHIDA, S. M. Curso de fisiologia 2012 ciclo de neurofisiologia. Botucatu, 2012.

Os diferentes níveis sonoros que se pode ouvir não variam de forma linear, mas exponencialmente. Isso quer dizer que, por exemplo, $I_2 = 3I_1$ não produz intensidade suficientemente grande para que se possa ter a sensação de escutar um som 3 vezes mais intenso. Por essa razão, o nível de intensidade sonora em geral não é medido em escala proporcional linear, mas numa escala logarítmica. O nível de intensidade sonora é definido como:

$$\beta = \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (2.9)$$

Em que I é a intensidade sonora da onda e I_0 é a intensidade de referência de valor $1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$. A unidade dessa medida β é o bel (B). Porém, é mais usual que se use o decibel (dB) como unidade de nível de intensidade sonora:

$$NIS = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (2.10)$$

Portanto, para cada bel adicional, tem-se uma variação resultante de intensidade 10 vezes maior que a inicial. Da mesma forma, pode-se definir o nível de pressão sonora, medido em decibels, como:

$$NPS = 20 \log \left(\frac{\Delta p}{\Delta p_0} \right) \quad (2.11)$$

Em que Δp_0 é a pressão de referência equivalente ao menor som audível. O valor de Δp_0 é de $20 \times 10^{-6} \text{ Pa}$. Uma variação de 2 vezes da pressão sonora significaria, portanto, um aumento de 6 dB. Para efeitos de comparação, uma conversação normal a 1 metro de distância possui um nível sonoro de aproximadamente 60 dB. Por outro lado, uma decolagem a jato poderia chegar

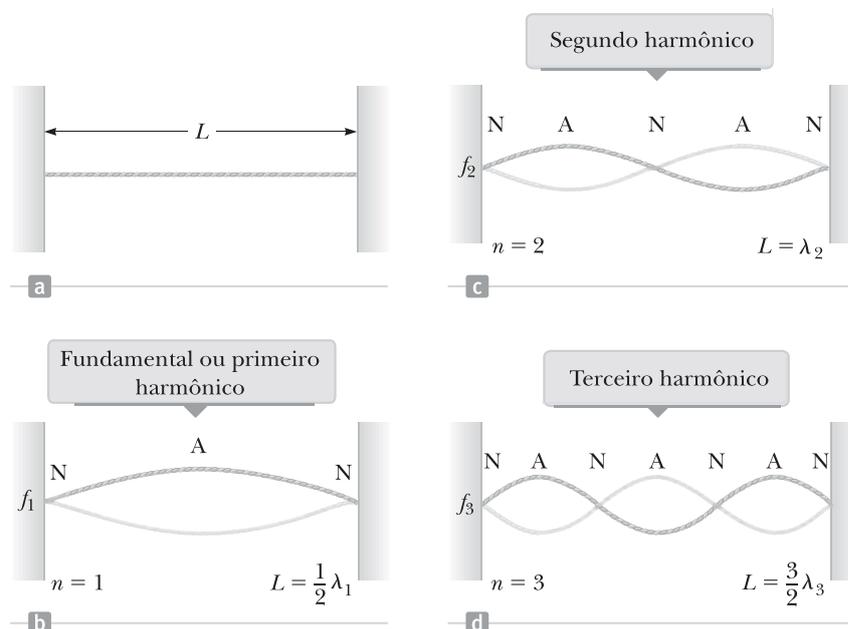
a 140 dB, a uma distância de 50 metros (BORGES; RODRIGUES, 2016). Esse nível sonoro, como apresentado na Figura 19, começaria a produzir sensações dolorosas.

2.3.3 Modos de vibração e ressonância

Todas as estruturas possuem frequências naturais de oscilação. Caso uma estrutura seja submetida a uma força periódica externa de frequência igual a uma de suas frequências naturais, a sua amplitude de oscilação atingirá níveis máximos. Este fenômeno é chamado de ressonância. Um dos exemplos mais clássicos de ressonância é verificar como se comportam as ondas em uma corda com uma de suas extremidades fixa.

As ondas estacionárias produzidas nesse caso criam padrões bem definidos. Estes padrões, denotados modos normais, são formados pela superposição resultante de reflexões sofridas pelas ondas nas extremidades da corda. Os modos normais de vibração são infinitos e podem ou não ser múltiplos inteiros do primeiro modo. Os modos que seguem essa característica recebem o nome de harmônicos. Os pontos da corda que apresentam deslocamento transversal nulo são chamados de nós. Já os pontos que apresentam deslocamento máximo são chamados de antinós. A Figura 20 ilustra 3 diferentes modos ressonantes para o exemplo da corda.

Figura 20 – Diferentes modos normais em uma corda oscilada a diferentes frequências harmônicas

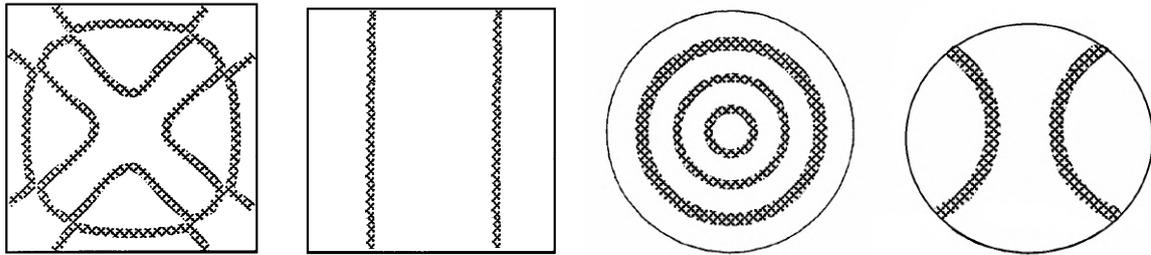


Fonte: SERWAY, R. A.; JR, J. W. J. *Princípios de física - Oscilações, ondas e termodinâmica*. 5. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015.

Pode-se demonstrar que o fenômeno de ressonância também ocorre para ondas sonoras estacionárias. Desta forma, ele pode tanto ocorrer para tubos de ar abertos e fechados quanto para membranas. No caso das membranas, os modos normais de vibração não são harmônicos do primeiro modo. No experimento de Chladni, Figura 21, em que se coloca areia sobre a superfície

de uma membrana fina vibrante, é possível verificar as linhas nodais segundo diferentes modos de vibração. As figuras de Chladni são vistas também em instrumentos de percussão e no tampo de instrumentos de corda, como o violão.

Figura 21 – Diferentes modos normais em uma membrana vibrante. A areia inicialmente depositada na membrana em repouso se acumula sobre as linhas nodais, que possuem amplitude zero

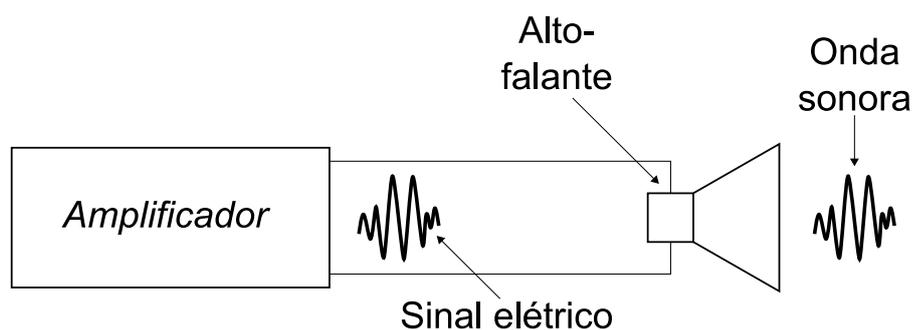


Fonte: BORGES, A. N.; RODRIGUES, C. G. *Introdução à física acústica*. 2016.

2.4 Os Alto-falantes

Segundo Braga (2015), transdutores são dispositivos que convertem uma forma de energia em outra. Motores, antenas, geradores, fotocélulas e microfones são exemplos de desses mecanismos comumente utilizados. Nesse sentido, os alto-falantes são dispositivos transdutores que convertem sinais elétricos em ondas sonoras. Eles recebem um sinal elétrico com uma determinada frequência e forma de onda e o convertem em som, Figura 22.

Figura 22 – Esquema representativo da conversão de sinais elétricos em sonoros

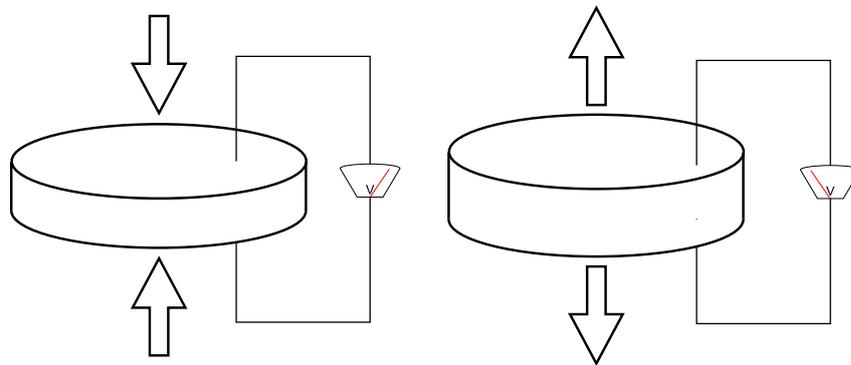


Fonte: Adaptado de BRAGA, N. C. *Curso de Eletrônica - Fundamentos de Som e Acústica*. 1. ed. São Paulo: Institute NCB, 2015.

2.4.1 Princípio de funcionamento de alto-falantes

Sabendo-se que as ondas sonoras são produzidas devido a vibração de materiais elásticos, o intuito do alto-falante está em fazer vibrar de forma controlada uma membrana, produzindo o som. Em geral, sua construção é feita com um ímã permanente, uma bobina e um diafragma.

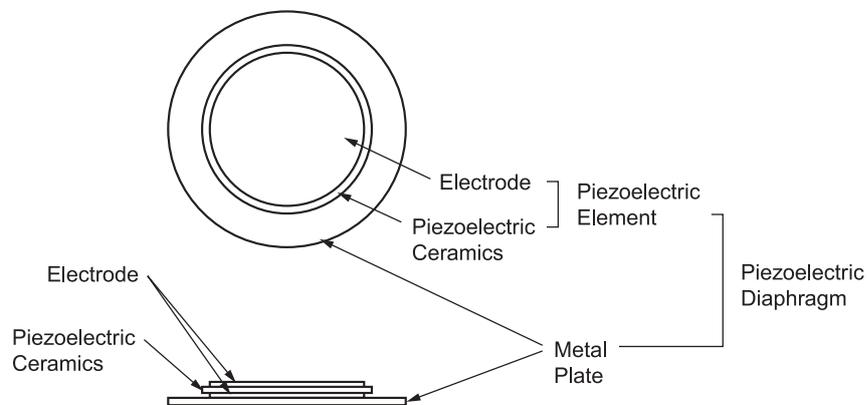
Figura 25 – Princípio de funcionamento de um material piezoelétrico, que ao ser deformado produz diferença de potencial



Fonte: Elaborado pelo autor

Um transdutor piezoelétrico, portanto, é constituído de um material que possua tal efeito quando deformado. Geralmente são feitos de cristais de quartzo ou de certas cerâmicas. Um alto-falante piezoelétrico tem como principal componente um transdutor deste tipo, como apresentado na Figura 26, que é excitado por um sinal de alta tensão.

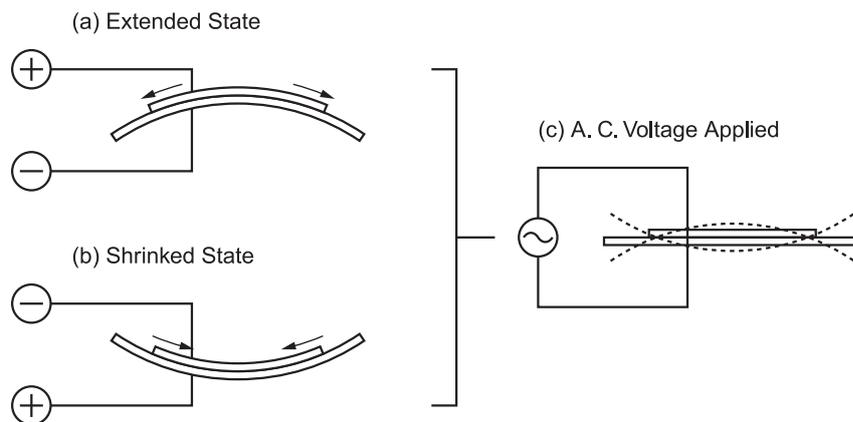
Figura 26 – Transdutor piezoelétrico normalmente empregado em alto-falantes



Fonte: MURATA. *Piezoelectric Sound Components*. 2017.

O transdutor, então, quando aplicada uma tensão alternada, faz vibrar uma membrana. Esta, por sua vez, produz ondas sonoras no ar. A Figura 27 ilustra o comportamento de um pequeno prato piezoelétrico quando nele é aplicada uma tensão alternada. Como os materiais utilizados em sua fabricação possuem alta impedância, a resposta de frequência desses dispositivos é restrita a bandas elevadas.

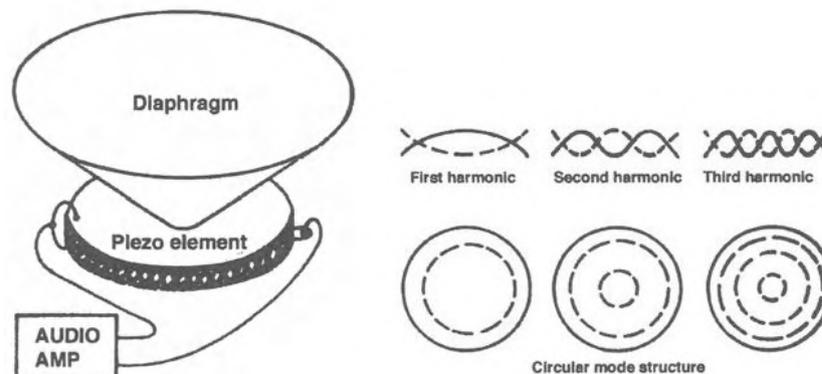
Figura 27 – Sistema oscilador piezoelétrico



Fonte: MURATA. *Piezoelectric Sound Components*. 2017.

Em geral, os alto-falantes piezoelétricos não possuem uma resposta muito suave, devido aos múltiplos modos normais em alta frequência (EARGLE, 2003), como apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Modos normais de vibração em uma membrana

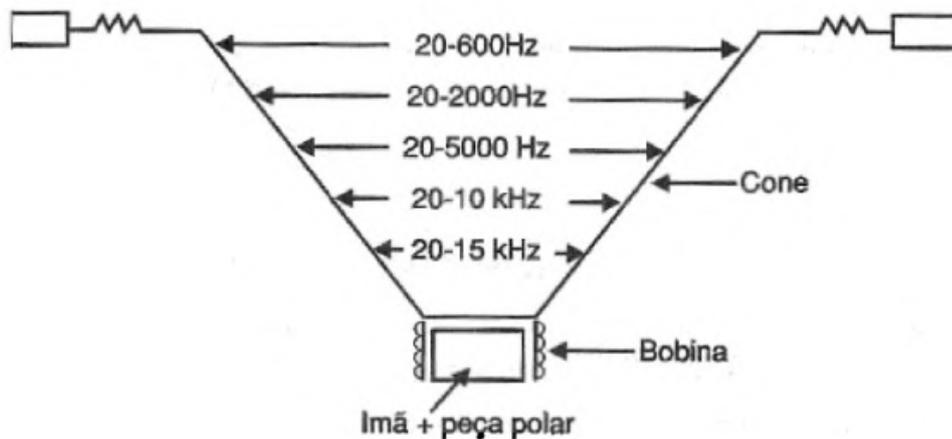


Fonte: EARGLE, J. *Loudspeaker Handbook*. 2. ed. Boston: Kluwer Academic, 2003.

2.4.3 Influência da geometria do cone

Os alto-falantes podem ter diferentes construções que visam obter o melhor rendimento segundo determinadas frequências de utilização. Devido às características das ondas acústicas e também à elasticidade do material utilizado no cone, a reprodução do som no alto-falante ocorre com maior ou menor intensidade em certas zonas. Essa intensidade varia com a frequência do som, como ilustrado na Figura 29. Por isso, pode ser observado uma reprodução mais intensa de sons agudos na zona central, enquanto que os médios ficam na região intermediária e os graves na periferia.

Figura 29 – Certas regiões do cone favorecem diferentes frequências



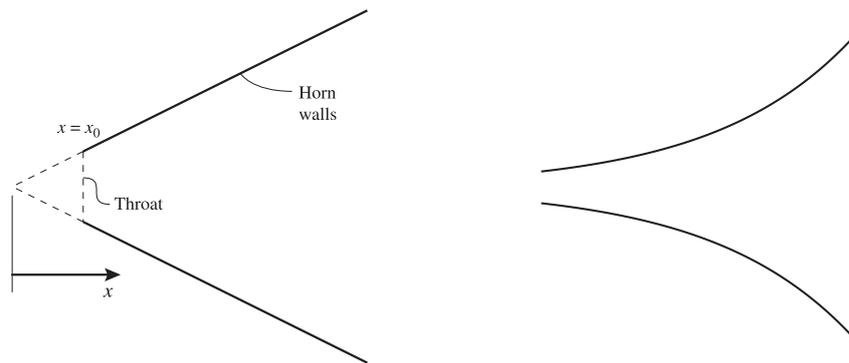
Fonte: BRAGA, N. C. *Curso de Eletrônica - Fundamentos de Som e Acústica*. 1. ed. São Paulo: Institute NCB, 2015.

Os alto-falantes, em geral, não possuem rendimento igual em todas as faixas de frequência. Por essa razão, opta-se por limitar um alto-falante a uma banda de frequência específica, adotando-se, então, uma geometria adequada para tal. Portanto, não é difícil encontrar alto-falantes com nomenclaturas diferentes para cada altura acústica:

- Woofers - Sons graves (Frequência abaixo de 500 Hz)
- Mid-Range - Sons médios (Frequência entre 500 Hz e 5 kHz)
- Tweeter - Sons agudos (Frequência acima de 5 kHz)
- Extended-Range - Sons abaixo de 5 kHz
- Full Range - Todo banda de frequência do som audível

Em especial ao tweeters, a geometria da corneta pode variar segundo o projeto. As cornetas, ou horns, funcionam como guias de ondas que aumentam progressivamente de uma pequena para uma grande extremidade de forma constante (horn cônico) ou exponencial. Segundo Borwick (2001), elas são usadas para dar maior controle de diretividade e eficiência ao alto-falante, evitando as fugas laterais ondulatórias que podem ocorrer.

Figura 30 – Dois tipos de horns: cônico e exponencial, respectivamente.



Fonte: Adaptado de BORWICK, J. *Loudspeaker and Headphone Handbook*. 3. ed. Oxford: Focal Press, 2001.

Horns cônicos tendem a fornecer melhor controle de diretividade, enquanto horns exponenciais dão maior eficiência ao alto-falante, especialmente em frequências mais baixas.

Além da geometria do cone, o material da membrana é também importante na qualidade do som. Kim et al. (2012) investigaram as características de três tipos de diafragmas diferentes. Em seu trabalho, concluiu-se que a melhor resposta de frequência era obtida pelo material mais flexível e macio, o que reduz a frequência de ressonância fundamental. Foi demonstrado que a frequência angular de vibração de uma membrana (no caso, retangular) é proporcional à raiz quadrada do módulo de Young do material e de sua espessura:

$$\omega_{m,n} = \sqrt{\frac{Ed}{\rho R} \left[\left(\frac{mr}{a}\right)^2 + \left(\frac{nr}{b}\right)^2 \right]} \quad (2.12)$$

Em que E é o módulo de Young, d é a distância do linha neutra até a superfície da membrana, R é o raio de curvatura da membrana na linha neutra, ρ é a massa específica da membrana e a e b são as dimensões laterais da membrana e m e n são números naturais.

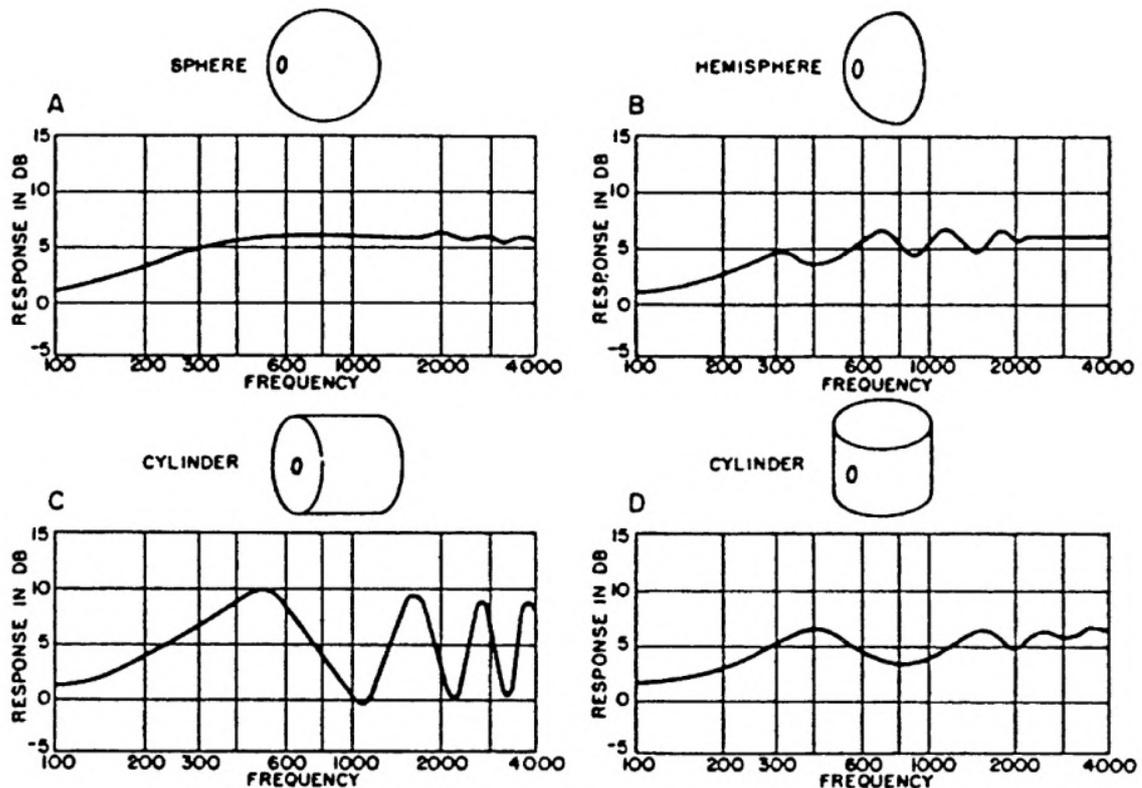
2.4.4 A caixa acústica e o amplificador

Os alto-falantes não podem funcionar livremente, sem que estejam numa caixa com determinadas características acústicas. As caixas acústicas são mais que simples envoltórios que protegem o alto-falante: elas amplificam o som, principalmente de baixas frequências, além de dar maior rendimento ao dispositivo. Na verdade, como aponta Borwick (2001), embora a função primária da caixa acústica esteja em realçar as ondas de baixa frequência, há também fenômenos que afetam a performance em altas frequências, como ressonâncias acústicas e difração. Um sistema com alto-falante, portanto, deveria considerar essa multiplicidade de fatores.

Em geral, os fabricantes de alto-falantes levam em consideração o formato do envoltório, bem como seu material ao projetarem uma caixa de som. A Figura 31 apresenta como de fato a geometria da caixa acústica afeta a resposta de frequência das caixas de som. As caixas acústicas

podem ter mais de 3 alto-falantes, cada qual com finalidades diferentes quanto a frequência de emissão, seguindo o que foi apresentado em 2.4.3.

Figura 31 – Influência da geometria do envoltório na resposta de frequência



Fonte: Adaptado de BORWICK, J. *Loudspeaker and Headphone Handbook*. 3. ed. Oxford: Focal Press, 2001.

Tão importante quanto as caixas acústicas, os amplificadores são os responsáveis por entregar um sinal suficientemente intenso aos alto-falantes. De forma mais específica, a função de um amplificador consiste em obter um sinal de áudio de uma fonte com baixa intensidade, como um aparelho celular, microfone, instrumento musical ou outro dispositivo qualquer e aumentar a intensidade do sinal, num nível em que possa excitar os alto-falantes. Os amplificadores podem tanto ser monofônicos, tendo apenas um canal entrada e saída de sinal, quanto estereofônicos, em que possuem dois canais de amplificação (BRAGA, 2015).

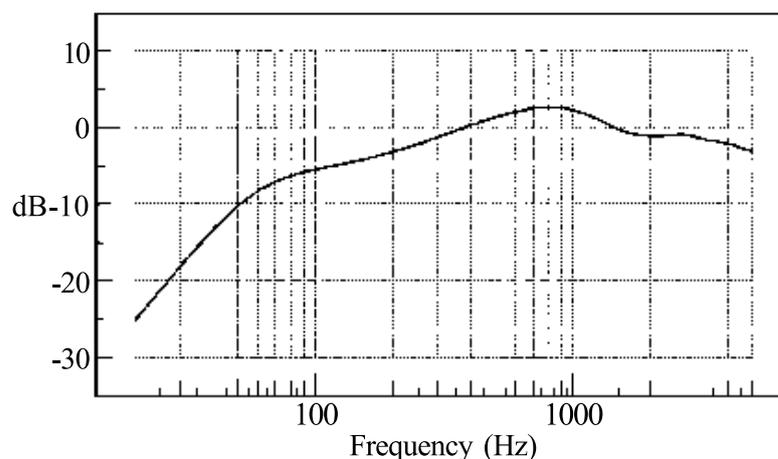
2.5 Testes em alto-falantes

Os alto-falantes possuem características acústicas que, ao serem avaliadas, descrevem a sua performance, qualidade e usabilidade. Dentre as avaliações que podem ser conduzidas, as principais são a curva de resposta de frequência, análise de diretividade sonora, análise de taxa de distorção harmônica e análise de potência acústica.

2.5.1 Análise de resposta de frequência

A curva de resposta de frequência é, segundo Toole (2008), o aspecto mais importante da performance de um aparelho sonoro. Ela indica como se comporta o nível de pressão sonora, ou intensidade sonora de um aparelho em função da frequência. A Figura 32 ilustra uma curva de resposta de frequência de um alto-falante.

Figura 32 – Resposta de frequência de um diafragma de alto-falante. O nível de intensidade sonora varia com a frequência, sendo mais ou menos intenso em alguns pontos que outros



Fonte: BORWICK, J. *Loudspeaker and Headphone Handbook*. 3. ed. Oxford: Focal Press, 2001.

A análise pode ser efetuada segundo alguns padrões. São utilizados basicamente um gerador de frequência, um microfone e uma fonte sonora. Evidentemente, outros aparelhos secundários, tais como amplificadores de sinal, podem também ser empregados no procedimento. A análise então é conduzida num espaço confinado chamado de câmara anecoica (um exemplo de câmara anecoica é ilustrado na Figura 33).

Durante o procedimento, é produzido na fonte um sinal sonoro intermitente ou constante em diferentes frequências. Esse sinal é recebido pelo microfone, convertido em sinais elétricos e analisado por softwares. Tanto a localização do aparelho sonoro quanto a do microfone são determinadas segundo a avaliação. O som pontual, tendo a característica de propagação esférica, pode ser medido em qualquer ponto do espaço. Em geral é adotada uma distância entre microfone e fonte de pelo menos 1 metro.

A câmara anecoica é um espaço em que procura-se obter o menor índice de reflexões de ondas sonoras possível. Para tal, é colocado nas paredes um material poroso altamente absorvedor de energia sonora, geralmente espumas. A absorção ocorre pois a onda sonora quando incide sobre um material poroso provoca a vibração do ar dentro dos poros. (BORGES; RODRIGUES, 2016). Isso é importante para que haja o mínimo de interferências possível na captação do som pelo microfone. Além disso, as espumas em geral são dispostas em formatos proeminentes, o que permite uma maior superfície de contato entre o ar excitado pela fonte e os poros.

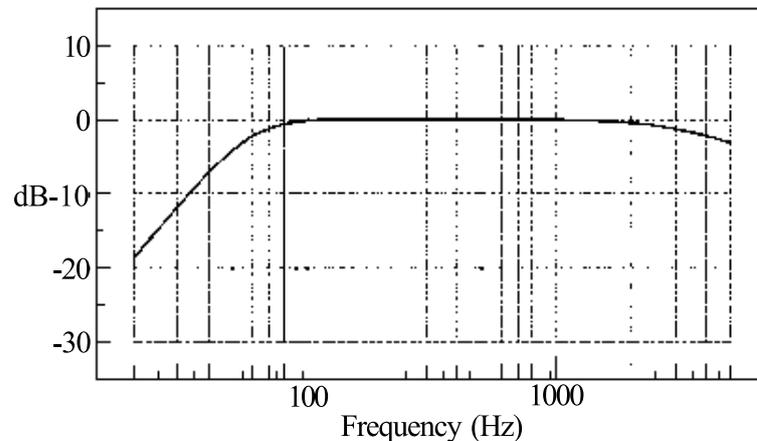
Figura 33 – Típica câmara anecoica, na Universidade de Salford



Fonte: HARGREAVES, T. J. et al. Surface diffusion coefficients for room acoustics: Free-field measures. 2000.

O alto-falante considerado por muitos engenheiros como de qualidade seria aquele que emitiria som sem grandes variações em função da frequência. O resultado esperado, então, significaria não haver uma sensação de diferença de volume entre diferentes sons, como por exemplo de sons de um instrumento musical ou vozes humanas para sons de explosões. A Figura 34 ilustra uma curva de resposta de frequência próxima ao ideal.

Figura 34 – Resposta de frequência de um aparelho ideal. O digrama tem forma achatada na região central, indicando ausência de variações nos níveis sonoros para uma certa banda de frequência



Fonte: BORWICK, J. *Loudspeaker and Headphone Handbook*. 3. ed. Oxford: Focal Press, 2001.

É importante notar que por mais que se tente obter uma resposta de frequência "achatada", i.e., mais próxima de uma constante, a tarefa é muito dificultada. Um aparelho sonoro que se comporte dessa forma ainda não foi inventado. A razão por trás dessa imperfeição pode ser explicada por alguns fatores, sendo o maior deles as reflexões das ondas na parede após serem emitidas pela fonte principal. Afinal, como foi descrito por Toole, toda reflexão deve ser tomada como uma fonte.

O resultado final do que o usuário da caixa deve escutar numa sala real se assemelharia, então, à superposição de ondas principais e refletidas. Dentro dos padrões geralmente aplicados, é aceita uma certa tolerância da resposta de frequência de geralmente ± 3 dB quanto ao desvio.

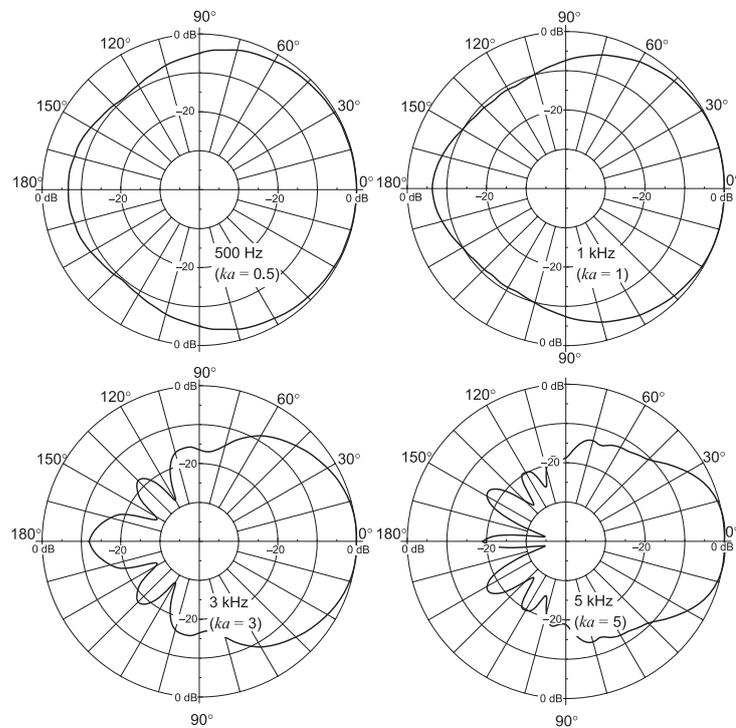
Assim, a curva tenta descrever, ainda que de forma não fiel ao que se reproduz em uma sala real (não anecoica), quais os tons que o alto-falante pode reproduzir. A faixa de maior interesse em geral é a de audibilidade dos seres humanos, que varia entre 20 Hz e 20 kHz. Porém, como já apresentado em 2.4.3, dificilmente um alto-falante consegue uma boa performance para todo o som audível, necessitando-se de um aparelho diferente para cada altura sonora.

2.5.2 Análise de diretividade sonora

A análise de diretividade sonora é uma outra avaliação de extrema importância para um transdutor sonoro. Ela indica o nível de intensidade de um som num espaço bidimensional ou tridimensional. Mais especificamente, a diretividade busca entender como varia o som segundo a posição do ouvinte em relação a um aparelho sonoro. Para o caso de um microfone, ela indica o quão forte é a sua captação segundo a posição de fala. Para um alto-falante, indica como a intensidade varia em seu entorno. Para ambos os casos, é verificado um espaço de 360° , com uma distância de captação d fixada em relação ao centro do aparelho. A Figura 35 ilustra diretividades

sonoras de um alto falante. Por outro lado, há também os microfones omnidirecionais, que captam todo o espaço de seu entorno.

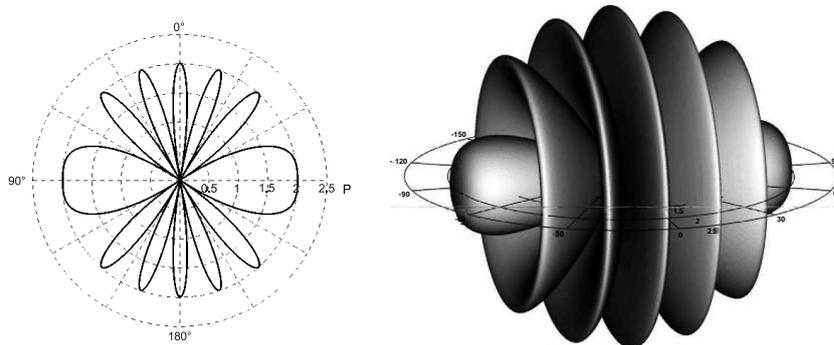
Figura 35 – Diretividade 2D segundo a frequência sonora de emissão



Fonte: Adaptado de BERANEK, L. L.; MELLOW, T. J. *Acoustics: Sound Fields and Transducers*. [S.l.]: Elsevier Science, 2012. ISBN 9780123914866.

Como é demonstrado no trabalho de Borwick (2001), a diretividade sonora tem um caráter tridimensional, Figura 36. É interessante notar que o nível de pressão sonora com que o som chega a um receptor de distância d de uma fonte sonora varia de acordo com a sua frequência de emissão. Na prática, a análise de diretividade sonora busca mostrar se um determinado transdutor sonoro segue fiel ao projeto. Como exemplo, pode-se citar microfones direcionais, que captam numa direção apenas, o que as tornam úteis para discursos.

Figura 36 – Corte de um volume de diretividade 3D

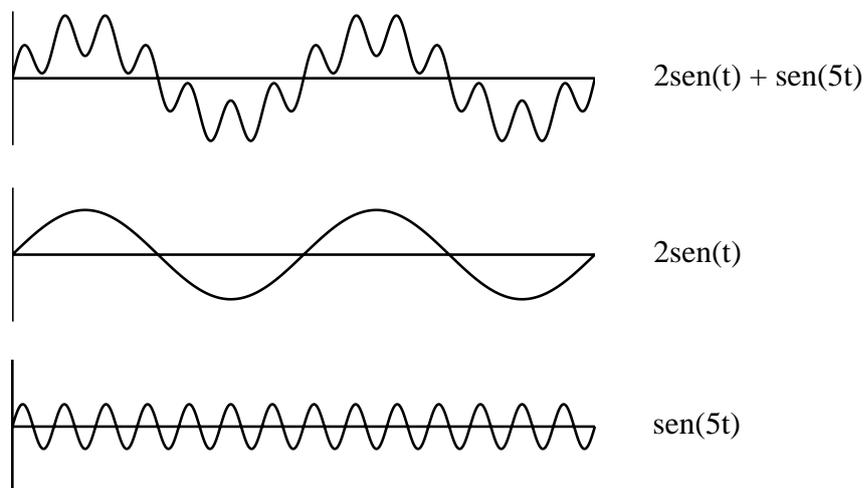


Fonte: Adaptado de BORWICK, J. *Loudspeaker and Headphone Handbook*. 3. ed. Oxford: Focal Press, 2001.

2.5.3 Análise de taxa de distorção harmônica (THD)

Como descrito por Fourier, uma onda complexa periódica pode ser entendida como o somatório de ondas mais simples senoidais. Essas ondas somadas são chamadas de harmônicos, sendo a primeira delas o primeiro harmônico, ou fundamental. A Figura 37 exemplifica a descrição de Fourier. Um som puro teria como característica um sinal senoidal sem harmônicos, ou seja, apenas a frequência fundamental estaria presente.

Figura 37 – Uma onda não pura pode ser descrita como o somatório de ondas puras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na definição de distorção dada por Temme (1992), uma distorção ocorre quando a função de transferência de uma entrada/saída altera a forma de um sinal, descontados ruídos, interferências, ampliações e atenuações. Ou seja, são criados sons não-puros, contendo, portanto, harmônicos.

Existem dois tipos de distorções: lineares e não lineares. As distorções lineares são aquelas que ao existirem não adicionam novos componentes de frequência ao sinal de entrada, alterando somente a forma da onda original. Por outro lado, as distorções não-lineares são aquelas que

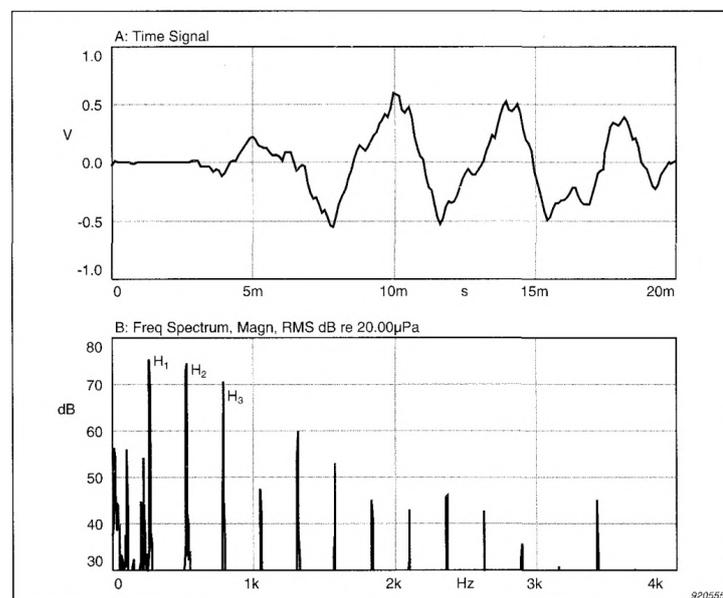
adicionam novos componentes de frequência, i.e., adicionam-se harmônicos da frequência fundamental. Estes novos elementos nas distorções não-lineares seguem o mesmo princípio apresentado em 2.3.3: suas frequências são múltiplas do primeiro harmônico.

A transformada de Fourier, artifício matemático inventado para descrever o somatório de ondas, é amplamente utilizado na conversão de oscilações do domínio temporal/espacial para o domínio da frequência. É dessa forma que se encontra a taxa de distorção harmônica (do inglês total harmonic distortion - THD). O THD é descrito como sendo o percentual das somas de potência de todos os harmônicos sobre a soma de potência de todos os harmônico mais o fundamental (TEMME, 1992):

$$\%THD = \frac{100\sqrt{H_2^2 + H_3^2 \dots H_N^2}}{\sqrt{H_1^2 + H_2^2 + H_3^2 \dots H_N^2}} \quad (2.13)$$

Em que H_N é o N ésimo harmônico e H_1 é a resposta fundamental. Para distorções na emissão de alto-falantes, é medido o quanto o nível de pressão sonora dos harmônicos varia em relação ao fundamental. É um indicador importante para entender a qualidade do equipamento sonoro. A Figura 38 apresenta um exemplo de conversão do domínio espacial para o de frequência através da transformada de Fourier.

Figura 38 – Nota dó (261.63 Hz) tocada em uma guitarra.



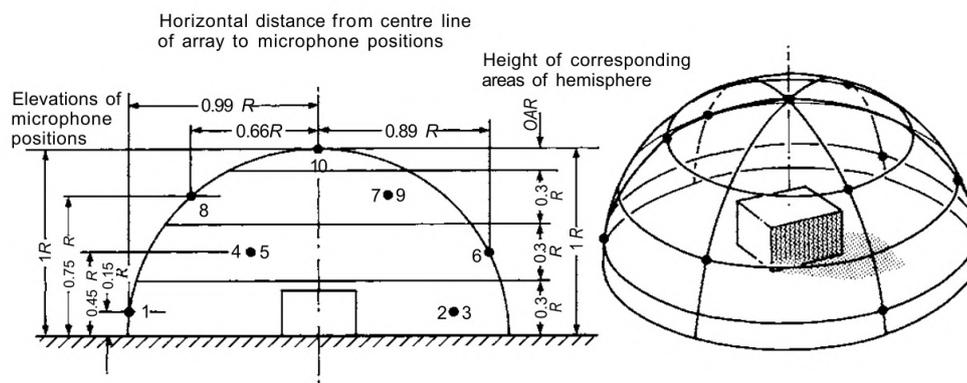
Fonte: TEMME, S. Audio distortion measurements. 1992.

A depender de sua utilização, é em geral desejável que haja menos distorções quanto possível em aparelhos sonoros. Porém, não somente a taxa de distorção dita a qualidade do som, mas também o número de harmônicos presentes na análise.

2.5.4 Análise do nível de pressão sonora

A análise do nível de pressão sonora indica o quão intenso é a emissão de uma fonte acústica a uma determinada distância. Trata-se de uma medida útil que permite determinar a sensibilidade do aparelho, bem como sua eficiência. Em geral, é utilizado um sonômetro para verificar o nível de pressão sonora em dB do emissor a 1 m de distância. Para uma melhor acurácia no procedimento, é desejável que sejam feitas algumas medidas de NPS e então verificada sua média aritmética. A Figura 39 ilustra como a medida pode ser feita.

Figura 39 – Esquema de cúpula semiesférica utilizada na análise de nível de pressão sonora



Fonte: Adaptado de BORWICK, J. *Loudspeaker and Headphone Handbook*. 3. ed. Oxford: Focal Press, 2001.

A sensibilidade de um alto-falante é uma medida do nível de pressão sonora produzida por um sinal elétrico de entrada de tensão V , em que $V^2/R = 1W$, em que R é a impedância do aparelho. O sinal de entrada é escolhido de forma a contemplar a banda de frequência de interesse, ou frequência de interesse.

A eficiência de um alto-falante é medida seguindo a teoria descrita em 2.3.2 para uma fonte pontual. Ela pode ser expressa como a razão entre a potência total irradiada num campo livre - de 4π esferorradianos ou mesmo 2π esferorradianos - pela potência elétrica nominal de entrada.

Em geral, a eficiência é descrita em percentuais. Alguns dos mais modernos alto-falantes possuem grande ineficiência, tipicamente com menos de 1% devido a perdas para o calor, o que é uma característica de aparelhos acústicos (BORWICK, 2001).

2.6 O estado da arte

Os avanços sociais e tecnológicos ao longo da história foram construídos por meio da pesquisa. Para que houvesse de fato um progresso, em qualquer que fosse o assunto abordado, sempre foi necessário um estudo prévio daquilo que foi anteriormente concebido pela comunidade. Esta metodologia, denominada estado da arte, é parte fundamental na fomentação de novos conceitos e melhorias daquilo que já existe.

Para Puentes et al. (2005), o estado da arte pode ser entendido como uma metodologia científica que constitui uma avaliação quantitativa e qualitativa do conhecimento produzido em um determinado momento. Para Messina (1998)¹, ele é "um mapa que nos permite continuar caminhando e também a possibilidade de tecer discursos que à primeira vista parecem descontínuos ou contraditórios". Para Romanowski e Ens (2006), ele se justifica pois possibilita uma visão geral do que vem sendo produzido e permite perceber a evolução das pesquisas ou produtos da área, além de identificar lacunas ainda existentes.

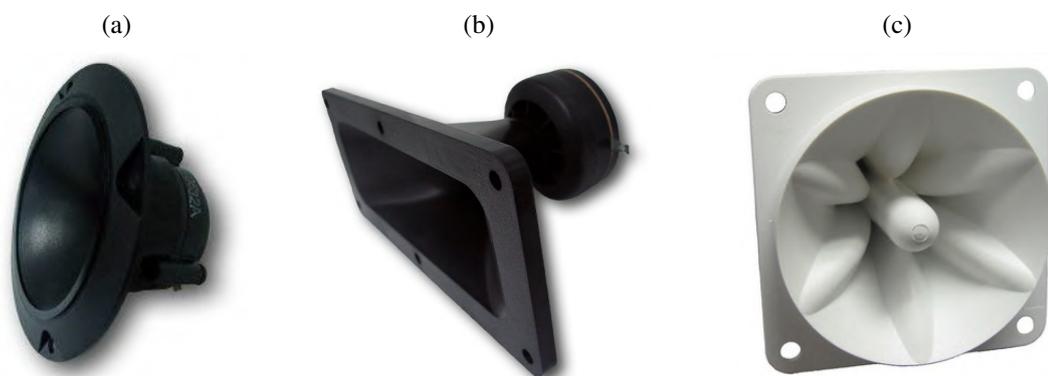
Assim, este recurso evita que se perca tempo com investigações desnecessárias, uma vez que se refere ao que já se tem descoberto sobre um determinado assunto. Portanto, além de permitir uma melhor organização de ideias, o estado da arte aflora a criatividade da equipe do projeto. Isto ocorre, pois ele abre um leque de possibilidades desde a criação de novos produtos à melhoria contínua.

2.6.1 Alto-falantes no mercado atual

Atualmente, alto-falantes de variados tamanhos, preços e desempenho estão disponíveis no mercado. Os aparelhos neste trabalho abordados são aqueles entendidos como de maior destaque, após a triagem de um numeroso espaço amostral de produtos.

Os alto-falantes piezoelétricos são em geral utilizados na emissão de frequências mais altas. De fato, como pôde ser notado por esta análise em questão, estes alto-falantes são em geral tweeters². Entre os modelos de maior destaque, estão os chamados *horn tweeters*, que possuem um formato de corneta. Os modelos KSN 1056A, KSN 1141A e KSN 1001D da marca Piezo Source são exemplos de horn tweeters exponenciais. Os alto-falantes citados podem ser vistos na Figura 40.

Figura 40 – Modelos KSN 1056A, KSN 1141A e KSN 1001D da marca Piezo Source em (a), (b) e (c) respectivamente



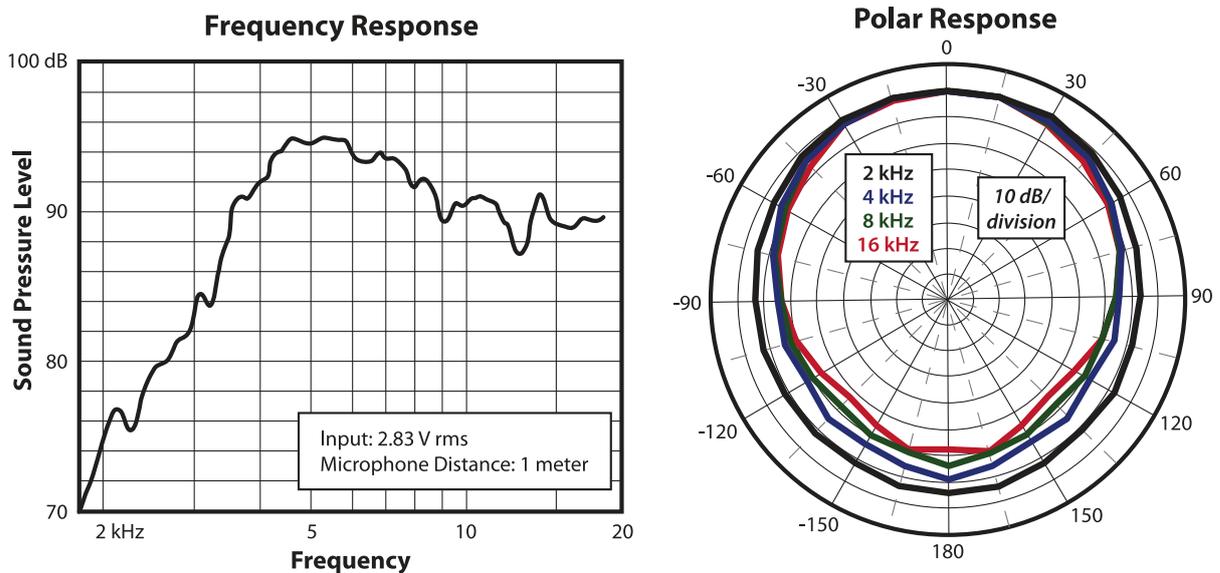
Fonte: PIEZO SOURCE. . 2019. Disponível em: <<http://www.piezosource.com>>. Acesso em: 03-05-2021.

¹ Tradução livre.

² Descrição realizada na seção 2.4.3.

Como já apontado em 2.4.3, a corneta dá maior eficiência ao alto-falante. Segundo sua fabricante, o modelo KSN 1056A é um alto-falante munido de um cristal piezoelétrico cerâmico, com resposta de frequência entre 4 kHz e 27 kHz . A curva de resposta de frequência deste modelo, bem como sua diretividade podem ser conferidas na Figura 41.

Figura 41 – Resposta de frequência e diretividade do modelo KSN 1056A



Fonte: PIEZO SOURCE. . 2019. Disponível em: <<http://www.piezosource.com>>. Acesso em: 03-05-2021.

É possível notar através da curva de resposta de frequência uma variação de cerca de ± 5 dB entre 4 kHz e 20 kHz. A diretividade se aproxima de uma circunferência, o que indica regularidade. Comparativamente, o modelo KSN 1141A possui uma resposta mais achatada que o anterior em uma longa faixa de frequência, o que leva a questionamentos quanto à influência de sua geometria no resultado final. As curvas características dos alto-falantes nesta seção apresentados podem ser vistas nos apêndices deste trabalho.

Além dos horn tweeters exponenciais, foi possível encontrar tweeters cônicos, como é o caso do modelo HT-22/8 da fabricante Monarcor, Figura 42. Alto-falantes piezoelétricos que não possuem cornetas puderam também ser encontrados no mercado. Como exemplo destes modelos, os quais são chamados de tweeters de radiação direta, pode-se citar o KSN 1020A da Piezo Source, Figura 43.

Figura 42 – Tweeter cônico, modelo HT-22/8 da marca Monacor



Fonte: (MONACOR, 2019)

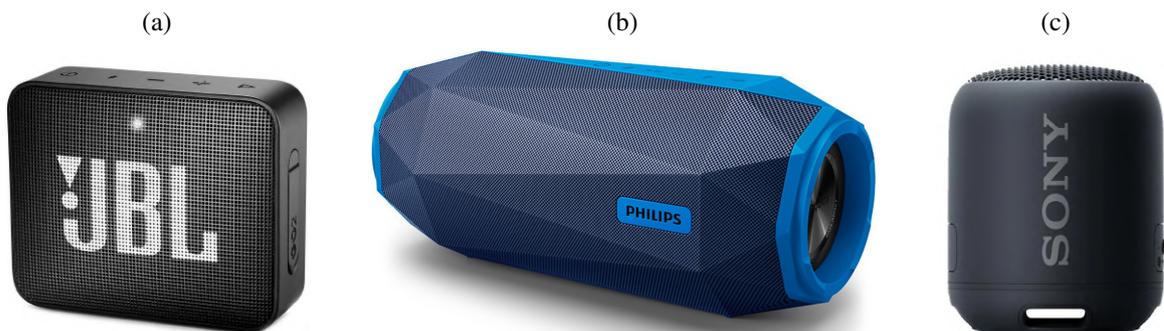
Figura 43 – Tweeter de radiação direta, modelo KSN 1020A da marca Piezo Source



Fonte: (PIEZO SOURCE, 2019).

Os alto-falantes são empregados em caixas de som portáteis ou não e com diferentes finalidades. Entre as caixas de som de maior interesse no projeto, pode-se citar marcas conhecidas no mercado como JBL, AKG, Sony e Phillips. Em geral, nos modelos encontrados, os alto-falantes são dispostos em conjuntos de woofers e tweeters, garantindo um amplo intervalo de frequências. Muitos dos aparelhos, principalmente os portáteis, possuem conexões sem fio, além de baterias que permitem maior comodidade. Além disso, os envoltórios que cobrem os alto-falantes são em geral feitos de metal e polímeros naturais ou sintéticos. A Figura 44 ilustra modelos de caixas de som portáteis de destaque no mercado.

Figura 44 – Modelos JBL GO2, Philips SB500 e Sony XB12 em (a), (b) e (c) respectivamente. Os modelos possuem diferentes alto-falantes que contemplam uma extensa faixa de frequência.

Fonte: Disponível em [amazon.com.br](https://www.amazon.com.br)

A Tabela 1 lista alguns dos modelos avaliados e suas especificações.

Tabela 1 – Especificações de modelos de caixa de som encontrados no mercado

	Dimensões (mm)	Composição AF	Resposta de Frequência	Potência (W RMS)	Preço (amazon.com)
JBL GO2	71,2 x 86,0 x 31,6	1 AF FULL RANGE	180 Hz - 20 kHz	3,1	40 USD
Philips SB500	230 x 101 x 105	2 AF FULL RANGE	80 Hz - 15 kHz	30	NI
Sony XB12	74 d x 92	1 AF FULL RANGE	20 Hz - 20 kHz	NI	38 USD
JBL Charge 3	213 x 89 x 89	2 AF FULL RANGE	65 Hz - 20 kHz	20	120 USD
HP 400	170 x 55 x 47	2 AF FULL RANGE	150 Hz - 18 kHz	4	NI

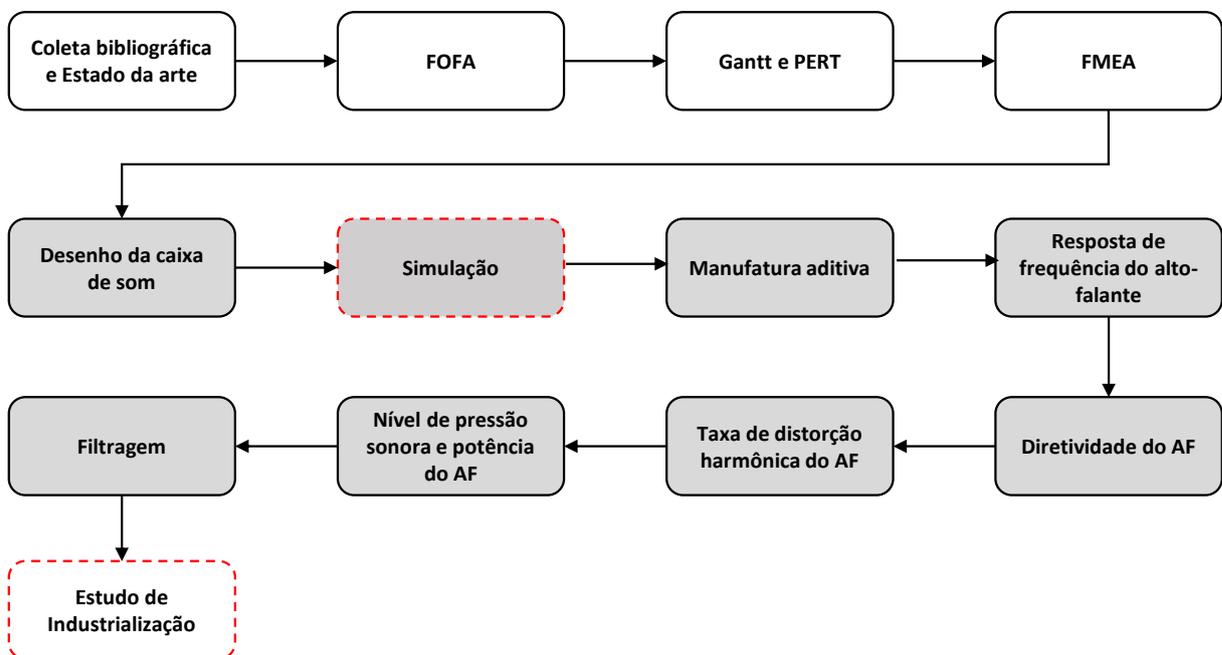
Fonte: Valores extraídos do site das fabricantes.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve qual a metodologia adotada ao longo do trabalho. O trabalho foi dividido em dois grandes blocos, sendo eles: gestão de projeto e análise de riscos; fabricação e análise do alto falante. Todos os testes que se encontram neste capítulo foram conduzidos nos laboratórios da École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM) de Paris, França.

O projeto contou com etapas sequenciadas de acordo com o fluxograma ilustrado na Figura 45. Como consequência, a metodologia do trabalho segue a mesma ordem do projeto.

Figura 45 – Fluxograma inicial do projeto. Os blocos de fundo branco estão contidos na gestão do projeto. Os blocos de fundo cinza fazem parte da fabricação e teste do alto-falante.

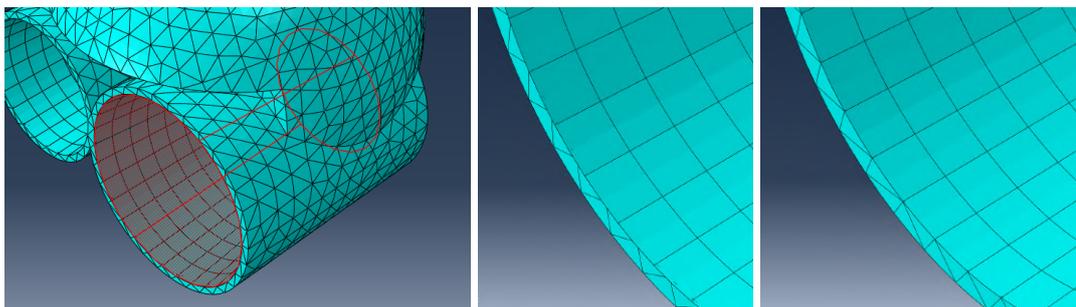


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os blocos da Figura 45 cujas bordas estão em tracejado vermelho representam dois pontos importantes a serem notados. O primeiro ponto é em relação a simulação por elementos finitos inicialmente proposta. A intenção desta estaria em prever quais as respostas que seriam obtidas através dos testes que se seguiriam. Desta maneira, seria possível fazer variar composições internas, bem como as formas do alto-falante e da caixa de som em geral.

Entretanto, dadas as limitações do software utilizado (Abaqus 2019 Student Edition), não foi possível dar continuidade ao procedimento. A versão estudantil disponível não permitia o emprego de malhas tão refinadas quanto as necessárias para a simulação. Por esta razão, este trabalho não abordará esta etapa. A Figura 46 apresenta capturas de tela obtidas durante a modelagem da simulação por elementos finitos do alto-falante.

Figura 46 – Malha da simulação da caixa de som empregada no software Abaqus 2019 Student Edition



Fonte: Compilação do autor.

O segundo ponto está relacionado ao estudo de industrialização. Esta etapa diz respeito a precificação do produto, estudo de mercado e plano de industrialização - o que não está diretamente ligado à gestão do projeto. Por isso, apesar de estar no escopo do projeto inicial e de ter sido concluído, este trabalho de conclusão de curso não o contempla.

3.1 Análise FOFA

A metodologia empregada na análise FOFA seguiu um direcionamento tanto destinado ao produto quanto a equipe de projeto. Foram analisados os pontos positivos e negativos externos e internos do projeto e do alto-falante. Foi necessário, dessa forma, que houvesse discussão sobre o aporte bibliográfico feito anteriormente.

Dentro dos pontos positivos, foram identificadas as forças tanto da equipe quanto do produto em questão, bem como suas oportunidades dentro do mercado. Por outro lado, para os pontos negativos, foram evidenciadas quais as fraquezas da equipe e do produto, como, também, as ameaças encontradas no mercado.

O objetivo dessa parte do trabalho se concentrou em entender e praticar o conceito de planejamento do projeto. Além disso, como é parte dos objetivos de uma matriz FOFA, era importante que se tomasse ciência dos potenciais riscos envolvidos. Por fim, como resultado, houve uma matriz contendo os pontos anteriormente mencionados.

3.2 Diagrama de Gantt e PERT

Uma vez que foi decidido dar procedimento ao projeto, fez-se necessária a organização das etapas que o iriam compor. Então, uma vez que as etapas foram identificadas, cada uma delas teve um tempo de conclusão estimado. Além disso, foram verificadas quais as correlações entre as etapas.

Isso permitiu compor tanto o diagrama de Gantt como o diagrama PERT do projeto. Ao final, foi elaborado um cronograma que contivesse de forma clara o que foi preciso fazer e quais os prazos de cada etapa. Dessa forma, foi possível prever com uma menor margem de erro qual

seria a duração do projeto. Já com o diagrama de rede PERT, foi possível entender quais os possíveis gargalos que poderiam ocorrer, para melhor preparar a equipe.

3.3 Análise FMEA

Uma vez que as etapas foram bem definidas, foi possível ter uma melhor análise de riscos envolvidos no projeto através da análise FMEA. Para esta análise, foram adotadas, de forma similar, as duas etapas descritas por Puente et al. (2002). Num primeiro momento, foram identificados quais eram os possíveis modos de falha do projeto. Nesta etapa, a tabela FMEA produzida conteve 4 colunas principais, sendo elas:

1. **Funções:** descreve quais as funções que serão avaliadas, i.e., as etapas definidas para o projeto.
2. **Modos de falha:** são identificadas quais as possíveis falhas para uma determinada função.
3. **Causas de falha:** são identificadas as possíveis causas para tais falhas.
4. **Efeitos de falha:** são identificados quais os possíveis efeitos que determinada falha poderá acarretar.

A segunda fase consistiu em reunir os dados obtidos na primeira parte e adotar critérios que permitiam dar maior ou menor importância às falhas analisadas. Na prática, os modos de falha foram classificados segundo a sua criticidade. Para este trabalho, é adotado o critério explicitado nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Tabela de nível de gravidade dos riscos do projeto

Classe	Característica	Nível das consequências	Índice de gravidade
G1	Pouco impactante	Baixo impacto sobre o desenvolvimento do projeto	1
G2	Impactante	Dificuldade que conduz a prováveis atrasos no planejamento inicial	3
G3	Grave	Dificuldade que leva a uma possível impossibilidade de conduzir o projeto	9

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 3 – Tabela de nível de probabilidade de ocorrência dos riscos do projeto

Classe	Característica	Nível das consequências	Índice de gravidade
P1	Pouco provável	Baixa probabilidade de ocorrência	1
P2	Possível	Pode se produzir caso haja falta de vigilância	3
P3	Muito provável	Irã acontecer: é preciso realizar as ações corretivas para que se evite o risco	9

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como é observado nas tabelas acima, os níveis de gravidade e probabilidade de uma falha podem receber notas 1, 3 ou 9, sendo quanto maior a gravidade/probabilidade, maior a nível atribuído. O nível de criticidade de uma falha é determinado multiplicando os dois valores

anteriormente atribuídos. Assim, ao longo da sessão de elaboração da FMEA, as falhas foram classificadas segundo o nível de criticidade, sendo eles C1, C2 e C3 em ordem crescente de nível crítico. A Tabela 4 indica como foram formadas as classes críticas de uma determinada falha.

Tabela 4 – Nível de probabilidade de ocorrência dos riscos do projeto. Os níveis de criticidade crescem com C1, C2 e C3

Classe de probabilidade	Classe de gravidade		
	G1	G2	G3
P3	C2	C3	C3
P2	C1	C2	C3
P1	C1	C1	C2

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4 Desenho e manufatura aditiva da caixa de som

Era sabido que o alto-falante deveria ser necessariamente do tipo piezoelétrico. O diafragma adotado é feito de um material cerâmico ¹ com característica piezoelétrica, como aquele apresentado na Figura 47.

Figura 47 – Modelo de cristal piezoelétrico utilizado no alto-falante



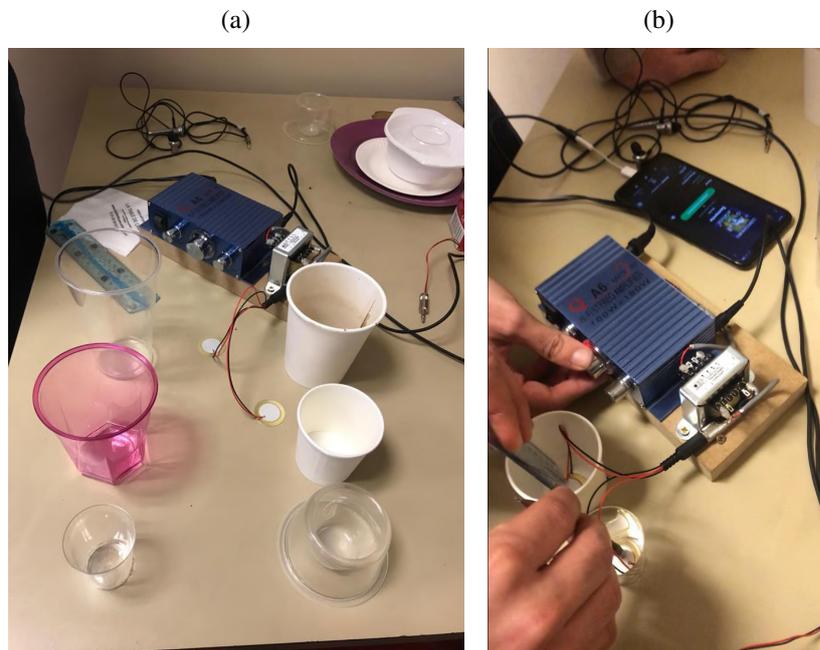
Fonte: Fabricante RS Pro (2019)

O cristal piezoelétrico deveria ser colocado sobre uma superfície elástica para que houvesse som. Então, o material e formato da superfície e do cone foram escolhidos através de testes puramente empíricos. Para isso, diferentes materiais como o poliestireno, polipropileno e papel/papelão foram testados. Também foram analisadas variadas formas, como membranas, cones e cascos.

No processo, um dispositivo celular conectado ao amplificador servia como fonte de pulsos elétricos, tocando diferentes ritmos musicais. O sinal era enviado ao cristal piezoelétrico fixado nas superfícies de teste, produzindo som, Figura 48. No teste, foram ouvidos os diferentes ritmos em diferentes amostras e, por meio de votação, foi selecionada aquela que melhor soava, i.e., com menos distorções possíveis.

¹ Noliac piezoceramic material NCE51

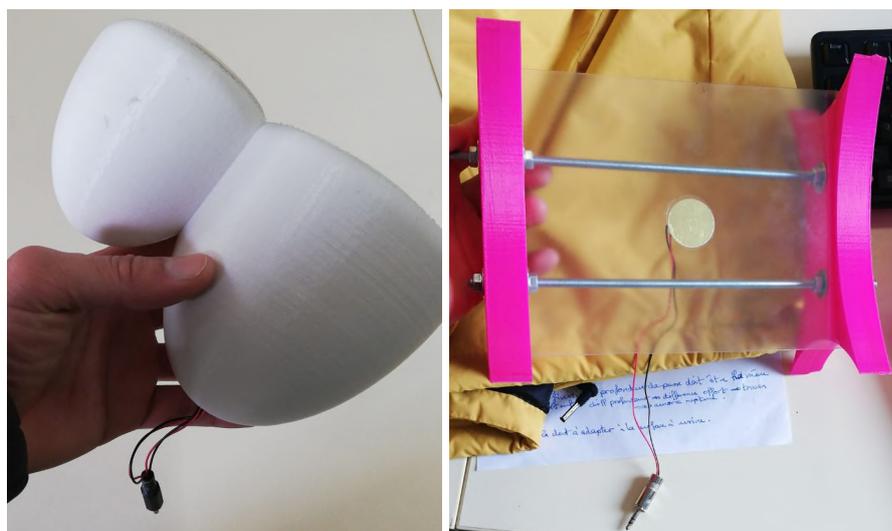
Figura 48 – Teste sonoro empírico dos diferentes formatos e materiais para o alto-falante. Diferentes materiais e formatos candidatos ao alto-falante em (a). Parte do procedimento consiste em colar o cristal piezoelétrico no fundo da forma em (b)



Fonte: Compilação do autor, Laboratórios de Acústica da ENSAM, Paris.

Alguns alto-falantes antigos dos laboratórios da ENSAM também foram utilizados na análise para meio de comparação, Figura 49. Após os testes, foram selecionados aquele formato e material que seriam utilizados na fabricação do alto-falante.

Figura 49 – Aparelhos sonoros piezoelétricos de diferentes formatos e materiais



Fonte: Compilação do autor, Laboratórios de Acústica da ENSAM, Paris.

Uma vez tomada ciência do formato da corneta e diafragma, era preciso definir o desenho do

envoltório que cobriria o alto falante. Esta etapa incluiu elaboração de esboços e discussões a seu respeito. Para este trabalho, foi definido que a escolha do envoltório não tem objetivo técnico, e sim puramente estético. Afinal, cabia a um dos objetivos primários do projeto prever a obtenção de um produto personalizado.

Com o esboço definido, o desenho foi então conduzido pelo software CATIA V5 Student Edition. Neste ponto era imprescindível que o objeto seguisse os requisitos previamente impostos, tais como espaço volumétrico ocupado e poder estar perfeitamente apoiado à uma superfície. Adicionalmente, o objeto teria que estar perfeitamente alinhado com o formato do alto-falante.

Após a elaboração do desenho do envoltório, o arquivo numérico seguiu os passos definidos em 2.2. A impressão foi feita na impressora Replicator da fabricante MakerBot, Figura 50. Para o arquivo STL, a escolha da densidade malha de impressão levou em conta o tempo previsto que o objeto demoraria para ser impresso. O material de impressão foi o termoplástico PLA.

Uma vez montada a caixa de som, os testes sonoros foram conduzidos.

Figura 50 – Impressora 3D replicator da marca MakerBot utilizada na fabricação aditiva do envoltório da caixa de som



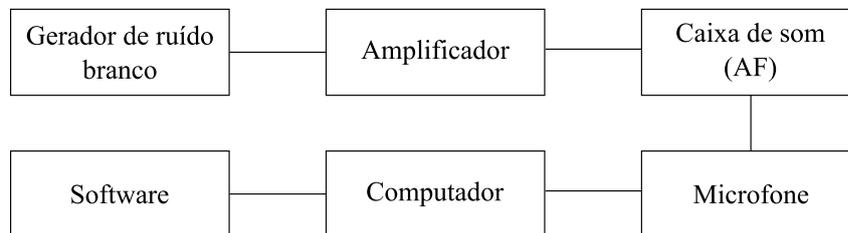
Fonte: Compilação do autor, Laboratórios de Fabricação Aditiva da ENSAM, Paris.

3.5 Resposta de frequência

A análise de resposta de frequência foi conduzida numa câmara anecoica. A câmara principal, que pertence aos laboratórios de acústica da ENSAM, possuía 5 faces isoladas com espuma

e piso construído em madeira. A organização da aparelhagem do teste seguiu o diagrama da Figura 51.

Figura 51 – Organização esquemática da aparelhagem de teste de resposta de frequência



Fonte: Elaborado pelo autor.

Um aparelho gerador de ruído branco, Figura 52, esteve conectado ao amplificador, Figura 53, que por sua vez foi conectado ao alto-falante. Um microfone omnidirecional foi posicionado a uma curta distância (cerca de 20 a 40 cm) do alto-falante para captar os sons dele provenientes. A captação do som feita pelo microfone foi enviada para um computador, onde foi feita a análise gráfica da resposta de frequência por meio do software Adobe Audition 3.0.

Figura 52 – Amplificador de sinal da marca Waza, modelo A6, utilizado nas análises acústicas do alto-falante



Fonte: Compilação do autor, Laboratórios de Acústica da ENSAM, Paris.

Figura 53 – Gerador de ruído branco da marca Bruel & Kjaer, modelo 1405, utilizado na análise de resposta de frequência

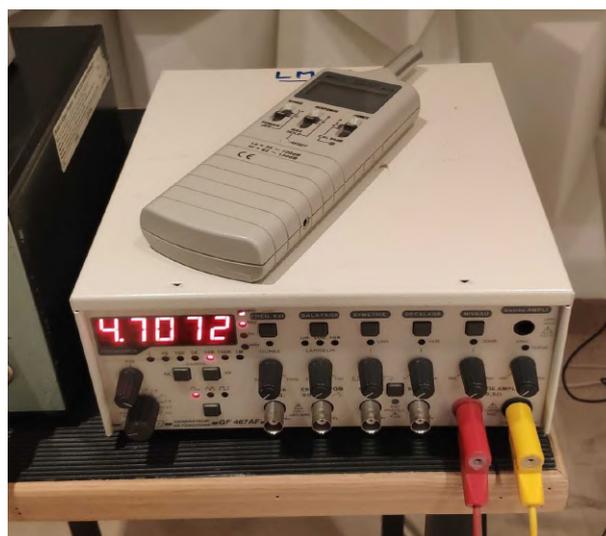


Fonte: Compilação do autor, Laboratórios de Acústica da ENSAM, Paris.

3.6 Análise de Diretividade

A análise de diretividade, assim como a de resposta de frequência, foi feita na câmara anecoica. Nesta etapa, foi recolhida a curva de diretividade 2D do nível de pressão sonora do alto falante. O procedimento desta análise necessitou da informação quanto a frequência fundamental colhida na análise anterior. Uma vez conhecida a frequência fundamental do alto-falante, este valor foi inserido em um gerador de frequência. O gerador de frequência utilizado na análise é apresentado na Figura 54.

Figura 54 – Abaixo, gerador de frequência da marca ELC modelo GF467AF. Acima, sonômetro da marca TES modelo 1350a. Ambos aparelhos serão utilizados na análise de diretividade do alto-falante

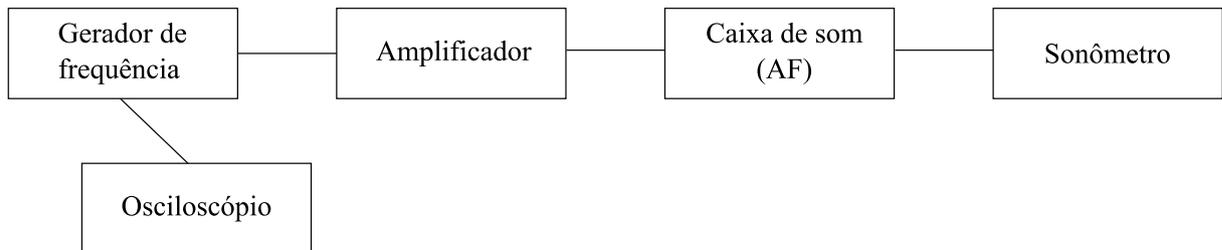


Fonte: Compilação do autor, laboratórios de acústica da ENSAM, Paris.

O gerador de frequência foi ligado ao amplificador, que por sua vez foi conectado à caixa de som. O gerador de frequência enviou um sinal elétrico senoidal puro ao amplificador. Como

consequência, a caixa de som emitiu ondas sonoras com frequência igual ao sinal elétrico de entrada. A análise de diretividade do aparelho foi feita com a ajuda de um sonômetro, que captava tais ondas e media suas intensidades, Figura 54. A Figura 55 ilustra de forma esquemática a ligação entre os aparelhos da análise.

Figura 55 – Esquema das ligações entre os equipamentos do teste de diretividade



Fonte: Elaborado pelo autor.

À luz do que foi abordado em 2.5.2, o sonômetro teve que percorrer um espaço de 360° em relação à fonte sonora. Para isso, uma pessoa teve que percorrer este espaço a uma distância fixa de 1 metro em relação à fonte. Com relação à altura, o sonômetro esteve exatamente no eixo do aparelho.

Figura 56 – Análise de diretividade em câmara anecoica. Uma pessoa teve de percorrer um espaço de 360° a uma distância fixa de 1 metro em relação à fonte.



Fonte: Compilação do autor, laboratórios de acústica da ENSAM, Paris.

Para melhor confiabilidade na análise, um osciloscópio foi conectado ao gerador de frequência. Ao todo, deveriam ser feitas pelo menos 48 medições igualmente espaçadas e demarcadas no solo. No fim, mais medições tiveram que ser feitas, visto que a diretividade possuía pontos de alta variação no espaço.

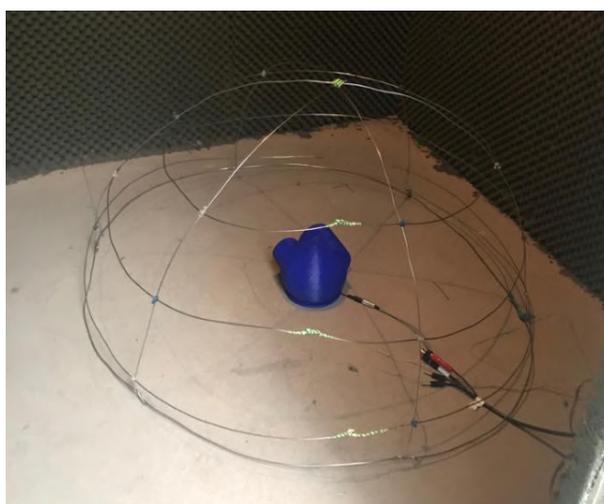
Uma vez recolhidos os valores do nível de pressão acústica do aparelho em sua frequência fundamental, foi obtido ao final da análise um gráfico de diretividade em duas dimensões.

3.7 Análise THD e nível de pressão sonora

A análise da taxa de distorção harmônica do aparelho sonoro foi feita com a curva obtida na análise de resposta de frequência. O procedimento se fez puramente por meio de um software, neste caso o Adobe Audition 3.0. O software converteu os níveis de pressão sonora do domínio espacial para o de frequência por meio da transformada de Fourier. Uma vez identificados os valores do nível de pressão sonora dos picos dos harmônicos, a Equação 2.13 foi utilizada para compará-los à fundamental. No fim, foi calculado um percentual THD do aparelho.

Já a análise do nível de pressão sonora foi conduzida em uma câmara anecoica. Neste procedimento, uma câmara menor, diferente da utilizada nas análises anteriores, foi preparada. A câmara possuía 5 faces com espumas e o chão era construído em madeira. O procedimento foi realizado seguindo o que é descrito por Borwick (2001), como apresentado na Figura 39. A Figura 57 ilustra o procedimento adotado.

Figura 57 – Cúpula vazada feita em arame empregada na análise de nível de pressão sonora. A cúpula continha 10 pontos igualmente espaçados em relação ao seu centro de curvatura

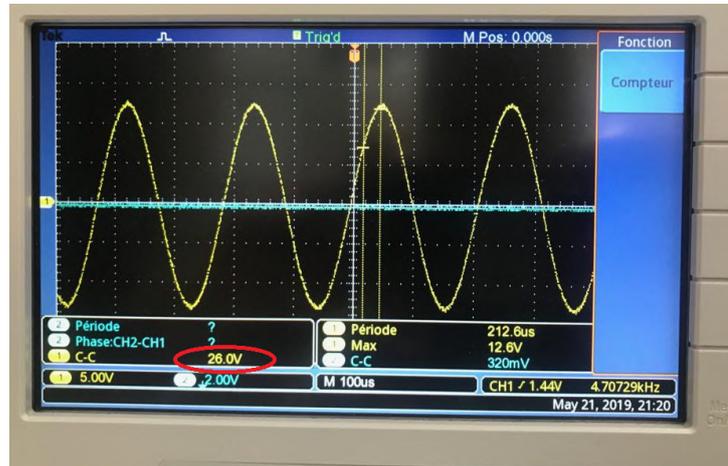


Fonte: Compilação do autor, laboratórios de acústica da ENSAM, Paris.

Sobre uma cúpula de arame de 0,5 m de raio, havia 10 pontos que foram igualmente espaçados do seu centro de curvatura. Um gerador de frequência enviava um sinal senoidal puro de frequência igual à fundamental a um amplificador. Este, por sua vez, esteve conectado ao aparelho de som. Da mesma forma, um osciloscópio esteve conectado ao gerador de frequência

e a caixa de som para garantir fiabilidade ao procedimento, bem como medir a tensão aplicada e queda de tensão do aparelho, Figura 58. A organização esquemática segue o procedimento adotado na análise de diretividade e pode ser conferida na Figura 55.

Figura 58 – Visor do osciloscópio empregado no processo



Fonte: Compilação do autor, laboratórios de acústica da ENSAM, Paris.

Um sonômetro mediu a intensidade sonora nos pontos demarcados na cúpula. Através da Equação 3.1, o valor médio do NIS pôde ser determinado.

$$\overline{NIS}(dB) = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum 10^{\frac{NIS_{i1}}{10}} \right) \quad (3.1)$$

Em que N é o número de pontos: N = 10. Através da Equação 2.8 e adequando-se o valor da intensidade sonora para o SI, a potência acústica da caixa de som pôde ser encontrada para uma semiesfera de raio 0,5 m:

$$P(W) = (I_0 \cdot 10^{\overline{NIS}/10}) \times (2 \cdot \pi \cdot 0,5^2) \quad (3.2)$$

Os valores de tensão fornecidos pelo osciloscópio levam em consideração a característica ondulatória do sinal de entrada. Por isso, os valores de tensão exibidos por ele correspondiam à tensão pico a pico, devendo ser posteriormente ajustados para valores eficazes. Com o valor da resistência do alto falante medido por um multímetro, a corrente eficaz que passa pela caixa de som foi calculada.

Assim, a potência elétrica da caixa de som pôde ser descoberta:

$$P_{elec} = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos \phi \quad (3.3)$$

Em que U_{ef} é a tensão eficaz, I_{ef} é a corrente eficaz e ϕ é a defasagem do alto-falante. A eficiência da caixa de som pôde ser calculada como a razão entre a potência acústica pela potência elétrica fornecida.

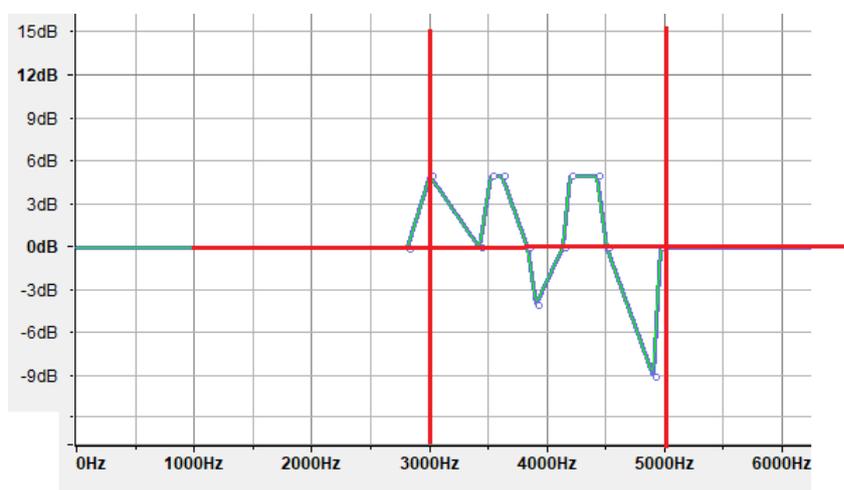
3.8 Procedimentos posteriores: filtragem

Não era esperado que a curva de resposta de frequência do alto-falante fosse achatada. Assim, de forma a ajustar essa irregularidade, seria necessária a implementação de filtros sonoros. Além disso, assim como diferentes alto-falantes possuem melhor performance em determinados intervalos de frequência, esperava-se que o alto-falante produzido no trabalho se comportasse de maneira semelhante. A filtragem poderia atuar na resposta ao aumentar ou diminuir os níveis de pressão sonora emitidos pela caixa de som em diferentes frequências. A filtragem ocorre dentro da faixa de melhor performance do alto-falante, i.e., aquilo que define sua nomenclatura (como apresentado em 2.4.3).

Em geral, pode ser implementada uma filtragem com componentes eletrônicos. Porém, o objetivo nesse procedimento em questão esteve em avaliar a correção que seria aplicada, não necessariamente com estes componentes. Por isso, no lugar do tradicional, foi feita uma equalização do som, simulando uma filtragem.

O procedimento, portanto, consistiu em equalizar o ruído branco de origem, aumentando ou diminuindo o ganho da intensidade sonora nas referidas frequências. Para realizar a proposição, foi utilizado o software Audacity versão 2.3.2. Dentro do software, um ruído branco foi editado conforme anteriormente destacado e posteriormente salvo em uma extensão de arquivo .wav, Figura 59.

Figura 59 – Procedimento de equalização de ruído branco. Software Audacity versão 2.3.2



Fonte: Compilação do autor, Laboratórios de Acústica da ENSAM, Paris.

A análise da curva de resposta de frequência posterior à equalização seguiu os mesmos passos apresentados na Figura 51. No entanto, no lugar do gerador de frequência, houve um dispositivo tal como um aparelho celular ou computador que pudesse executar o arquivo .wav. Ao final, foi obtida uma curva de resposta de frequência, assim como em 3.5, porém corrigida.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo descreve os resultados obtidos na série de procedimentos apresentados no Capítulo 3. A ordem exposta dos resultados segue a mesma ordem do projeto.

4.1 Análise FOFA

A análise FOFA do produto e projeto resultante é apresentada na Figura 60.

Figura 60 – Análise FOFA do produto e projeto

		Positivo	Negativo
Interno		<p style="text-align: center;">FORÇAS</p> <p>Equipe de projeto:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Diversidade da equipe: domínio de técnicas diversas. - Conhecimentos diversos em AF e gerenciamento de projetos. <p>Produto:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Preço muito atraente. - Protótipos de geometria complexa: uma das vantagens da impressão 3D. <p>Formação:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Acompanhamento de doutores em acústica e em gestão durante o projeto. 	<p style="text-align: center;">FRAQUEZAS</p> <p>Equipe do projeto:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Equipe internacional: comunicação e troca de informações dificultadas. - O primeiro projeto em que a equipe trabalha junta. Tende a ser uma organização de trabalho menos eficiente. <p>Produto:</p> <ul style="list-style-type: none"> - As diferentes partes do AF são feitas na fabricação aditiva: isso dificulta a industrialização do produto.
	Externo		<p style="text-align: center;">OPORTUNIDADES</p> <p>Mercado:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Globalização da música: alta demanda da AF. - Compatibilidade com novas tecnologias (Bluetooth, Spotify...). - Sociedade cada vez mais móvel: Um AF móvel é uma maneira de personalizar seu ambiente facilmente. Por exemplo: segundo a UNESCO, o número de estudantes de mobilidade no mundo dobrará até 2025 (de 4.500.000 para 9.000.000).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os quatro pontos avaliados na análise dão uma ideia preliminar de riscos ao projeto:

4.1.1 Forças

A diversidade da equipe em relação aos diferentes países de origem que a compõe tende contribuir para a formação de ideias ao projeto. Os conhecimentos obtidos em gestão de projetos e acústica pela equipe também são considerados forças.

Em relação ao produto, o seu preço tende a ser atraente, dada a tecnologia barata utilizada. Além disso, o fato de a caixa de som poder ser fabricada com tecnologia de manufatura aditiva permite que se seja possível a fabricação de geometrias complexas.

4.1.2 Fraquezas

Apesar da diversidade da equipe ter pontos positivos, ela também contribui para uma piora na comunicação. Assim, como a equipe possui integrantes de 4 nacionalidades diferentes, pode haver dificuldades em relação à língua comunicativa, nesse caso o Francês. Uma outra fraqueza da equipe está no fato de ser o primeiro trabalho com essa formação, o que certamente tende a contribuir para um trabalho um pouco menos eficiente.

Já um ponto fraco do produto está na manufatura aditiva. Apesar de contribuir de forma significativa para a obtenção de diferentes geometrias complexas, a impressão 3D é em geral demorada, o que pode ocasionar gargalos na produção.

4.1.3 Oportunidades

Se tratando do ambiente externo, o fato de a equipe poder contar com doutores em gestão e em acústica da ENSAM contribui de forma significativa para o sucesso do projeto.

O mercado global como demonstrado anteriormente no trabalho tem uma alta demanda de caixas de som, o que gera oportunidade. Além disso, novas tecnologias como o streaming e conexões bluetooth também são pontos a serem explorados. Outro ponto interessante está na portabilidade do aparelho, um fator importante nos dias de hoje.

4.1.4 Ameaças

A única ameaça encontrada está no fato de o mercado do som ser relativamente competitivo, o que certamente aumenta a dificuldade em adentrá-lo.

4.2 Diagrama de PERT e de Gantt

Antes de traçar o diagrama, fundamentalmente foram definidas as etapas macro do projeto. Como pode ser conferido na Tabela 5, as tarefas foram denotadas ordenadamente de A a J. Cada tarefa possui um tempo de execução em dias de trabalho que foram estimados. As tarefas julgadas de maior tempo foram a fabricação e a validação final da caixa de som, com 4 dias cada. As tarefas podem ou não possuir dependências entre si.

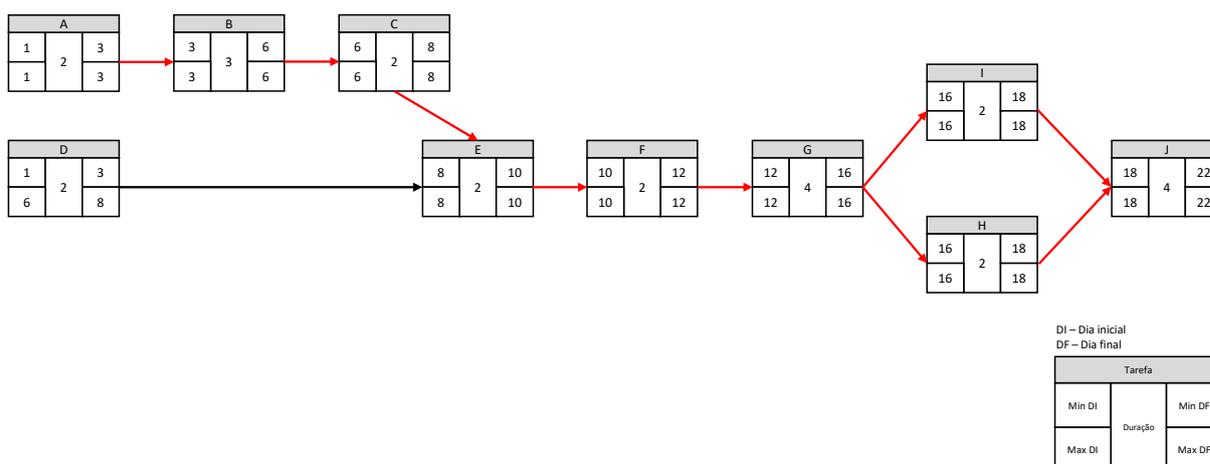
Tabela 5 – Tarefas a serem executadas no projeto. As tarefas poderiam ou não conter dependências entre si.

	Tarefas	Natureza	Predecessor	Duração (dias)
Inicialização e organização	A	Planejamento e análise de riscos do projeto		2
Execução e controle	B	Escolha da forma, material do AF e desenho preliminar da caixa de som	A	3
	C	Desenho assistido por computador da caixa de som	B	2
	D	Formação da equipe em métodos numéricos acústicos		2
	E	Simulação numérica da caixa de som	C,D	2
	F	Validação e otimização numérica da fabricação	E	2
	G	Fabricação da peça	F	4
Fechamento	H	Testes acústicos do produto	G	2
	I	Estudo de industrialização do produto e cadeia logística	G	2
	J	Filragem e validação final do AF fabricado	H, I	4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez que foram ordenadas as tarefas a serem executadas ao longo do projeto, bem como a identificação de suas interdependências, o diagrama de PERT pôde ser traçado. O diagrama é apresentado na Figura 61.

Figura 61 – Diagrama PERT do projeto

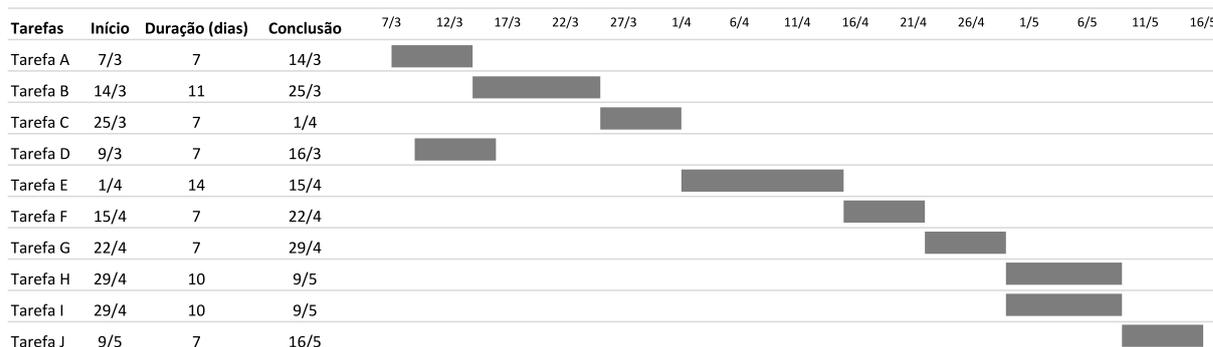


Fonte: Elaborado pelo autor.

O caminho representado pela linha vermelha elucidou o chamado caminho crítico do projeto, i.e., o que indicou o seu tempo total de conclusão. Somados os tempos do caminho crítico, houve uma estimativa de 21 dias de trabalho. O tempo total real de conclusão foi estimado pelo diagrama de Gantt.

Uma vez o PERT definido, foi possível construir o diagrama de Gantt, que forneceu o planejamento inicial do projeto. As semanas nas quais seguiu o projeto não possuíam dias úteis de trabalho regulares. Isso significa, por exemplo, que enquanto uma semana possuía 2 dias úteis de trabalho, outra poderia ter 3. Com o cronograma pedagógico em mãos, foi então possível alocar no calendário os 21 dias de trabalho estimados no PERT, formando o diagrama de Gantt, visto na Figura 62.

Figura 62 – Diagrama de Gantt do projeto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que era previsto para conclusão do projeto cerca de 2 meses e meio a contar do primeiro dia. Através do diagrama, a tarefa que provavelmente levaria maior tempo para conclusão seria a simulação numérica do alto-falante. Porém, a simulação ocupou um período de tempo ainda maior, levando a conclusão do projeto mais adiante para 24 dias de trabalho.

4.3 Análise FMEA

Dentro da análise de riscos realizada, o FMEA identificou os modos de falha julgados como aqueles possíveis de ocorrência (a análise FMEA pode ser conferida no Apêndice B deste trabalho). Para cada função exercida nas etapas do projeto, foram analisadas 3 subcategorias: coleta de informações, tratamento da informação e transmissão da informação. Para cada modo de falha, houve a identificação de sua possível causa, seus efeitos, nível de criticidade e ações corretivas. Assim como posto na Tabela 4, o nível de criticidade era tão alto quanto maior a gravidade da falha e sua probabilidade.

O FMEA do projeto mostrou que as falhas mais críticas poderiam ocorrer em dois locais: o primeiro seria no estudo de industrialização, caso o produto não pudesse ser produzido em massa ou transportado, inviabilizando o projeto. O segundo estaria nos testes em laboratório e validação do produto, caso não fosse possível obter os valores corretos das análises acústicas.

É interessante notar que a criticidade do primeiro caso está intimamente ligada à gravidade da falha, enquanto que o segundo está mais relacionado à probabilidade de sua ocorrência.

4.4 Fabricação da caixa de som

A análise empírica inicial pôde demonstrar que o material que melhor soava, i.e., com o menor ruído perceptível, era o papel. Além disso, foi também notado que o formato cônico tinha vantagem em intensidade perceptível do som, em comparação com outras formas disponíveis. Por essas razões, foi definido que o alto-falante teria formato cônico e seu material seria o papel.

Ainda, visando melhor aproveitar os espaços disponíveis, foi estabelecido que dois alto-falantes seriam utilizados na composição da caixa de som, o que significaria um aparelho com

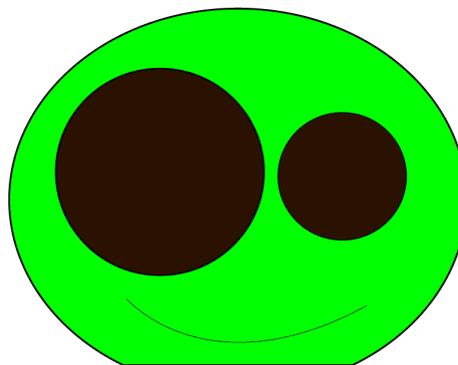
dois canais, ou seja, estéreo. Esta composição seria possível graças ao amplificador, que possuía tal funcionalidade.

Um outro ponto definido foi que os alto-falantes teriam diâmetros de diafragma e tamanhos do cone distintos entre si, o que em tese traria maior resposta de frequência ao aparelho. Essa última premissa se baseia na influência da forma do alto-falante no som emitido, teoria descrita em 2.4.3.

Os alto-falantes escolhidos, portanto, tiveram o formato de um copo feito em papel espesso. O maior e o menor copos possuíam um diâmetro do topo igual a 80 mm e 60 mm respectivamente. Já as alturas do maior e menor copos eram de 100 mm e 90 mm respectivamente. Um cristal piezoelétrico foi então fixado com cola instantânea na base de cada copo.

Em seguida, foi então propostos diferentes formatos de envoltórios que recebessem tais alto-falantes, respeitando os requisitos do projeto. A ideia primária foi imaginar um desenho puramente estético que fosse de certa forma complexo, desafiando a proposta de se utilizar a manufatura aditiva na fabricação. A Figura 63 ilustra o esboço escolhido para dar inicialização ao desenho do envoltório da caixa de som.

Figura 63 – Esboço do envoltório. O desenho teve a forma de uma cabeça caricata em que seus orifícios oculares abrigariam os alto-falantes

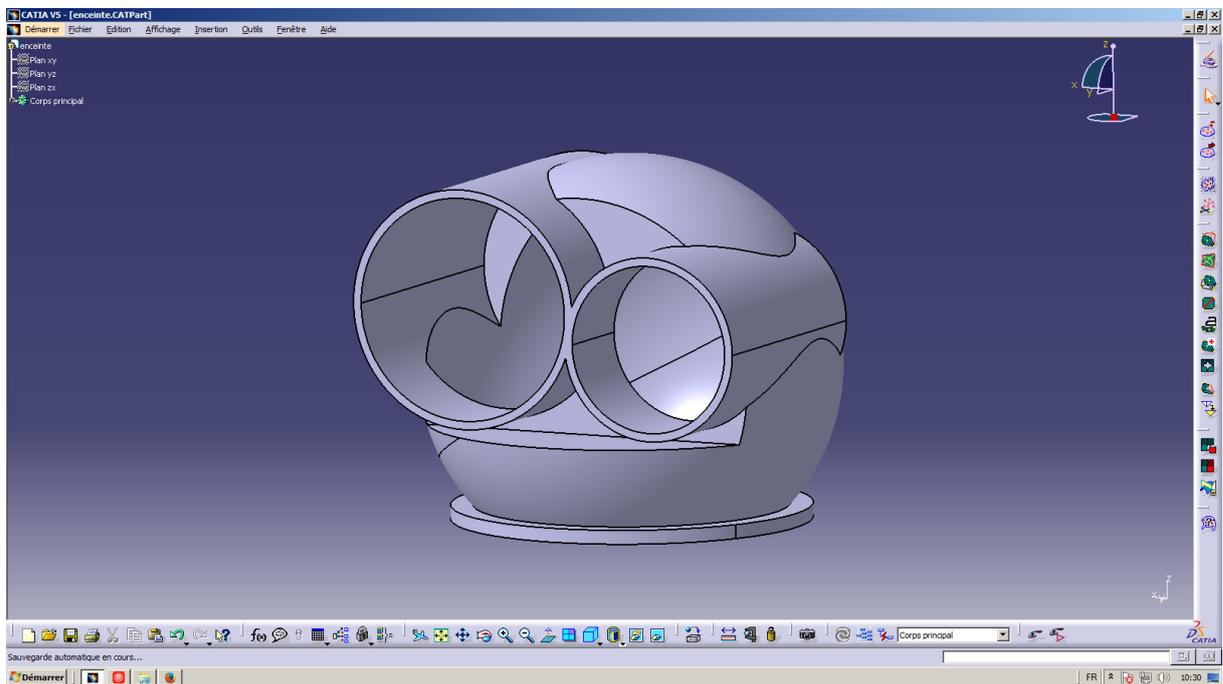


Fonte: Elaborado pelo autor.

A forma caricata do desenho permitia a alocação dos dois alto falantes um ao lado do outro. Ainda assim, o desenho final certamente seria desafiador, devido ao formato cônico dos alto-falantes e à estrutura esférica do design. A superfície abaixo do corpo do envoltório deveria ser plana, de forma a manter a caixa de som estável verticalmente.

Definido o esboço, o desenho tridimensional da caixa de som foi conduzido pelo software CATIA V5 Student Edition. A Figura 64 ilustra o desenho 3D final.

Figura 64 – Desenho tridimensional assistido por computador do envoltório da caixa de som. Software: CATIA V5 Student Edition

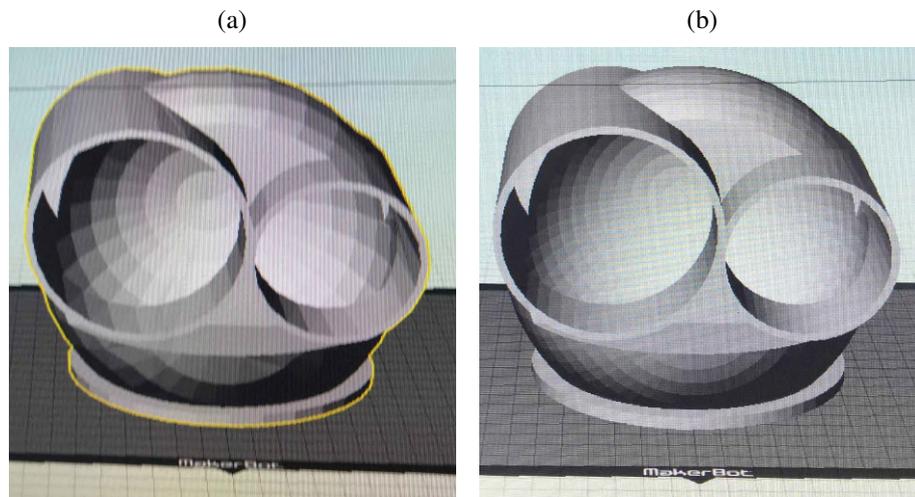


Fonte: Compilação do autor, Laboratórios de Fabricação Aditiva da ENSAM, Paris.

A esfera que continha os alto-falantes foi desenhada de forma a ter 150 mm de diâmetro, visando respeitar o limite máximo de medida requerida. Como esperado, desafios foram encontrados, tais como fazer caber dois alto-falantes que somados ocupavam um espaço de 140 mm, e ainda ter uma boa espessura no espaço cônico que os abrigaria. Este, por sua vez, possuía 3 mm de espessura, o que garantiria a qualidade da impressão 3D. Os valores somados das medidas ultrapassariam 150 mm, criando portanto a necessidade de se unir os dois espaços oculares em suas espessuras externas. Adicionalmente, o aparelho exigia abertura em sua parte inferior para acesso ao cabeamento e montagem dos alto-falantes.

Em relação à impressão 3D, um dos parâmetros cruciais foi a escolha da malha, que ditaria de forma importante o tempo de impressão. Diferentes malhas no formato STL foram geradas, com tamanho de elementos entre 0,5 mm e 0,1 mm. Como é apresentado na Figura 65a, uma malha muito espessa, como de 0,5 mm por elemento, poderia afetar o aspecto visual da caixa, apesar de trazer maior rapidez ao processo. Por isso, optou-se por escolher uma malha fina de 0,1 mm por elemento, Figura 65b. Outros parâmetros na impressão foram a espessura de camada de 0,3 mm e 90% de preenchimento. No total, foram necessárias 21h para a impressão da peça.

Figura 65 – Malha de impressão de 0,5 mm em (a) e 0,1 mm em (b)

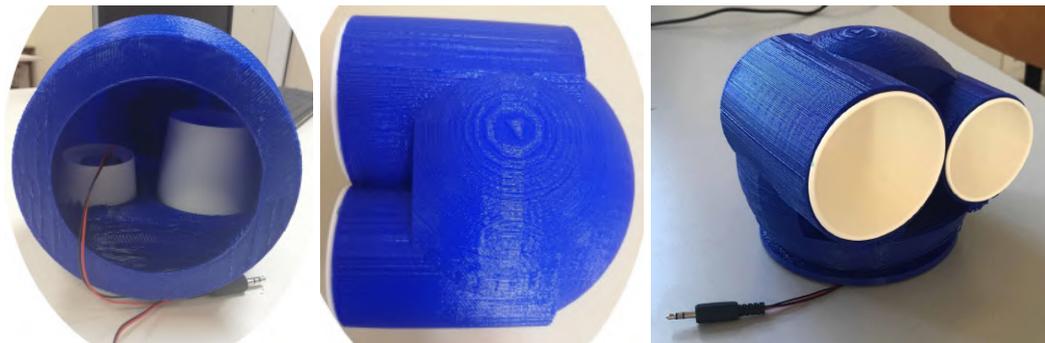


Fonte: Compilação do autor, Laboratórios de Fabricação Aditiva da ENSAM, Paris.

É importante notar que o tempo de impressão também é parâmetro a ser considerado, pois ele é determinante no número de máquinas necessárias para fabricação em massa dos aparelhos. Caso fosse optada uma malha de 0,5 mm, a fabricação levaria cerca de 4 a 5 vezes menos tempo para ser concluída, reduzindo significativamente o lead time.

Uma vez impresso o envoltório, a montagem completa da caixa de som pôde ser feita. A Figura 66 apresenta diferentes vistas do aparelho montado.

Figura 66 – Diferentes vistas da caixa de som montada. O envoltório foi impresso em PLA azul

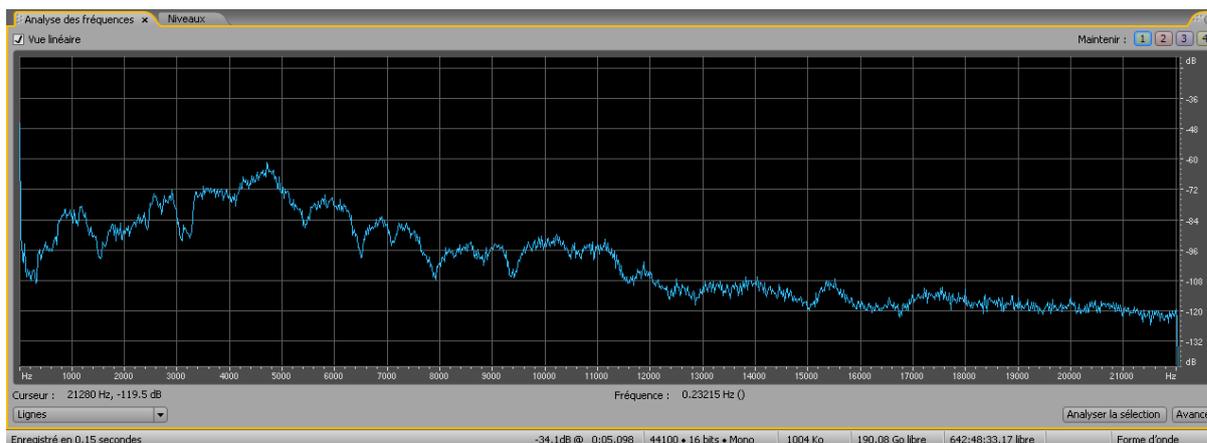


Fonte: Compilação do autor, Laboratórios de Fabricação Aditiva da ENSAM, Paris.

4.5 Análise de resposta de frequência

A análise de resposta de frequência trouxe como resultado o gráfico da Figura 67. O gráfico é composto de uma relação entre o nível de pressão sonora e as frequências. Os valores do NPS neste gráfico são meramente indicativos, sendo a diferença entre os níveis o mais importante.

Figura 67 – Curva de resposta de frequência (0 Hz - 22 kHz) analisada no software Adobe Audition 3.0.



Fonte: Compilação do autor, Laboratórios de Acústica da ENSAM, Paris.

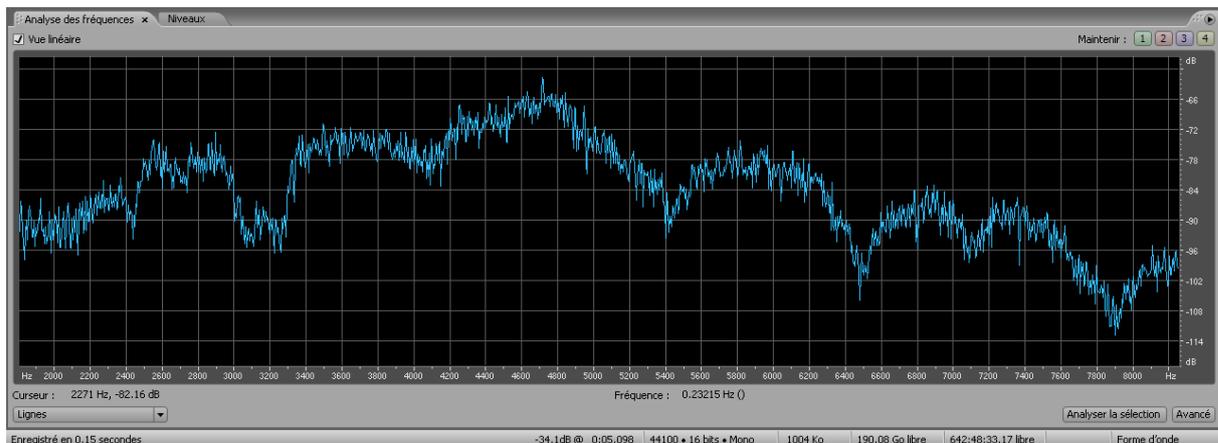
Do pico mais alto ao menor vale, nota-se uma diferença de até 60 dB, um valor bem acima dos padrões geralmente adotados, de até 6 dB. Como esperado, os alto-falantes possuiriam maior performance em apenas uma determinada largura de banda e pouco rendimento em outras. Essa discrepância poderia ser facilmente percebida por um ser humano, notando-se maior volume em alguns sons quando comparados a outros de frequências distintas. Mais especificamente, a curva evidencia que os alto-falantes possuíam pouca performance nos sons mais agudos e no extremo grave.

A curva de resposta de frequência busca obter de forma mais precisa possível a emissão direta, i.e., aquela que não sofre reflexões das superfícies adjacentes. Estas reflexões podem ser atenuadas com uma boa câmara anecoica. Como Toole (2008) esclarece, toda superfície refletora deve ser considerada como fonte. O professor explica que, por uma consequência física, ondas de maior frequência tendem a sofrer mais perdas de energia do que ondas mais graves.

A câmara anecoica utilizada no teste possuía o chão em madeira não espumada, que é um material refletor. Entretanto, apesar destes conhecimentos, não é possível afirmar que este tenha contribuído para a reflexão de ondas graves e alterado significativamente o resultado final. Isto só será possível saber com testes posteriores.

A curva evidenciou que os alto-falantes possuíam maior performance entre 2,5 kHz e 6 kHz, Figura 68. Isso era um indicativo de que os alto-falantes se enquadrariam na categoria dos Mid-Ranges, significando melhor performance em falas e outros sons médios e agudos.

Figura 68 – Curva de resposta de frequência (0 Hz - 8 kHz) analisada no software Adobe Audition 3.0.



Fonte: Compilação do autor, Laboratórios de Acústica da ENSAM, Paris.

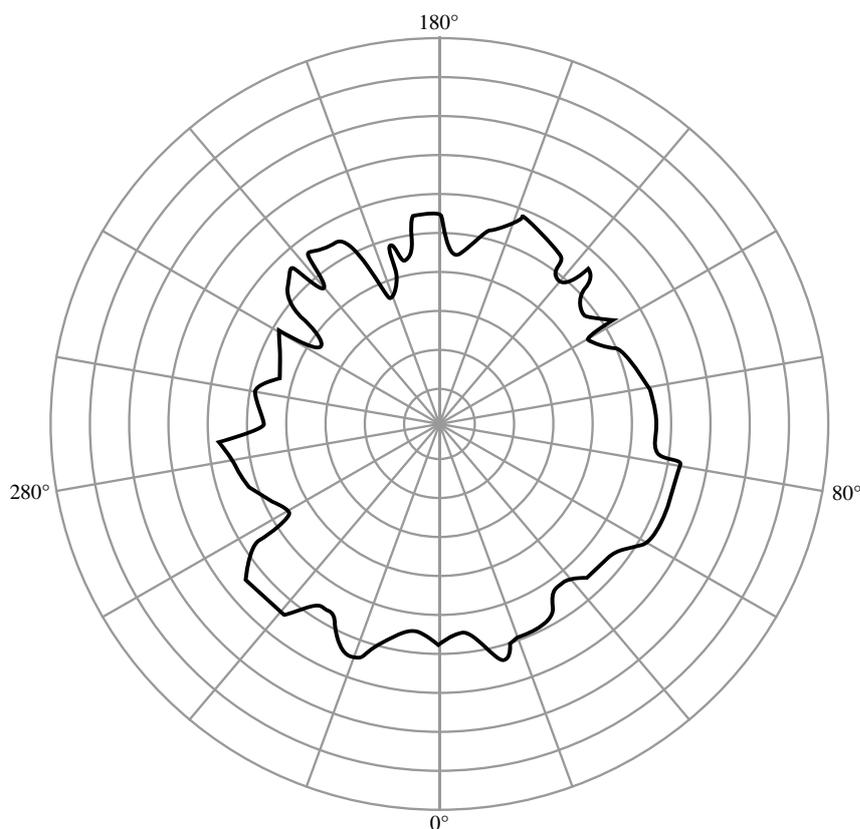
A amplitude máxima dentre as frequências da análise está localizada em 4,7 kHz. Esse resultado é coerente com a especificação do cristal piezoelétrico, que informa que a frequência fundamental do componente poderia variar entre $4,2 \pm 0,5$ kHz.

Por ser onde os alto-falantes possuíam a melhor performance, a frequência de 4,7 kHz foi utilizada para as análises seguintes.

4.6 Análise de diretividade

A diretividade para um sinal de 4,7 kHz do aparelho sonoro é ilustrada na Figura 69. Diferentemente do que é esperado para alto-falantes em geral, a diretividade da caixa de som produzida não é simétrica. O lado que continha o alto-falante de menor forma emitiu um nível de pressão sonora superior ao lado oposto.

Figura 69 – Diretividade dos alto-falantes para um sinal de 4,7 kHz. O ângulo 0 se alinha à vista frontal do aparelho



Fonte: Compilação do autor, Laboratórios de Acústica da ENSAM, Paris.

Isso se explica pelo fato de dois alto-falantes de formatos distintos terem sido testados conjuntamente. Como explica Borwick (2001), a forma da corneta tem papel fundamental na eficiência do alto-falante. Isso significa que se a forma varia, o som também varia a depender da frequência de emissão. A contribuição da forma no resultado também é abordada por Braga (2015) e pôde ser demonstrada no Capítulo 2.4.3.

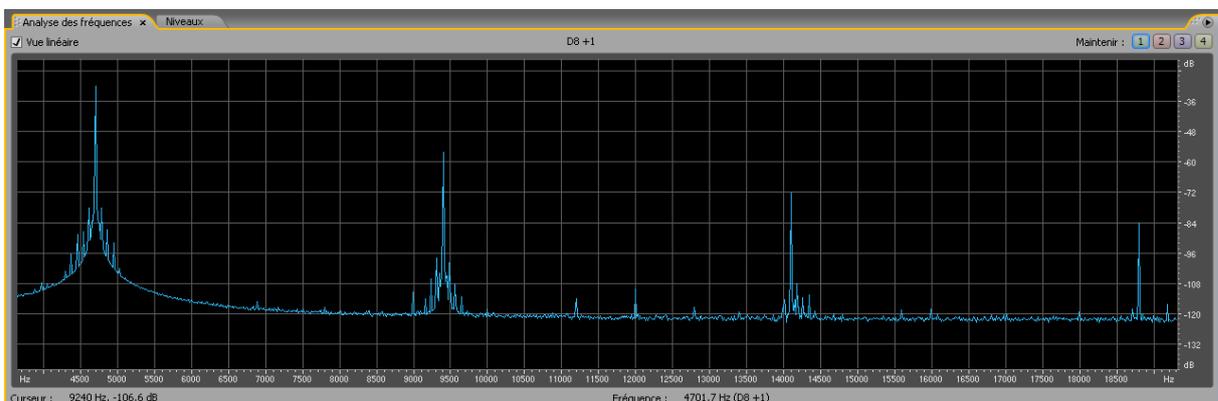
Beranek e Mellow (2012) mostram que a diretividade de um alto-falante se altera com a frequência. Quanto menor a frequência de emissão, maior a tendência esférica omnidirecional a diretividade do emissor possui. Se tratando de uma frequência de 4,7 kHz, não seria esperado que o alto-falante emitisse um som com diretividade aproximadamente esférica. A diretividade resultante confirma a suposição, visto que tal regularidade não é observada.

Como meio de comparação, análises posteriores com outras frequências de emissão poderiam ser conduzidas. Além disso, testes separados com cada um dos alto-falantes poderiam trazer uma melhor resposta das diferenças entre ambos. Como forma de aumentar a acurácia do teste, poderia ser utilizada uma mesa giratória para fazer o microfone percorrer 360° em relação à fonte de emissão sonora.

4.7 Taxa de distorção harmônica e nível de pressão sonora

A curva pela qual foi analisada a taxa de distorção harmônica dos alto-falantes está ilustrada na Figura 70. A curva foi obtida com a aplicação da transformada de Fourier da originária senoidal de 4,7 kHz. Inicialmente, é notória a presença de harmônicos não nulos à fundamental, o que é um indicador de distorções consideráveis. Pelo gráfico, os valores de NPS dos harmônicos puderam ser analisados, Tabela 6.

Figura 70 – Curva NPS x Frequência pós transformada de Fourier da curva senoidal de 4,7 kHz. O curva evidencia a presença de harmônicos de intensidade considerável à fundamental. Análise conduzida no software Adobe Audition 3.0



Fonte: Compilação do autor, Laboratórios de Acústica da ENSAM, Paris.

Tabela 6 – Nível de pressão sonora dos harmônicos da fundamental de 4,7 kHz

Frequência (Hz)	4700	9400	14100	18800
NPS (dB)	92	66	50	38

Fonte: Elaborada pelo autor.

Portanto, pela Equação 2.13, a taxa de distorção harmônica dos alto-falantes é de 70%. No geral, era esperado um valor próximo de zero para a THD, a exemplo de outros alto-falantes anteriormente construídos com material semelhante no laboratório. Este alto valor de THD normalmente indicaria uma má qualidade do aparelho. Porém, isso não se mostrou tão relevante na prática, através de testes empíricos. Este resultado pode ser um indicativo da influência de pôr 2 alto-falantes em teste simultaneamente. Porém, somente testes posteriores individuais poderiam verificar tal suposição.

Para o nível de intensidade sonora, as 10 medidas da cúpula de raio 0,5 m foram conduzidas. As medidas dos pontos estão listadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores de NPS correspondentes aos pontos de medição da análise

Ponto	Medida (dB)
1	64,5
2	65,4
3	70
4	65,8
5	67,4
6	60
7	72,8
8	68,6
9	68,4
10	66,8

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Os valores acima correspondem a um NIS médio de 68,1 dB. Levando em conta a área da cúpula, o nível de potência sonora L_w é de cerca de 70 db, que é equivalente a uma potência sonora de $10,1 \mu W$.

Em relação à eficiência dos alto-falantes, as medidas feitas pelo osciloscópio, bem como a equivalência eficaz das medidas de tensão e corrente podem ser conferidas na Tabela 8.

Tabela 8 – Medições de parâmetros importantes da análise

Medições	Valores
U_{pp} (V)	26,2
U_{ef} (V)	9,3
U_{qpp} (V)	0,32
$R(\Omega)$	0,900
I_{pp} (A)	0,36
I_{ef} (A)	0,13
ϕ (rad)	0,0

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Em que U_{pp} é a tensão pico a pico fornecida à caixa de som, U_{ef} é a tensão eficaz fornecida, U_{qpp} é a queda de tensão pico a pico da caixa de som, R é a resistência da caixa de som, I_{pp} é a corrente pico a pico que passa pela caixa de som, I_{ef} é a corrente eficaz que passa pela caixa de som e ϕ é a fase da onda senoidal.

Tendo em mãos tais valores, a potência elétrica entregue pelo gerador de frequência era de cerca de 1,2 W. Assim, o valor da eficiência calculada da caixa de som foi de 0,001%. É importante frisar que o resultado considera o amplificador como parte integrante da caixa de som. Em geral, os valores de eficiência de aparelhos sonoros têm a característica de serem números bem reduzidos, pois a maior parte da energia é perdida para o calor.

Outro ponto a destacar está no fato de não ter sido observada defasagem no sinal elétrico da caixa de som. Isso é positivo, visto que não haveria quaisquer dificuldades em colocar múltiplos

alto-falantes do mesmo tipo juntos, não existindo atrasos entre si. Alto-falantes do tipo dinâmico, por outro lado, tendem a sofrer com esse fenômeno dada a sua natureza eletromagnética.

4.8 Filtragem da caixa de som

Anteriormente à filtragem, um dos alto-falantes teve de ser colado novamente. Por isso, houve a necessidade de se repetir o procedimento de resposta de frequência. A Figura 71 ilustra a resposta de frequência do aparelho pré filtro. O sinal sonoro entre 2,5 kHz e 6,0 kHz da resposta de frequência não se encontrava equilibrado. Era desejável que fosse feita uma filtragem do sinal de entrada, de modo a corrigi-lo.

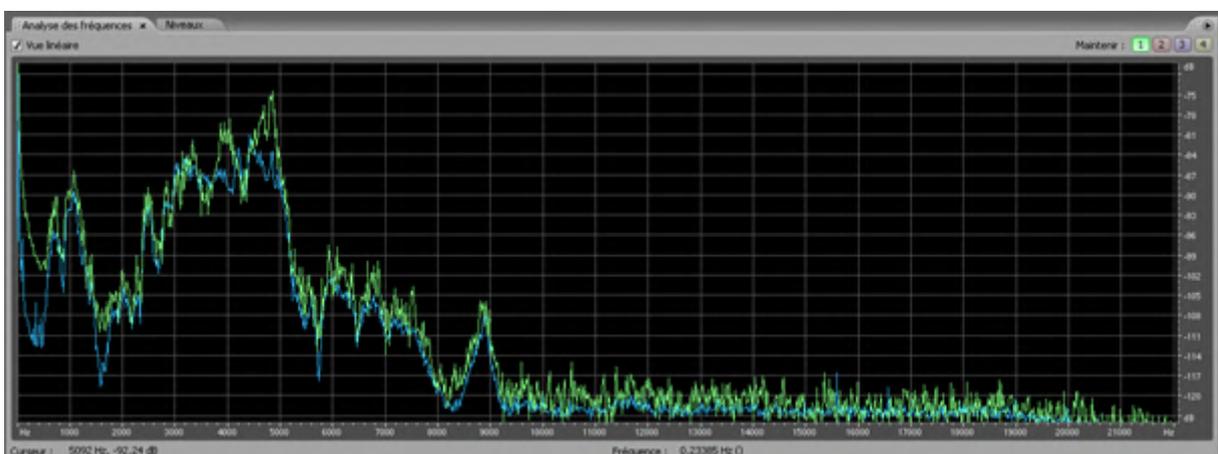
Figura 71 – Curva de resposta de frequência do alto falante pré filtro. Software Adobe Audition 3.0



Fonte: Compilação do autor, Laboratórios de Acústica da ENSAM, Paris.

A Figura 72 representa o sinal pós filtragem do ruído branco. A Figura 73 ilustra de forma ampliada a região de interesse.

Figura 72 – Resposta de frequência pós filtragem, em azul. Em verde, a curva pré filtragem. Adobe Audition 3.0



Fonte: Compilação do autor, Laboratórios de Acústica da ENSAM, Paris.

Figura 73 – Resposta de frequência pós filtragem, em azul. Em verde, a curva pré filtragem - figura ampliada.



Fonte: Compilação do autor, Laboratórios de Acústica da ENSAM, Paris.

Percebe-se uma ligeira diferença nas curvas de resposta de frequência antes e pós manutenção de um dos alto-falantes. Isso evidencia a influência clara no posicionamento do elemento vibratório.

A resposta de frequência anterior ao procedimento de equalização apresentava uma elevada variação de aproximadamente ± 40 dB entre o pico mais alto e o vale mais baixo. Porém, após a filtragem, este valor se reduziu a ± 7 dB na zona de interesse. Este resultado se aproxima da especificação padrão de qualidade, não representando uma variação largamente perceptível a uma pessoa. Ainda que o processo tenha sido feito de forma manual, o resultado se mostrou satisfatório para o intervalo de interesse.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O projeto teve como objetivo fabricar e caracterizar uma caixa de som com alto-falantes piezoelétricos e envoltório em PLA. Para isso, recorreu-se a conceitos tanto na área de gestão de projetos quanto em métodos de fabricação e mecânica acústica.

Num primeiro bloco houve como objetivo entender a funcionalidade do produto através do estado da arte. Nele, foi possível melhor assimilar o mercado de atuação do produto, bem como tomar ciência dos diferentes tipos de alto-falantes e caixas de som existentes. Além disso, foi também possível entender melhor a funcionalidade e influência tanto da forma quanto da física empregada em cada tipo de aparelho, e desta maneira compreender suas forças e limites.

Um segundo bloco focou em compreender os limites e riscos do projeto e do produto. Para isso, foram empregadas ferramentas de gestão de projeto e de riscos. Através da análise FOFA e FMEA, ficou nítido que o trabalho poderia ter maiores dificuldades na comunicação entre seus integrantes, além de ter maiores riscos caso os testes não pudessem ser conduzidos. Através dos diagramas de Gantt e PERT, foi possível estabelecer prazos e organizar as tarefas de acordo com as disponibilidades da equipe. Assim, as análises como um todo contribuíram de forma significativa na gestão tanto de recursos humanos quanto materiais empregados ao longo do trabalho.

Em seguida, buscou-se inferir e colocar em prática a metodologia de fabricação aditiva. Através dela, foi possível construir uma geometria complexa com material polímero em um espaço de tempo relativamente curto. Este resultado comprovou a versatilidade e potencial neste tipo de fabricação. Também neste bloco, buscou-se compreender os fenômenos de mecânica vibratória acústica. Esta compreensão permitiu que fossem fabricados alto-falantes piezoelétricos de baixo custo e com emissão sonora satisfatória. Assim, os protótipos mostraram que é possível produzir caixas de som personalizáveis a partir de um arquivo CAD.

Posteriormente, foram conduzidos testes que puderam verificar as características da caixa de som produzida. O testes em laboratório mostraram que os alto-falantes possuíam maior rendimento numa zona média de frequências, em coerência com as especificações dos cristais piezoelétricos. Ficou também evidente que o fato de a caixa de som ser provida de dois alto-falantes de formatos distintos contribuiu para uma diretividade não simétrica. Ainda que tenha sido detectada uma alta taxa de distorção harmônica da caixa de som, somente testes posteriores individuais em cada alto-falante poderiam indicar quais as reais causas deste resultado. Por fim, verificou-se a inexistência de defasagem do sinal sonoro além de um baixo rendimento do aparelho - uma característica já esperada para esse tipo de alto-falante.

Por fim, foi realizada uma equalização de ruído branco, de modo a simular uma filtragem dos alto-falantes. Para isso, foram feitas modificações no ganho de picos e vales do sinal original, em zonas de interesse. Os resultados se mostraram promissores através de um novo teste de resposta de frequência.

Em suma, a metodologia empregada neste trabalho que visou a compreensão do desenvolvimento de um protótipo se mostrou produtiva. Contudo, o processo poderia receber melhorias para trabalhos futuros. Dentre estes, podem ser pontuados:

- **Testar diferentes amplificadores de sinal.** Afinal, os amplificadores também possuem distorções ainda que pequenas. Seria interessante entender de fato qual a contribuição final ao resultado que ele possui;
- **Utilizar mesa giratória para realizar a análise de diretividade.** Com esta ferramenta, seria possível adquirir uma resposta mais fiel da diretividade. Ao invés de uma pessoa percorrer um espaço de 360° em relação à fonte emissora, com baixo número de medições, a mesa faria este trabalho. O número maior de pontos medidos traria maior acurácia ao processo, reduzindo possíveis falhas;
- **Conduzir os testes fora de uma câmara anecoica.** É sabido que as respostas de um aparelho sonoro diferem drasticamente de uma câmara anecoica para um ambiente real. Na verdade, a natureza complexa das ondas sonoras não permite previsões claras quanto ao funcionamento de um alto-falante, pois ele varia segundo o ambiente no qual o aparelho está inserido. Porém, certas condições podem ser imaginadas e testadas, como uma sala de estar, ou ambientes mais comuns;
- **Incorporar outros materiais nos alto-falantes.** Seria interessante perceber qual o real impacto sobre a mudança de materiais menos ou mais elásticos que o papel. Isso traria de modo claro as diferenças entre estes, permitindo maior entendimento acerca de suas influências do que com apenas um simples teste empírico;
- **Simular diferentes formas e materiais.** Ainda que estivesse na ideia inicial do projeto, a simulação por elementos finitos não pôde ser concluída. Dessa forma, para testes futuros, seria interessante simular diferentes formatos e materiais de alto-falantes e envoltórios. Isto sem dúvida traria maior compreensão sobre os fenômenos acústicos envolvidos e permitiria produzir de forma mais precisa as futuras caixas de som.

REFERÊNCIAS

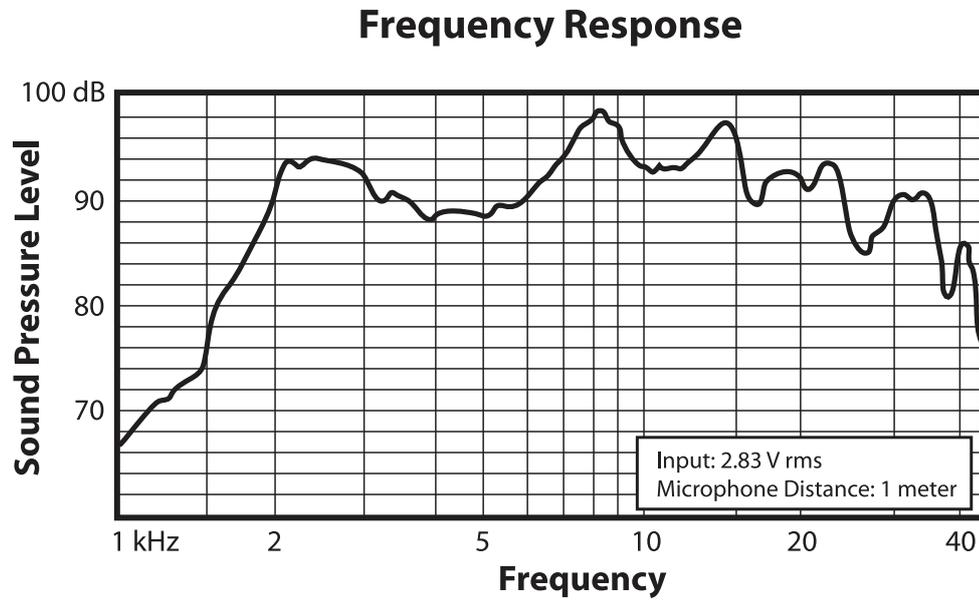
- ANTUNES, E. de G.; SOUSA, M. N. de; SCHERTEL, M. N. da C. Piso que transforma energia mecânica em eletricidade. 2014.
- BERANEK, L. L.; MELLOW, T. J. *Acoustics: Sound Fields and Transducers*. [S.l.]: Elsevier Science, 2012. ISBN 9780123914866.
- BORGES, A. N.; RODRIGUES, C. G. *Introdução à física acústica*. 2016.
- BORWICK, J. *Loudspeaker and Headphone Handbook*. 3. ed. Oxford: Focal Press, 2001.
- BRAGA, N. C. *Curso de Eletrônica - Fundamentos de Som e Acústica*. 1. ed. São Paulo: Institute NCB, 2015.
- BRUNEAU, M. *Manuel d'acoustique fondamentale. English*. London: Iste, 2006.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Materials science and engineering: an introduction*. 9. ed. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, Inc., 2014.
- CAMPBELL, T. et al. Could 3d printing change the world. Atlantic Council, Strategic Foresight Report, 2011.
- CARTER, B.; MANCINI, R. *Op Amps for Everyone*. 5. ed. [S.l.]: Elsevier, 2017.
- COUNTERPOINT RESEARCH. *Global Online Music Streaming Grew 32% YoY in 2019*. 2020. Disponível em: <<https://www.counterpointresearch.com/global-online-music-streaming-grew-2019/>>. Acesso em: 20-02-2021.
- DASSAULT SYSTEMS. Consumers want personalized products but won't wait for them and expect a cost benefit for their data. *Dassault Systems/CITE Research - CES 2020*, 2020.
- EARGLE, J. *Loudspeaker Handbook*. 2. ed. Boston: Kluwer Academic, 2003.
- ERASMUS. *IO1 – Methodology for defining 3D printing exercises suitable for transversal education*. [S.l.]: ERASMUS3D+, 2017.
- FERNANDES, J. F. M. *Estudo da Influência de Parâmetros de Impressão 3D nas Propriedades Mecânicas do PLA*. Dissertação (Mestrado) — Técnico Lisboa, Lisboa, oct. 2016.
- FORD SLN. Additive manufacturing technology: potential implications for u.s. manufacturing. *J Int Comp Econ*, 2014. P. 1–35.
- FORTUNE. *Ilustração*. 2018. Disponível em: <<https://fortune.com/2018/04/22/3d-printed-homes/>>. Acesso em: 10-02-2021.
- HARGREAVES, T. J. et al. Surface diffusion coefficients for room acoustics: Free-field measures. 2000.
- IANCU, C.; IANCU, D.; STĂNCIOIU, A. From cad model to 3d print via “stl” file format. 2010.
- IFPI. Ifpi global music report 2020 - the industry in 2019. 2020.

- Kim, H. J.; Yang, W. S.; No, K. Improvement of low-frequency characteristics of piezoelectric speakers based on acoustic diaphragms. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, v. 59, n. 9, p. 2027–2035, 2012.
- KISSCOM. *Ilustração*. 2018. Disponível em: <<https://www.kisscom.co.uk/news/3d-printing-a-world-of-possibilities>>. Acesso em: 10-02-2021.
- LANDY, G. *AMDEC Guide pratique*. 2. ed. La Plaine Saint-Denis: AFNOR, 2007.
- LARSON, E. W.; GRAY, C. F. *Gerenciamento de Projetos: o processo gerencial*. 6. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill education, 2016.
- LAVERNE, F.; SEGONDS, F.; DUBOIS, P. *Fabrication additive: Principes généraux*. Paris, 2016.
- LUCIDCHART. *O que é e como fazer diagrama de PERT*. –. Disponível em: <<https://www.lucidchart.com/pages/pt/o-que-e-como-fazer-diagrama-de-pert>>. Acesso em: 24-02-2021.
- MAKERBOT. *2020 Guide to 3d printing materials*. 2020.
- MAZZANTI, V.; MALAGUTTI, L.; MOLLICA, F. Fdm 3d printing of polymers containing natural fillers: A review of their mechanical properties. Italy, 2019.
- MESSINA, G. Estudio sobre el estado da arte de la investigacion acerca de la formación docente en los noventa. In: *REUNION DE CONSULTA TÉCNICA SOBRE INVESTIGACIÓN EN FORMACIÓN DEL PROFESORADO*. México: [s.n.], 1998.
- MICHA, D. N. et al. "vendo o invisível". experimentos de visualização do infravermelho feitos com materiais simples e de baixo custo. 2011.
- MIES, D.; MARSDEN, W.; WARDE, S. Overview of additive manufacturing informatics: a digital thread. *Integr Mater Manuf Innov*, 2016. Vol. 5(1):5–6.
- MONACOR. . 2019. Disponível em: <manacor.com>. Acesso em: 03-05-2021.
- MURATA. *Piezoelectric Sound Components*. 2017.
- NISHIDA, S. M. Curso de fisiologia 2012 ciclo de neurofisiologia. Botucatu, 2012.
- NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica, 2: fluidos, oscilações e ondas, calor*. 5. ed. São Paulo: Blucher, 2014.
- PIEZO SOURCE. . 2019. Disponível em: <<http://www.piezosource.com>>. Acesso em: 03-05-2021.
- PUENTE, J. et al. A decision support system for applying failure mode and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2002. Vol. 19 Issue: 2, pp.137-150.
- PUNTES, R. V.; AQUINO, O. F.; FAQUIM, J. P. da S. Las investigaciones sobre formación de profesores en américa latina: un análisis de los estudios del estado del arte (1985-2003). 2005.
- RABELO, M. H. S.; SILVA, E. K.; PERES, A. de P. Análise de modos e efeitos de falha na avaliação dos impactos ambientais provenientes do abate animal. 2012.

- REPORT LINK. Global loudspeakers industry. 2020.
- ROMANOWSKI, J. P.; ENS, R. T. As pesquisas denominadas do tipo "estado da arte" em educação. 2006.
- ROZENFELD, H. et al. *Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo*. 1. ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2010.
- RS PRO. *Buzzer piézo RS PRO*. 2019. Disponível em: <<https://fr.rs-online.com/web/p/buzzers-piezoelectriques/7243162/>>. Acesso em: 01-05-2021.
- SAKURADA, E. Y. *As técnicas de Análise do Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos*. Monografia (Dissertação de mestrado) — Eng. Mecânica/UFSC, Florianópolis, 2001.
- SARSBY, A. *A Useful Guide to SWOT Analysis*. Nottingham: Pansophix Online, 2012.
- SCHWAB, K. *The Fourth Industrial Revolution*. [S.l.]: World Economic Forum, 2016.
- SERWAY, R. A.; JR, J. W. J. *Princípios de física - Oscilações, ondas e termodinâmica*. 5. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015.
- STATISTA. *Global 3D printing products and services market size from 2020 to 2024*. 2020. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/315386/global-market-for-3d-printers/>>. Acesso em: 01-03-2021.
- STRATASYS. *3D PRINTING MATERIALS: CHOOSING THE RIGHT MATERIAL FOR YOUR APPLICATION*. 2015.
- STRATASYS. *Design Considerations for FDM Additive Manufacturing Tooling*. 2020.
- TEMME, S. Audio distortion measurements. 1992.
- TOOLE, F. E. *Sound Reproduction: Loudspeakers and Rooms*. Oxford: Focal Press, 2008.
- VIEIRA, D. R.; BOURAS, A.; DEBAECKER, D. *Gestão de projeto do produto*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. Cap. 6.
- WORLD INTERNET USERS STATISTICS. *World Internet Users Statistics and 2021 World Population Stats*. 2021. Disponível em: <<https://www.internetworldstats.com/stats.htm>>. Acesso em: 18-02-2021.

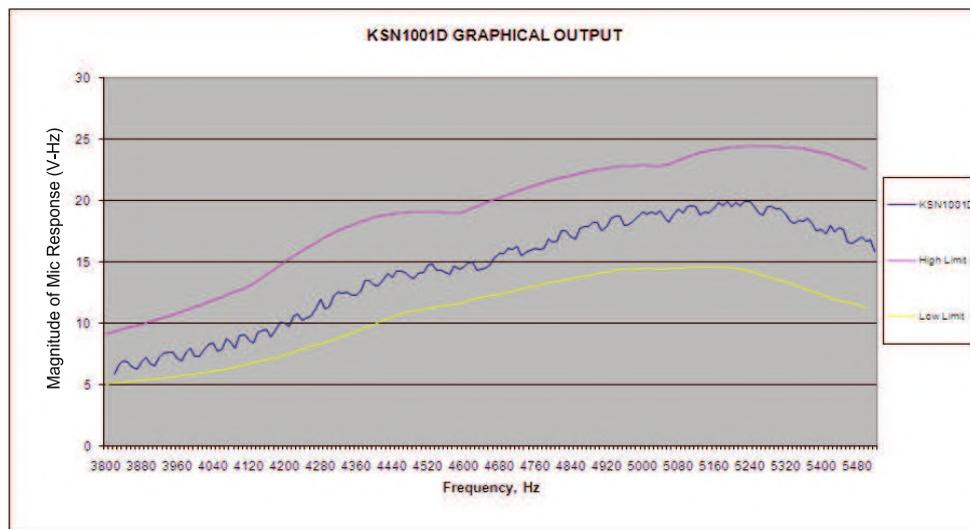
APÊNDICE A – RESPOSTA DE FREQUÊNCIA DE APARELHOS DO MERCADO

Figura 74 – Curva de resposta de frequência do modelo KSN 1141A da fabricante Piezo Source



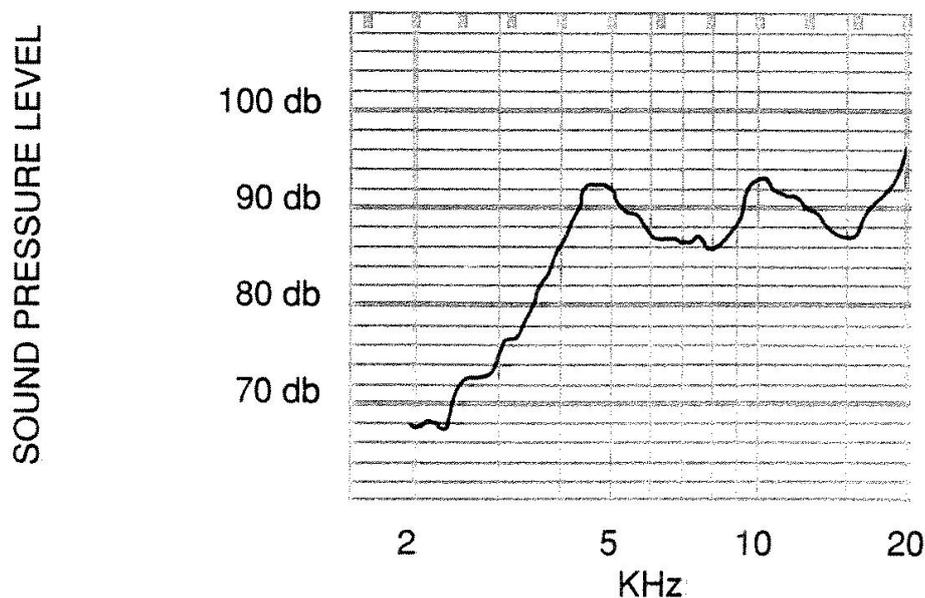
Fonte: PIEZO SOURCE. . 2019. Disponível em: <<http://www.piezosource.com>>. Acesso em: 03-05-2021.

Figura 75 – Curva de resposta de frequência do modelo KSN 1001D da fabricante Piezo Source



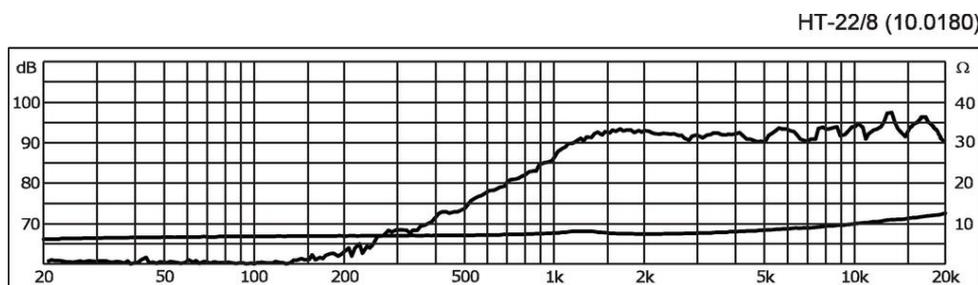
Fonte: PIEZO SOURCE. . 2019. Disponível em: <<http://www.piezosource.com>>. Acesso em: 03-05-2021.

Figura 76 – Curva de resposta de frequência do modelo KSN 1020A da fabricante Piezo Source



Fonte: PIEZO SOURCE. . 2019. Disponível em: <<http://www.piezosource.com>>. Acesso em: 03-05-2021.

Figura 77 – Curva de resposta de frequência do modelo KSN 1001D da fabricante Monacor



Fonte: MONACOR. . 2019. Disponível em: <manacor.com>. Acesso em: 03-05-2021.

APÊNDICE B – ANÁLISE FMEA DO PROJETO

Figura 78 – FMEA do produto/projeto. Parte I

Funções	Modos de falha	Causas de falha	Efeitos de falha	G	P	C	Ações corretivas
SWOT, Planejamento e Análise de Risco de Projeto: Go/No go	Coleta de informações	Análise errônea dos requisitos	Falta de informação nos requisitos	9	1	9	Validação com o cliente do projeto e reanálise dos requisitos
	Tratamento da informação	Análise de mercado não representativa	As informações encontradas são desatualizadas	3	1	3	Verificar a veracidade das informações recuperadas com base em múltiplas fontes
	Transmissão da informação	Má qualidade da gestão do projeto	Incompreensão entre os membros da equipe	9	1	9	Próximo a cada seção de trabalho, se certificar de que as tarefas sejam executadas corretamente
	Coleta de informações	Má escolha do material	Informações inadequadas quanto ao material	3	1	3	Se assegurar de que as informações sobre o produto utilizado são precisas
Escolha da forma e do material do AF	Tratamento da informação	Pouco domínio sobre os métodos de estudo de polímeros	Má formação	9	1	9	Para lidar com o equipamento de medida, é necessário garantir conhecimento prévio
	Transmissão da informação	Dados da pesquisa incorretos	Pesquisa mal coordenada	9	1	9	Garantir treinamento e capacitação no projeto
	Coleta de informações	O modelo elaborado não respeita o tamanho limite requerido (15cmx15cmx15cm)	Ignorar o limite máximo estabelecido para o tamanho	9	1	9	Certificar-se de que as três dimensões estão abaixo ou iguais a 15cm antes de iniciar o CATIA
Desenho preliminar do AF	Tratamento da informação	Dados ou informações incorretas no desenho	Falta de imaginação espacial	9	1	9	Certifica-se de que o modelo seja claro, independente de quem o analise
	Transmissão da informação	As dimensões não são claras	Informações de restrições ausentes	9	1	9	Certificar-se de que todas as dimensões sejam claras e legíveis
	Coleta de informações	Dados preliminares ruins	Confusão de dados antigos com atualizados	9	1	9	Certificar-se de que as informações são coletadas com o desenhista preliminar
CAD da caixa de som	Tratamento da informação	Mau uso do software CATIA	Falta de treinamento do software	9	1	9	Fazer treinamento CAD do software CATIA antes da sessão
	Transmissão da informação	Perda do arquivo STL	Má organização da equipe	3	1	3	Copiar o trabalho em um servidor em que todos possuam acesso (google Drive)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 79 – FMEA do produto/projeto. Parte 2

Funções	Modos de falha	Causas de falha	Efeitos de falha	G	P	C	Ações corretivas
Formação em métodos numéricos	Coleta de informações	Seção de treinamento inadequada	incompreensão das informações transmitidas	1	3	3	Certifique-se de que as informações estão disponíveis nos métodos numéricos que serão aplicados no processamento de dados do projeto (testes, etc.).
	Tratamento da informação	Mau uso do software ABAQUS	Falta de treinamento do software	3	3	9	Obter treinamento para o software ABAQUS
	Transmissão da informação	Simulação errada	Falta de recursos/conhecimento	3	3	9	Procurar outras fontes de informação que complementem o treinamento dado para cobrir todos os parâmetros exigidos pela simulação
Aplicação dos métodos numéricos	Coleta de informações	Características falsas do material atribuídas	Má informação quanto ao material	3	1	3	Certificar-se do material usado antes de iniciar a simulação
	Tratamento da informação	Pouco domínio do software ABAQUS	Má formação	3	1	3	Capacitar equipe de simulação
	Transmissão da informação	Simulação incompleta ou com informações falsas	Treinamento mal coordenado/ruim	9	1	9	Garantir uma boa coordenação/capacitação de equipe de simulação
Validação e otimização numérica do desenho	Coleta de informações	Correções a serem feitas no trabalho inicial	Incompreensão de informações	3	1	3	Repita as informações fornecidas para garantir uma boa compreensão
	Tratamento da informação	Má utilização do software ABAQUS	Falta de domínio do software	3	3	9	Treinamento da equipe responsável por esta etapa
	Transmissão da informação	Sem resultados da simulação	Falta de recursos/conhecimento	3	1	3	Pedir ajuda aos doutores em simulação
Fabricação da peça	Coleta de informações	Incompreensão das informações transmitidas	Sessão de treinamento inadequada	3	1	3	É necessário garantir que os cursos sejam de boa qualidade para que todas as informações sejam aprovadas com precisão
	Tratamento da informação	Pouco conhecimento sobre o uso da máquina	Má leitura e falta de recursos	3	1	3	Antes de fazer a manipulação da impressora 3D, é necessário que se tenha um pequeno curso sobre como funciona
	Transmissão da informação	Peça mal fabricada	Falta de filamento/Falta de suporte	3	3	9	Verificar a presença de fio suficiente para conduzir toda a impressão. É necessário verificar com o software se há necessidade de suportes

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 80 – FMEA do produto/projeto. Parte 3

Funções		Modos de falha		Causas de falha		Efeitos de falha		G	P	C	Ações corretivas	
Estudo da industrialização de produtos e cadeia de suprimentos	Coleta de informações	O produto não pode ser produzido em massa	Limite no número de máquinas e pessoal	Incapacidade de atender aos requisitos de industrialização	9	3	27	3	9	27	Compre máquinas suficientes, contrate funcionários suficientes e seja capaz de completar um número mínimo de pedidos	
	Tratamento da informação	Erro na estimativa da capacidade de produção	Não foi levado em conta os possíveis danos das impressoras 3D	A produção está abaixo da demanda	3	3	9	3	9	9	Obter o resultado certo da capacidade de produção	
	Transmissão da informação	Problemas de transporte (incluindo questões inadequadas de segurança de transporte)	Financiamento inadequado para logística	Incapacidade de entregar mercadorias a tempo ou acidentes de transporte frequentes	9	3	27	9	3	27	Investindo fundos suficientes para criar um sistema logístico abrangente, os motoristas de transporte usam um sistema de trabalho em equipe para reduzir acidentes	
Testes e Validação final da caixa de som	Coleta de informações	Problema de coleta de som no teste	O problema da impermeabilização do ambiente experimental	O ruído externo é misturado com o som do próprio alto-falante, que não pode ser distinguido	9	1	9	9	1	9	Exclua a interferência fora do laboratório	
	Tratamento da informação	Uso indevido de software de análise de áudio	Falta de conhecimento	Impossibilidade de distinção entre sons agudos e graves	3	9	27	3	9	27	Obtenha o desempenho do alto-falante nos agudos e baixos	
	Transmissão da informação	Danos ao AF durante o teste	Método de teste incorreto	Danos parciais impedem o alto-falante de funcionar corretamente	3	1	3	3	1	3	Siga rigorosamente as especificações experimentais e obtenha resultados precisos dos testes	

Fonte: Elaborado pelo autor.