



**Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Curso de Engenharia Aeroespacial**

**ESTUDO DOS RESSONADORES DO TIPO  
HELMHOLTZ PARA APLICAÇÃO EM *LINERS***

**Autor: Thales Bernardo Saque de Queiroz  
Orientador: Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos  
Júnior  
Coorientador: Dr. Henrique Gomes de Moura**

**Brasília, DF  
2019**



**THALES BERNARDO SAQUE DE QUEIROZ**

**ESTUDO DOS RESSONADORES DO TIPO HELMHOLTZ PARA APLICAÇÃO EM  
*LINERS***

Trabalho de conclusão de curso referente a graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Orientador: Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior  
Coorientador: Dr. Henrique Gomes de Moura

**Brasília, DF  
2019**



**ESTUDO DOS RESSONADORES DO TIPO HELMHOLTZ PARA APLICAÇÃO EM  
*LINERS***

**Thales Bernardo Saque de Queiroz**

Trabalho de conclusão de curso submetido como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 12/07/2019 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior, UnB/ FGA**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Henrique Gomes de Moura, UnB/ FGA**  
Coorientador

---

**Prof. PhD: Domenico Simone, UnB/ FGA**  
Membro Convidado

---

**Prof. Dr. Fábio Alfaia da Cunha, UnB/ FGA**  
Membro Convidado

Este trabalho é dedicado aos meus pais, irmã e tia, (*in memoriam*), a minha avó e irmão, e aos meus familiares e amigos que tanto me apoiaram.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço por este trabalho a minha família, que desde o início do curso me permitiu ser e escolher meu futuro profissional, ao professor Manuel pelo apoio incansável e didática no acompanhamento e desenvolvimento da pesquisa, a minha Médica Mônica Melo e ao meu terapeuta, Diego Lara, que cuidaram da minha sanidade mental nos momentos em que tudo parecia estar fora de controle, ao professor Henrique por dedicar seu tempo e empenho nos desafios práticos que esse trabalho tomou, ao Luiz Fernando, que sempre esteve presente pra ajudar quando dúvidas eram de cunho algébrico (MatLab), aos meus amigos que nos períodos mais difíceis como um pé quebrado, me ajudaram na dinâmica do meu dia a dia, para que o trabalho estivesse em seu prazo e não perdesse qualidade, em especial, Lucas Rufino e Rafael Libório. Agradeço também ao Yuri Bahia por ter me ajudado quando o desafio era da área eletrônica, bem como ao Felipe Tiago, que me fizeram andar e aprender muito nessa área que não é de meu domínio. A faculdade UnB Gama que me proporciona até os dias de hoje a realização dessa conquista e aos meus amigos que nunca me permitiram desistir.



*A persistência é o menor caminho do êxito.  
Charles Chaplin.*

## RESUMO

O transporte aéreo tem crescido muito nestes últimos anos e as projeções futuras é que ele cresça ainda mais. Com todo este desenvolvimento, surgem problemas ligados ao ruído das aeronaves, principalmente próximos às regiões aeroportuárias, conseqüentemente maior endurecimento da legislação específica. Avalia-se o ruído gerado por uma aeronave considerando-se três condições de voo: uma para pouso e duas para decolagem. O principal causador de ruído das aeronaves é o *Fan*, parte integrante do sistema propulsivo do avião. O *Fan* é rodeado por uma estrutura conhecida por *liner*. Tais estruturas do tipo *liner* são grandes aparatos que contêm pequenos ressonadores do tipo Helmholtz, a fim de que, por um efeito de ressonância, consigam mitigar o ruído emitido por estes *Fans*. Para tal análise dessas estruturas, utiliza-se de métodos analíticos e computacionais anteriormente aos testes experimentais, visto que estes são bastante onerosos às empresas. Sendo assim, o presente trabalho visa sua análise na forma analítica e experimental de baixo custo do problema de ruído, de acordo aos equacionamentos encontrados na literatura e as formas experimentais de se analisar um ressonador do tipo Helmholtz, analisando as variadas formas de geometria de um ressonador para aplicação em um *Liner*. Tais análises experimentais foram feitas primeiramente com a calibração de dois microfones de eletreto, os quais não possuem uma curva de calibração. A posteriori foi montado uma bancada de testes e desenvolvidos ressonadores por impressão 3D para a análise experimental, sendo estes com seção transversal hexagonal, combinando estas análises com diferentes configurações de dimensão e arranjo, por vezes em série, paralelo e até os dois juntos, num arranjo matricial. Observou-se que com a diminuição da profundidade da cavidade e com o aumento do número de ressonadores, aumentou-se a perda sonora.

**Palavras-chave:** Ressonador de Helmholtz, Impressão 3D, *Liner*, Ruído de avião, Aeroacústica.



## **ABSTRACT**

*Air transport has grown a lot in recent years and future projections are that it will grow even more. With all this development, problems related to aircraft noise arise, especially close to the airport regions, with consequently more tightening of the specific legislation. The noise generated by an aircraft is evaluated considering three flight conditions: one for landing and two for takeoff. The main cause of aircraft noise is Fan, an integral part of the propulsive system of the airplane. The Fan is surrounded by a structure known as liner. Such structures like a liner are large devices containing small Helmholtz Resonators type so that by a resonance effect they can mitigate the noise emitted by these Fans. For such analysis of these structures, analytical and computational methods are used prior to the experimental tests, since these are quite expensive to the companies. Thus, the present work aims at analyzing the low cost analytical and experimental of the noise problem, according to the equations found in the literature and the experimental forms of analyzing a Helmholtz resonator, analyzing the various forms of geometry of a resonator for application in a Liner. These experimental analyzes were first made with the calibration of two electret microphones, which do not have a calibration curve. After was set up a bench of tests and developed resonators by 3D printing for the experimental analysis, being these with hexagonal cross section, combining these analyzes with different configurations of dimension and arrangement, sometimes in series, parallel and until the two together, in a matrix arrangement. It was observed that with the decrease of the depth of the cavity and with the increase in the number of resonators, the sound loss was increased.*

**Keywords:** *Helmholtz resonator, 3D printing, Liner, Aircraft Noise, Aeroacoustics.*



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de <i>liner</i> em motor aeronáutico e em detalhe - Fonte: Bonomo, 2018.....	32
Figura 2 – Representação de um ressonador de Helmholtz por um sistema massa-mola – Fonte: Bonomo, 2018 .....	35
Figura 3 - Tubo com ressonador. Fonte: Adaptado de: Lenzi, 2012 .....	38
Figura 4 - Esquemático de um ressonador de Helmholtz paralelo – Fonte: Cabral 2016 .....	41
Figura 5 - Analogia elétrica de um simples modelo usando dois ressonadores, onde P: Pressão sonora e U: Velocidade volumétrica - Fonte: Seo and Kim 2005.....	43
Figura 6 - Aplicação de <i>liners</i> na turbina de um avião turbofan - Fonte: Serrano, 2014 .....	44
Figura 7 - Esquemas de diferentes tipos de <i>liner</i> - Fonte: Adaptado Spillerre, 2017.....	45
Figura 8 - Técnica de impressão 3D: SLA - Fonte: Price, 2012 .....	48
Figura 9 - Esquemático do método dos 2 microfones - Fonte: Selamet and Dickey, 1995 .....	50
Figura 10 - Valor eficaz ou RMS de potência - Fonte: Nakashima, 2005 .....	54
Figura 11 - Esquema com as dimensões geométricas [m] - Fonte: Motsinger, 1983 .....	56
Figura 12 - Painel de um arranjo de ressonadores de Helmholtz .....	59
Figura 13 - Posicionamento dos microfones na Câmara de teste .....	60
Figura 14 - Configurando um mesmo ganho para os microfones .....	60
Figura 15 - Caixa acústica montada .....	62
Figura 16-Esquemático simplificado – Fonte: Texas Instruments .....	64
Figura 17 - Primeira tentativa de montagem do circuito de amplificação.....	65
Figura 18 - Terceira tentativa da montagem do circuito de amplificação .....	65
Figura 19 - Quarta tentativa da montagem do circuito de amplificação .....	66
Figura 20 - Colocação das espumas na câmara anecoica .....	67
Figura 21 - Coeficiente de absorção sonora Sonex em câmara reverberante - Fonte: Owa Sonex, 2017 .....	67
Figura 22 - Polarização do Microfone de Eletreto. - Fonte: Blog novaeletrônica.....	68
Figura 23 - Esquemático das distâncias do tubo.....	71
Figura 24 - Distância entre os ressonadores .....	71
Figura 25 - Montagem do tubo de impedância já com os ressonadores.....	72
Figura 26 - Gráfico da frequência de 300Hz pela fonte .....	74
Figura 27 - Gráfico da frequência de 300Hz pelo microfone 1 para o teste sem ressonadores	75
Figura 28 - Gráfico da onda de 300Hz e o valor RMS para o teste sem ressonadores .....	75
Figura 29 - Gráfico comparativo da TL dos 3 ressonadores .....	77
Figura 30 - Gráfico da resistência acústica de acordo ao número de ressonadores.....	80
Figura 31 - Gráfico da reatância acústica de acordo ao número de ressonadores .....	81
Figura 32- Condução da onda (Fonte: Morgado Dias – Eletrônica II).....	86
Figura 33 - Diagrama do circuito do amplificador de potência - Fonte: Bruno Eletrônica.....	86
Figura 34 - Gráfico da <i>Transmission Loss</i> para os ressonadores Tipo A pela equação (9). .....	98
Figura 35 -Gráfico da <i>Transmission Loss</i> para os ressonadores Tipo B pela equação (9). .....	98
Figura 36 - Gráfico da <i>Transmission Loss</i> para os ressonadores Tipo C pela equação (9) .....	99
Figura 37 - Comparação da <i>Transmission Loss</i> para diferentes tipos de configuração de pescoço. ....	101
Figura 38 - Valores da <i>Transmission Loss</i> de acordo a 10 variações de comprimento de pescoço .....	101

Figura 39 - Comparação da <i>Transmission Loss</i> para diferentes tipos de configuração de cavidade.....	102
Figura 40 - Comparação da <i>Transmission Loss</i> para diferentes tipos de profundidade de cavidade.....	103
Figura 41 - Comparação da <i>Transmission Loss</i> para comprimentos de pescoço.....	104
Figura 42 - Comparação da <i>Transmission Loss</i> para diferentes tipos de configuração de cavidade.....	105
Figura 43 - Comparação da <i>Transmission Loss</i> para diferentes tipos de profundidade de cavidade.....	106
Figura 44 - Comparação da <i>Transmission Loss</i> para diferentes tipos de configuração de pescoço.....	107
Figura 45 - Comparação da <i>Transmission Loss</i> para diferentes tipos de configuração de cavidade.....	108
Figura 46 - Comparação da <i>Transmission Loss</i> para diferentes tipos de profundidade de cavidade.....	109
Figura 47 – Gráfico da resistência acústica de acordo ao número de ressonadores.....	109
Figura 48 – Gráfico da reatância acústica de acordo ao número de ressonadores.....	110
Figura 49 – Gráfico da resistência acústica de acordo ao número de ressonadores.....	110
Figura 50 – Gráfico da reatância acústica de acordo ao número de ressonadores.....	111
Figura 51 – Gráfico da resistência acústica de acordo ao número de ressonadores.....	111
Figura 52 – Gráfico da reatância acústica de acordo ao número de ressonadores.....	112
Figura 53 - Gráfico da impedância pelo número de ressonadores em série para a estrutura Hexagonal.....	112
Figura 54 - Gráfico da impedância pelo número de ressonadores em série para a estrutura cilíndrica.....	113
Figura 55 - Gráfico da impedância pelo número de ressonadores em série.....	114

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

RH	Ressonador de Helmholtz
IATA	Associação Internacional de Transporte Aéreo
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
RBAC	Regulamentos Brasileiros da Aviação Civil
RBHA	Regulamento Brasileiro de Homologação Aeronáutica
FAA	Federal Aviation Administration
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
NPS	Nível de pressão sonora
SPL	<i>Sound Pressure Level</i>
dB	Decibel
FA	Fabrico aditivo
TL	<i>Transmission Loss</i>
SLA	<i>Stereolithography</i>
UV	Ultravioleta
PETG	Politereftalado de Etileno Glicol
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
SDOF	<i>Single Degree of Freedom</i>
LPC	<i>Low Pressure Compressor</i>
3D	Três Dimensões
CI	Circuito Integrado

## LISTA DE SÍMBOLOS

$f_r$	Frequência de Ressonância	[Hz]
$k$	Constante de rigidez elástica	$ \frac{N}{m} $
$m$	Massa	[kg]
$V$	Volume da cavidade	[m <sup>3</sup> ]
$\rho_0$	Densidade do fluido	$ \frac{kg}{m^3} $
$S$	Área do pescoço	[m <sup>2</sup> ]
$L'$	Tamanho efetivo do pescoço	[m]
$r_n$	Raio do pescoço	[m]
$P$	Pressão	[Pa]
$C$	Velocidade do som	[m/s]
$Q$	Acuidade de ressonância	
$P_c$	Pressão acústica da cavidade	[Pa]
$Z$	Impedância Acústica	[Rayl]
$U$	Velocidade de volume	[m/s]
$f$	Frequência alvo	[Hz]
$A_p$	Área de seção transversal do tubo	[m <sup>2</sup> ]
$P_t$	Pressão transmitida	[Pa]
$P_i$	Pressão incidente	[Pa]
$F$	Força	[N]
$C_{+,i}$	Constante complexa	
$C_{+,tr}$	Constante complexa	
$A_v$	Área de seção transversal do tubo	[m <sup>2</sup> ]
$k$	Número de onda	
$\lambda$	Comprimento de onda	
$l$	Profundidade da cavidade	[m]
$V_c$	Volume do pescoço	[m <sup>3</sup> ]
$Z_c$	Impedância do ressonador	[m. s <sup>-1</sup> ]
$z_t$	Impedância do tubo	[m. s <sup>-1</sup> ]
$z_{eq}$	Impedância equivalente	[m. s <sup>-1</sup> ]
$N$	Número de ressonadores	

$h$       Altura geométrica      [m]

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões iniciais das geometrias propostas do TCC 1.....	56
Tabela 2 - Valores das Frequências naturais das geometrias propostas do TCC 1 .....	57
Tabela 3 - Novas dimensões para o ressonador Hexagonal .....	57
Tabela 4 - Novos valores das frequências naturais.....	58
Tabela 5 - Configurações para a impressão do PLA .....	69
Tabela 6 - Dados obtidos através da calibração dos microfones.....	73
Tabela 7 - Dados do teste sem ressonador no tubo.....	76
Tabela 8 - Dados da aquisição analisando 1 ressonador de profundidade $l = 0,055m$ .....	78
Tabela 9 - Dados da aquisição analisando 1 ressonador de profundidade $l = 0,040m$ .....	78
Tabela 10 - Dados da aquisição analisando 1 ressonador de profundidade $l = 0,028m$ .....	78
Tabela 11 - Dados da aquisição analisando 3 ressonadores de profundidade $l = 0,055m$ (Paralelo) .....	79
Tabela 12 - Dados da aquisição analisando 3 ressonadores de profundidade $l = 0,055m$ (Série) .....	79
Tabela 13 - Dados da aquisição analisando 3 ressonadores de profundidade $l = 0,040m$ (Paralelo) .....	79
Tabela 14 - Dados da aquisição analisando 3 ressonadores de profundidade $l = 0,040m$ (Série) .....	80
Tabela 15 - Dados da aquisição analisando 9 ressonadores de profundidade $l = 0,055m$ .....	81
Tabela 16 - Valores da <i>Transmission Loss</i> através da equação (9) .....	99
Tabela 17 - Valores da frequência natural calculados através das equações (6), (17) e (18)...	99
Tabela 18 - Valores da <i>Transmission Loss</i> calculados combinando das equações (6) e (17) com as equações (9) e (13) .....	100
Tabela 19 - Valores das frequências naturais avaliadas quando se altera o comprimento efetivo do pescoço .....	100
Tabela 20 - Valores das <i>Transmission Losses</i> avaliadas quando se altera o comprimento efetivo do pescoço .....	100
Tabela 21 - Valores das frequências naturais avaliadas quando se altera o volume da cavidade .....	102
Tabela 22 - Valores das <i>Transmission Losses</i> avaliadas quando se altera o volume da cavidade .....	102
Tabela 23 - Valores das frequências naturais avaliadas quando se altera a profundidade da cavidade.....	103
Tabela 24 - Valores das <i>Transmission Losses</i> avaliadas quando se altera a profundidade da cavidade.....	103
Tabela 25 - Valores das frequências naturais avaliadas quando se altera o comprimento efetivo do pescoço .....	104
Tabela 26 - Valores das TL's avaliadas quando se altera o comprimento efetivo do pescoço .....	104
Tabela 27 - Valores das frequências naturais avaliadas quando se altera o volume da cavidade .....	105
Tabela 28 - Valores das TL's avaliadas quando se altera o volume da cavidade.....	105
Tabela 29 - Valores das frequências naturais avaliadas quando se altera a profundidade da cavidade.....	105
Tabela 30 - Valores das TL's avaliadas quando se altera a profundidade da cavidade .....	106



Tabela 31 - Valores das frequências naturais avaliadas quando se altera o comprimento efetivo do pescoço .....	106
Tabela 32 - Valores das TL's avaliadas quando se altera o comprimento efetivo do pescoço .....	106
Tabela 33 - Valores das frequências naturais avaliadas quando se altera o volume da cavidade .....	107
Tabela 34 - Valores das TL's avaliadas quando se altera o volume da cavidade.....	107
Tabela 35 - Valores das frequências naturais avaliadas quando se altera a profundidade da cavidade.....	108
Tabela 36 - Valores das TL's avaliadas quando se altera a profundidade da cavidade .....	108
Tabela 37 - Tabela da impedância de acordo o número de ressonadores em série (Hexagonal) .....	112
Tabela 38 - Tabela da impedância de acordo o número de ressonadores em série (Cilíndrico) .....	113
Tabela 39 - Tabela da impedância de acordo o número de ressonadores em série .....	113
Tabela 40 - <i>Transmission Loss</i> para o arranjo em paralelo (Hexagonal) .....	114
Tabela 41 - <i>Transmission Loss</i> para o arranjo em série (Hexagonal) .....	114
Tabela 42 - Conjunto de resultados do ressonador analisado individualmente com profundidade de $l = 0,055m$ .....	115
Tabela 43 -Conjunto de resultados do ressonador analisado individualmente com profundidade de $l = 0,040m$ .....	115
Tabela 44 - Conjunto de resultados do ressonadores analisados individualmente com profundidade de $l = 0,028m$ .....	116
Tabela 45 - Conjunto de resultados do ressonadores analisados em paralelo com profundidade de $l = 0,055m$ .....	116
Tabela 46 - Conjunto de resultados do ressonadores analisados em série com profundidade de $l = 0,055m$ .....	117
Tabela 47 - Conjunto de resultados do ressonadores analisados em paralelo com profundidade de $l = 0,040m$ .....	118
Tabela 48 - Conjunto de resultados do ressonadores analisados em série com profundidade de $l = 0,040m$ .....	118
Tabela 49 - Conjunto de resultados do ressonadores analisados em paralelo/série com profundidade de $l = 0,055m$ .....	119
Tabela 50 - Resultados dos testes com o duto livre sem os ressonadores .....	120

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>30</b>
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO .....	30
1.2. MOTIVAÇÃO .....	30
1.3 OBJETIVOS .....	32
1.3.1 Objetivo Geral .....	32
1.3.2 Objetivos Específicos .....	32
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	33
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>35</b>
2.1 Ressonador de Helmholtz .....	35
2.1.1 Frequência de Ressonância.....	36
2.1.2 Nível de pressão sonora e perda de transmissão.....	37
2.1.3 Influência do arranjo – Arranjo de pescoços em paralelo .....	40
2.1.4 Impedâncias dos ressonadores.....	41
2.2 <i>Liner</i> 44 .....	
2.3 Motor Turbofan.....	46
2.4 Regulamentações sobre ruído .....	47
2.5 A impressora 3D.....	47
2.5.1 PLA – Ácido Polilático .....	49
2.6 Técnica dos dois microfones .....	50
2.7 Amplificadores.....	50
2.8 Transformada de Fourier.....	51
2.8.1 Transformada Rápida de Fourier (FFT) .....	53
2.9 Valor Eficaz (RMS).....	53
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>56</b>
3.1 Modelagem com ressonadores de um só pescoço .....	56
3.2 Análise em Paralelo e Série .....	58
3.2.1 Análise em Paralelo .....	58
3.2.2 Análise em Série .....	58
3.3 Calibração dos Microfones .....	59
<b>4 CONSTRUÇÃO E TESTES.....</b>	<b>62</b>
4.1 Dimensionamento da caixa acústica .....	62
4.2 Tubo de Impedância.....	63
4.3 Circuito de Amplificação .....	63
4.4 Calibração dos Microfones de Eletreto.....	66
4.4.1 Caixa anecoica.....	66
4.4.2 Funcionamento dos microfones.....	68

4.5 Modelagem e Impressão dos ressonadores.....	69
4.6 Construção da bancada de testes.....	70
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>73</b>
5.1 CALIBRAÇÃO DOS MICROFONES .....	73
5.2 Aquisição de dados e testes sem a presença de ressonadores.....	75
5.3 Testes com a presença de 1 ressonador no tubo .....	77
5.3.1 Análise experimental dos ressonadores avaliados individualmente.....	77
5.3.2 Análise experimental dos ressonadores em paralelo e série (3 ressonadores) .....	79
5.3.3 Análise experimental dos ressonadores arranjados em paralelo e série simultaneamente (9 ressonadores).....	81
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>82</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>83</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>85</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>88</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>88</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O transporte aéreo cresceu muito nos últimos anos. Em março de 2018, comparado ao mesmo período de 2017, esse crescimento chegou a 9,5%, segundo a Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA). Algumas pesquisas ainda preveem que o tráfego aéreo irá mais que dobrar pelos próximos 20 anos. (AIRBUS, 2018). Este crescimento significativo traz consigo, além de desenvolvimento econômico, alguns fatores que prejudicam a qualidade de vida das pessoas nas zonas próximas aos aeroportos, em virtude dos grandes índices de ruídos gerado pelas aeronaves. O ruído afeta diretamente a qualidade de vida das pessoas, causando efeitos psicológicos e fisiológicos, como dores de cabeça, estresse, desconcentração, entre outros.

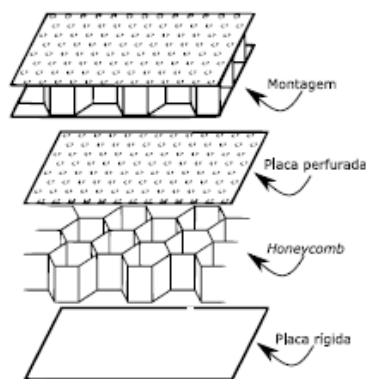
### 1.2. MOTIVAÇÃO

No intuito de diminuir o impacto dos ruídos nesses locais, as aeronaves devem cumprir com algumas regulamentações. A ANAC, órgão regulador brasileiro, tem o RBAC 36 – Requisitos de ruído para a aeronave (RBAC - Regulamentos Brasileiros de Aviação Civil), sendo a mesma norma adotada pela FAA (*Federal Aviation Administration*), agência reguladora Americana, que determina os níveis aceitáveis de ruído que uma aeronave pode ter. Há também o RBAC 91 – Subparte I – Regras operacionais de ruído, que proíbe o voo de aeronaves cujo nível de ruído esteja acima do permitido. Essas regulamentações são oriundas das recomendações da ICAO (Organização de Aviação Civil Internacional), mais especificamente o Anexo 16 – Volume 1 *Aircraft Noise*.

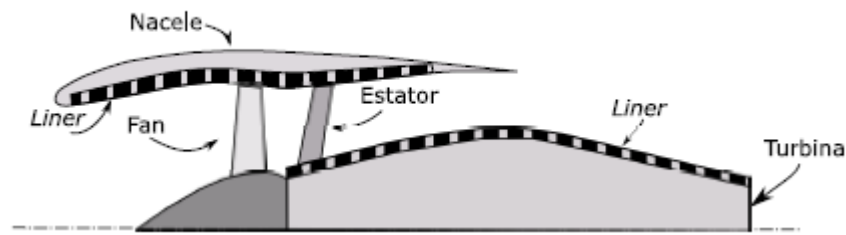
O ruído de uma aeronave, em geral, é oriundo de duas formas. A primeira é a interação do ar com a estrutura (flaps, asas, fuselagem, etc.), e a segunda é o ruído proveniente do motor. O ruído causado pelos motores tem duas componentes principais, sendo uma de banda larga, gerada pelo jato e a interação do escoamento com a estrutura do motor e, componentes tonais, geradas pela passagem das pás em rotação (SMITH, 2004), para o caso de motores turbofan. Durante o pouso e a decolagem, é o motor o maior responsável pelos altos níveis de ruídos da aeronave (BATARD, 2005), sendo esta a razão para que nos últimos

anos muito se tem feito no controle de ruído através de tratamentos acústicos passivo. Dessa forma, a principal forma de tratamento acústico utilizado em motores turbofan são os chamados *Liners*, um revestimento acústico estruturado como um painel *sandwich*, localizado nas paredes internas da Nacele, e que possui a função de reduzir as componentes tonais do ruído do *fan*. As propriedades acústicas são função de sua geometria e de sua condição de operação como a presença de escoamento e altos níveis de pressão sonora (NPS), que devem ser estimados para uma correta predição dos níveis de atenuação sonora. O nível de pressão sonora é uma medida para determinar o grau de potência de uma onda sonora. É determinada pela amplitude da onda sonora por duas razões: pela sensibilidade do ouvido às variações de pressão, e por ser uma quantidade simples de ser medida. A unidade internacional do nível de pressão sonora é o decibel (dB) (BIES e HANSEN, 2003).

Os *liners* geralmente são compostos por uma estrutura tipo *honeycomb* entre duas placas rígidas, geralmente em material metálico, em que a placa que é exposta ao escoamento é toda perfurada (SPILLERE, 2017). A vista explodida de um *liner* típico pode ser visto na Figura 1a e os lugares onde comumente são instalados os *liners* estão na Figura 1b.



(a) Representação em vista explodida de *liner*



(b) Vista em corte de um motoro *turbofan*. As áreas em quadriculado são regiões de aplicação de *liners*.

**Figura 1 - Esquema de *liner* em motor aeronáutico e em detalhe - Fonte: Bonomo, 2018**

Essa configuração pode ser vista como uma matriz de ressonadores de Helmholtz, de grande dissipação acústica em uma faixa estreita de frequência. Qualquer forma geométrica que consista de uma cavidade rígida ligada a um pequeno gargalo, quando ocupada por um fluido compressível, pode ser tratada como um ressonador de Helmholtz (SOEDEL, 1978).

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar diferentes formas geométricas de maneira teórica e experimental no estudo da mitigação da pressão sonora e perda sonora, com possíveis aplicações em situações reais como em um *liner*.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudo sobre os ressonadores de Helmholtz;
- Estudo sobre a tecnologia de Manufatura Aditiva e seus materiais;
- Análise algébrica dos arranjos geométricos de ressonadores de Helmholtz;
- Estudo sobre níveis de pressão sonora e *Transmission Loss*;
- Estudo sobre a impedância acústica;
- Montagem de uma bancada acústica para testes;

- Experimentação sobre a mitigação de ruído através dos ressonadores de Helmholtz;
- Montagens de circuitos de amplificação eletrônica;
- Definir uma curva de calibração para o microfone de eletreto.

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está dividido em cinco partes, sendo estas: Introdução, Referencial Bibliográfico, Metodologia, Construção e Testes, Resultados e Discussões e Conclusão.

A Introdução aborda os aspectos introdutórios do trabalho, sendo estes a contextualização do problema, a motivação, justificativa e os objetivos.

No referencial teórico, estão as discussões de outros autores sobre ressonadores de Helmholtz, *liners*, motores turbofan, impressão 3D, amplificadores, Transformada de Fourier e o procedimento experimental.

Na metodologia, abordou-se todo o processo de construção da pesquisa, desde a demonstração de como serão feitos os cálculos bem como a descrição de construção das geometrias através de material impresso em 3D, como será feito a calibração dos microfones, bem como os cálculos analíticos das geometrias propostas.

Na parte de Construção e Testes explana como foi feito a manufatura do tubo de impedância, a construção de circuitos eletrônicos, como os testes e as calibrações do sistema.

Na parte de resultados e discussões, é onde a partir das equações, juntamente com a revisão bibliográfica, bem como sobre as análises dos dados obtidos nos testes, discute-se seus resultados que subsidiarão toda a pesquisa. Pode-se observar que a partir da medição de várias frequências tendo os ressonadores como mitigadores de ruído, foram satisfatórios de acordo com as análises algébricas estudadas no TCC 1 bem como a teoria proposta.

Por fim, na Conclusão, observa-se que a maioria dos objetivos foram alcançados com o trabalho, não sendo possível apenas a análise prática da *Transmission Loss*

pelos ressonadores, tendo como perspectivas futuras o aprimoramento da coleta e análise dos dados para a verificação da *Transmission Loss* .

Encerra-se o trabalho com as Referências, Anexos e Apêndices.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Ressonador de Helmholtz

Foi em 1862, com a publicação do livro “*On the sensation of tone*” publicado por Hermann von Helmholtz que se discutiu pela primeira vez de forma científica a teoria de ressonância e as validades teóricas da lei de Ohm (HELMHOLTZ, 1985).

O ressonador de Helmholtz é um sistema absorvedor baseado na propriedade de dissipar energia em torno de uma frequência de ressonância, a qual é função das características geométricas do sistema (SANTOS, 2005).

Consiste de uma passagem de ar que se movimenta e está conectada com uma quantidade de ar presa num volume. Esse volume pode ter infinitas formas: concha, garrafa, estrutura de um instrumento musical, superfícies de paredes perfuradas. Quando o ar interior desses ressoadores entra em vibração para certa frequência de ressonância, pode dissipar a energia sonora transformando-a em energia mecânica, sob forma de atrito e funcionando, então, como absorvedor de som (SILVA, 2002). O volume de ar age como uma mola que é comprimida e rarefeita ao receber ondas sonoras de pressão pela entrada do ressonador. O gargalo, ou pescoço na entrada do ressonador pode ter comprimento variável e com isso alterar a inércia do sistema, ou seja, a massa de ar que vibra na boca do ressonador. Juntos o volume e o gargalo, forma-se um sistema massa-mola que é amplamente modelado e equacionado nos estudos mecânicos.

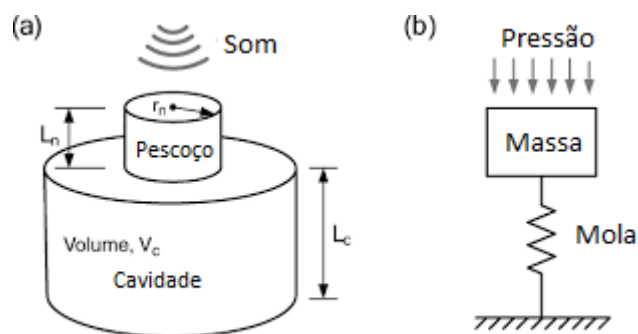


Figura 2 – Representação de um ressonador de Helmholtz por um sistema massa-mola –  
 Fonte: Bonomo, 2018

VANDERGRIFT (1993) obteve em seu artigo a função de Green para um ressonador de seção quadrada, aplicado a uma cavidade acústica fechada contendo uma fonte de excitação pontual de baixas frequências. Ele chegou à conclusão que a abertura do pescoço deveria ser muito menor do que as dimensões da cavidade a ser controlada e que, essa cavidade, não deveria ter seu comprimento muito maior que o diâmetro de sua seção transversal.

NAGAYA *et al.* (2001) discutiram em seu artigo um método de redução de ruído via um ressonador de Helmholtz de ajuste automático de dois estágios rotativos, para o controle de ruído de um ventilador, o qual emitia som de frequências altas e variadas

### 2.1.1 Frequência de Ressonância

Uma vez estabelecidos a analogia massa-mola de um ressonador de Helmholtz, pode-se aplicar as leis de Newton para obter a dinâmica do sistema.

A equação diferencial utilizando o equilíbrio de forças para um sistema não forçado será:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

A frequência de ressonância pode ser calculada usando a equação (1) e a solução é:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

Se o volume da cavidade é dado por  $V$ , então o fluido aprisionado no pescoço tem a seguinte massa:

$$m = \rho_o s L' \quad (3)$$

onde  $\rho_o$  é a densidade do fluido aprisionado e  $S$  é a área de seção transversal do pescoço do ressonador.  $L'$  é maior que  $L$  devido ao carregamento de massa de radiação.  $L'$  pode ser calculado como se segue:

$$L' = L + 1.7r_n \quad (\text{Exterior e flangeado}) \quad (4)$$

$$L' = L + 1.5r_n \quad (\text{Exterior e sem flange}) \quad (5)$$

Onde  $r_n$  é o raio do pescoço. Para determinar a rigidez do sistema, assume-se que o ar aprisionado no pescoço é por um pistão hermético. Se o pistão é empurrado de alguma distância, o volume da cavidade mudará como  $\Delta V = -S\Delta l$ , como  $\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{-\Delta V}{V} = \frac{S\Delta l}{V}$ , então a pressão será:

$$P = \rho_o C^2 \frac{\Delta \rho}{\rho} = \rho_o C^2 \frac{\Delta V}{V} \quad (6)$$

Onde C é a velocidade do som. Como a força  $F = kx = PS$ , assim  $k = \frac{PS}{\Delta l}$ , então:

$$k = \rho_o C^2 \frac{S^2}{V} \quad (7)$$

Portanto, a frequência de ressonância de um ressonador de Helmholtz é:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_o C^2 \frac{S^2}{V}}{\rho_o S L'}} = f_r = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V L'}} \quad (8)$$

A equação (8) revela que para longos comprimentos de onda de pressão incidente (KINSLER, 1982),

$$Q = \frac{P_c}{P} = 2\pi \sqrt{V \left(\frac{L'}{S}\right)^3} \quad (9)$$

Onde  $P_c$  é a amplitude de pressão acústica dentro da cavidade. Então, na frequência de ressonância, o ressonador de Helmholtz age como um amplificador de ganho  $Q$ .

### 2.1.2 Nível de pressão sonora e perda de transmissão

Este estudo paramétrico é focado na comparação entre o efeito de diferentes fatores como o tamanho da cavidade, o raio do pescoço, o número de ressonadores de Helmholtz em cada painel, e adição de um material poroso no nível de pressão sonora e perda de transmissão.

Pressão de nível acústico é a taxa entre a pressão do som e a pressão de referência em uma escala logarítmica (BIES e HANSEN 2003):

$$SPL = 20 \log \frac{P}{P_0} = 20 \log \frac{ZU}{P_0} \quad (1)$$

$P_0$  é a pressão de referência comumente assumida por  $20 \mu Pa$ , ou  $2 \times 10^{-5} Pa \left(\frac{N}{m^2}\right)$ ,  $Z$  é a impedância e  $U$  é a velocidade volumétrica.

No caso de um ressonador de Helmholtz inserido em uma tubulação com seção transversal de área constante, como ilustrado pela figura 3, tem-se a clássica forma para a perda de transmissão sonora, também usualmente chamada de *Transmission Loss (TL)*, em um ramo lateral de um ressonador de Helmholtz é dado por:

$$TL = 10 \log \left[ 1 + \left( \frac{\sqrt{\frac{vS}{L'}} / 2A_p}{\frac{f}{f_r} \frac{f_r}{f}} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Onde  $A_p$  é a área de seção transversal do duto principal e  $f$  é a frequência alvo. Entretanto, ao separar as componentes da pressão sonora nas regiões lisas da tubulação, pode-se simplificar o cálculo da perda de transmissão ao considerar que a reflexão da terminação da tubulação é nula - terminação anecoica, onde toda a energia é absorvida e não refletida. A perda de transmissão calculada experimentalmente é dada por:

$$TL_{Ressonador} = 20 \log \left( \frac{p_t}{p_i} \right) \quad (3)$$

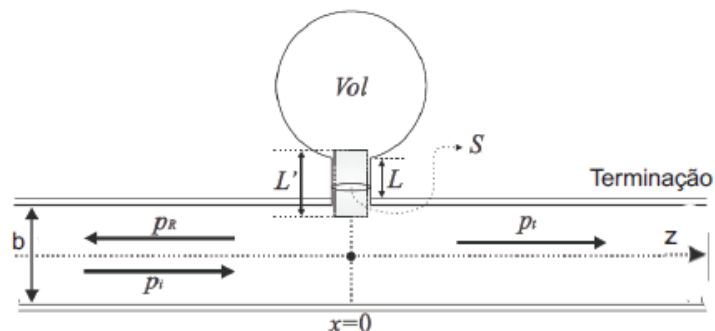


Figura 3 - Tubo com ressonador. Fonte: Adaptado de: Lenzi, 2012

Tem-se também que, para propagação planar de ondas sonoras, a *Transmission Loss* de um elemento acústico é calculada da seguinte forma (SELAMET e DICKEY, 1987):

$$TL = 10 \log_{10} \left| \frac{C_{+,i}}{C_{+,tr}} \right|^2, \quad (4)$$

onde  $C_{+,i}$  e  $C_{+,tr}$  são constantes complexas representando magnitudes dos harmônicos incidentes e pressão de onda transmitida, respectivamente. Assumindo pressão constante e conservação do fluxo de volume na intersecção do tubo, negligenciando efeitos viscosos e incorporando movimento ondulatório no volume e pescoço, a teoria de campo acústica clássica unidimensional dos ressonadores de Helmholtz, a *Transmission Loss* é dada por:

$$TL = 10 \log_{10} \left| 1 + \frac{S}{2A_p} \left[ \frac{1 + \varphi + (\varphi + 1)e^{-2ikl_c}}{1 + \varphi - (\varphi + 1)e^{-2ikl_c}} \right] \right|^2, \quad (5)$$

$$\varphi = \frac{A_v}{S} \left( \frac{e^{2kil} - 1}{e^{2kil} + 1} \right),$$

onde  $A_v$  é a área de seção transversal do volume e  $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c}$  é o número de onda,  $\lambda$  é o comprimento de onda. A equação (12) pode ser rearranjada para uma forma trigonométrica equivalente, como pode ser visto:

$$TL = 10 \log_{10} \left[ 1 + \left( \frac{S}{2A_p} \left[ \frac{\tan(kL') + \left(\frac{A_v}{S}\right)\tan(kl)}{1 - \left(\frac{A_v}{S}\right)\tan(kL')\tan(kl)} \right] \right)^2 \right] \quad (6)$$

Essa expressão geral pode ser facilmente reduzida a algumas relações bem conhecidas de simples geometrias. Por exemplo, sendo  $S = A_v$ , resulta em:

$$TL = 10 \log_{10} \left[ 1 + \left( \frac{S}{2A_p} \tan k(L' + l) \right)^2 \right]. \quad (7)$$

Deixando  $A_v/s$  próximo de zero, dá a seguinte expressão:

$$TL = 10 \log_{10} \left[ 1 + \left( \frac{S}{2A_p} \tan(kL') \right)^2 \right]. \quad (8)$$

Desde que a restrição de volume não seja imposta, o limite como  $S/A_v$  se próxima de zero, como:

$$TL = 10 \log_{10} \left[ 1 + \left( \frac{S}{2A_p} \cot(kL') \right)^2 \right]. \quad (9)$$

Adicionalmente, se o volume é fixado e  $l$  se aproxima de zero, a equação (13) se reduz a um modelo de volume aglomerado o qual inclui o movimento de onda no conector. Finalmente, fixando o volume e deixando ambos  $l$  e  $L'$  próximos de zero, o qual  $kl \ll 1$  e  $kL' \ll 1$ , dá a expressão paramétrica aglomerada, a equação (11), assumindo que  $k_r L' = \sqrt{\frac{V_c}{V}}$  é negligenciado em comparação com  $\frac{1}{k_r L'}$ , onde  $k_r = \frac{2\pi f_r}{c_0}$  e  $V_c = sL'$ . A *Transmission Loss* do ressonador se torna infinita com o denominador na equação (13) próximo de zero, produzindo uma expressão para locais de ressonância como se segue:

$$\tan(k_r L') \tan(k_r l) = \frac{S}{A_v} \quad (10)$$

Além disso, para um pescoço curto,  $k_r L' \ll 1$  e  $\tan(k_r l) \sim (k_r l)$ , então equação (19) pode ser simplificada a:

$$\left( \frac{A_v}{S} \right) \left( \frac{L'}{l} \right) k_r l = \cot k_r l. \quad (11)$$

Ademais, para um volume consideravelmente menor do que o comprimento de onda,  $k_r l \ll 1$  ou  $\cot k_r l \sim \frac{1}{k_r l}$ , a equação (18) se reduz a equação (6).

### 2.1.3 Influência do arranjo – Arranjo de pescoços em paralelo

Nessa seção tem-se um arranjo paralelo de pescoços conectados a uma mesma cavidade. A proposta do estudo é simular a resposta do sistema encontrando a frequência natural destes.

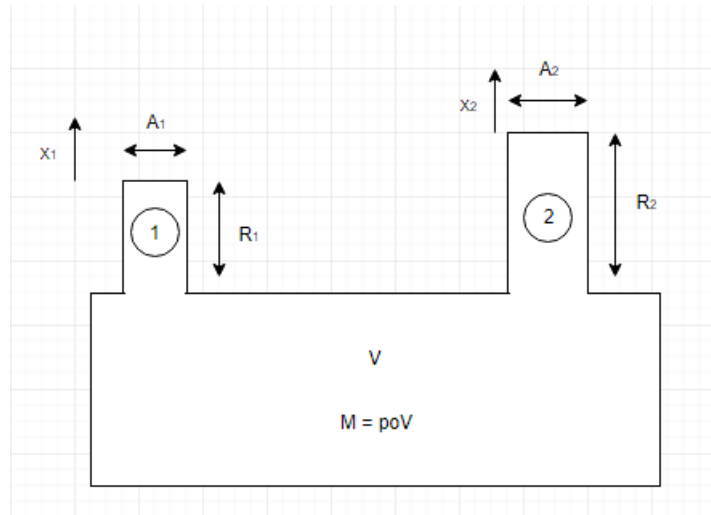


Figura 4 - Esquemático de um ressonador de Helmholtz paralelo – Fonte: Cabral 2016

Usando a segunda lei de Newton da quantidade de movimento

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x}{dt^2} = A_1 \Delta p = A_1 \int \frac{dp}{d\rho} d\rho = A_1 \int c_0^2 d\rho = A_1 c_0^2 \Delta \rho \\ v = \frac{1}{\rho} \Rightarrow dv = -\frac{d\rho}{\rho_0^2} \Leftrightarrow d\rho = -\rho_0^2 dv \Rightarrow \Delta p = -\rho_0^2 \Delta v \\ \Delta v = \frac{\Delta V}{M} = \frac{A_1 x_1 + A_2 x_2}{M} = \frac{A_1 x_1 + A_2 x_2}{\rho_0 V} \end{cases} \quad (12)$$

Sabendo que  $M_1 = \rho_0 A_1 l_1$ , temos que:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x_1}{dt^2} = \frac{c_0^2 l_0^2 A_1}{\rho_0 A_1 l_1} \frac{A_1 x_1 + A_2 x_2}{\rho_0 V} \Leftrightarrow \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{c_0^2}{l_1 V} (A_1 x_1 + A_2 x_2) \Leftrightarrow \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \\ \frac{c_0^2 A_1}{l_1 V} x_1 + \frac{c_0^2 A_2}{l_1 V} x_2 = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Para o segundo tubo, uma equação similar é obtida por:

$$\frac{d^2 x_2}{dt^2} + \frac{c_0^2 A_1}{l_2 V} x_1 + \frac{c_0^2 A_2}{l_2 V} x_2 = 0$$

Considerando que  $x_1 = X_1 e^{i\omega t}$ ,  $x_2 = X_2 e^{i\omega t}$  e depois de algumas manipulações matemáticas, temos que:

$$\omega_0 = \frac{c_0}{\sqrt{V}} \sqrt{\frac{A_2}{l_2} + \frac{A_1}{l_1}} \rightarrow f_r = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{V}} \sqrt{\frac{A_2}{l_2} + \frac{A_1}{l_1}} \quad (14)$$

Para um número  $n$  de pescoços, a frequência de ressonância é dada por:

$$f_r = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{V}} \sqrt{\sum_{n=1}^N \frac{A_n}{l_n}} \quad (15)$$

#### 2.1.4 Impedâncias dos ressonadores

A impedância acústica é um termo que indica a resistência oferecida por sistemas à propagação de ondas sonoras. Seu

conhecimento é indispensável quando se almeja descrever ou controlar o comportamento acústico de dutos cilíndricos, por exemplo.

Considerando que não existe velocidade no interior do duto, ou seja,  $Mach = 0$ , a impedância da cavidade do ressonador ( $Z_c$ ) e a impedância do tubo ( $Z_t$ ) podem ser calculadas através das equações (26) e (27) (BERANEK), como mostrado abaixo:

$$Z_c = -j \frac{c}{kV_c} [mS^{-1}] \quad (16)$$

$$z_t = \frac{ck^2}{\pi} + j \frac{ckL}{S_n} [mS^{-1}] \quad (17)$$

onde  $k$  é o número de onda tido por:

$$k = \frac{2\pi f}{c} \quad (18)$$

$V_c$  é o volume da cavidade em  $m^3$  e  $S_n$  é a área de seção transversal do pescoço em  $m^2$ .

#### 2.1.4.1 Análise de impedância equivalente em paralelo

A impedância equivalente ( $Z_{eq}$ ) de um arranjo de ressonadores em paralelo é tida da seguinte maneira (SEO and KIM):

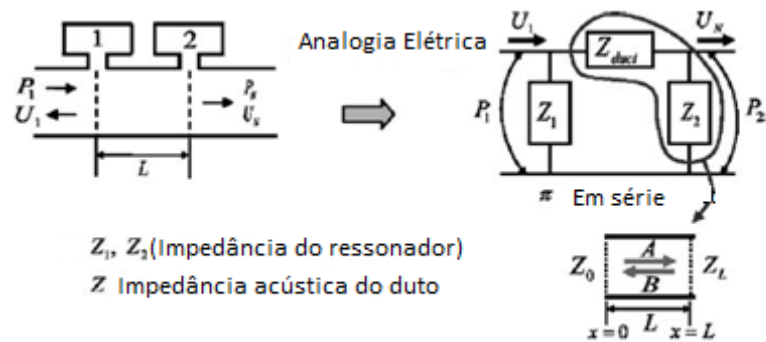
$$Z_{eq} = \frac{Z_t \cdot Z_c}{N \cdot Z_t + Z_c} \quad (19)$$

onde  $Z_t$  é a impedância do tubo,  $Z_c$  é a impedância do ressonador e  $N$  é o número de ressonadores.

#### 2.1.4.2 Análise de impedância equivalente em série

A figura 5 mostra uma analogia elétrica de um simples modelo utilizando dois ressonadores:





**Figura 5 - Analogia elétrica de um simples modelo usando dois ressonadores, onde P: Pressão sonora e U: Velocidade volumétrica - Fonte: Seo and Kim 2005**

Primeiro, considerando o segundo ressonador e a direção do tubo como mostrado na figura 5, a impedância  $x = L$  é tida como:

$$Z_L = \frac{z \cdot z_2}{z + z_2} \quad (27)$$

Como dito na figura 5, considerando que a propagação da onda tem magnitudes A e B na direção do tubo, a pressão sonora pode ser representada por:

$$P(x) = A e^{-jk(x-L)} + B e^{jk(x-L)} \quad (20)$$

Usando a equação (28), a impedância em  $x = 0$ ,  $x = L$  pode ser obtida como:

$$Z_L = \frac{P(L)}{U(L)} = Z \cdot \frac{A+B}{A=B} \quad (21)$$

$$Z_0 = \frac{P(0)}{U(0)} = Z \cdot \frac{A e^{jkL} + B e^{-jkL}}{A e^{jkL} - B e^{-jkL}} \quad (30)$$

Usando as equações (29) e (30), a impedância ( $Z_0$ ) em  $x=0$  pode ser avaliada como:

$$Z_0 = Z \cdot \frac{\left(\frac{Z_L}{Z_t}\right) + j \tan(kL)}{1 + j \left(\frac{Z_L}{Z_t}\right) \tan(kL)} \quad (22)$$

Finalmente, considerando o primeiro ressonador, a impedância equivalente ( $Z_{eq}$ ) de um arranjo em série pode ser obtida como se segue:

$$Z_{eq} = \left( \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_0} \right)^{-1} \quad (23)$$

Já para a transmissão e reflexão de ondas em um duto, tem-se a seguinte equação (KINSLER, 1982):

$$\frac{P_t}{P_i} = \frac{Z_{eq}}{\rho_0 c / 2.S + Z_{eq}} \quad (33)$$

sendo  $\rho_0$  a densidade do fluido,  $c$  a velocidade do som no meio e  $S$  a seção transversal do tubo.

Com isso, para o cálculo da *Transmission Loss* para um arranjo de ressonadores, substitui-se a equação (32) na equação (10) e encontra-se o valor da TL.

## 2.2 Liner

O *liner* tipicamente encontrado em aeronaves comerciais é uma estrutura em sanduíche, classicamente composta por uma ou mais placas perfuradas ou de poros fechados de fios entrelaçados, um suporte tipo colmeia ou fibroso e uma placa rígida como pode ser visto na figura 7 (SERRANO, 2014).

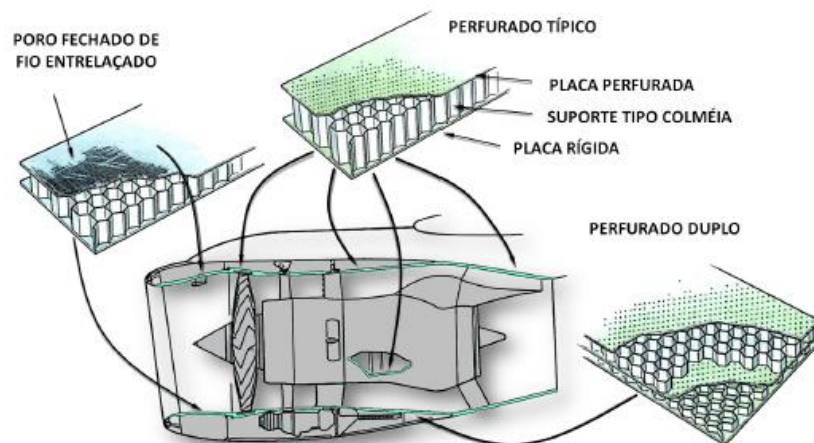


Figura 6 - Aplicação de *liners* na turbina de um avião turbofan - Fonte: Serrano, 2014

O escoamento durante o voo pode ser direcionado para a parte interna do motor ou passar por um duto externo anular chamado de *Bypass*, que direciona o ar atmosférico e o coloca em contato com o jato quente na saída do motor. Esse contato de ar frio com ar quente oferece

eficiência ao motor e cria uma região de transição de temperatura, densidade e velocidade do jato. Os *liners* por vezes são colocados no *Bypass* (SERRANO, 2014). Uma característica do *liner* é a do grau de liberdade, onde existe a atenuação em uma faixa estreita de frequências. Uma das alternativas são os *liners* de dois graus de liberdade, onde a adição de uma malha entre duas camadas da estrutura *honeycomb* produz uma faixa de atenuação mais abrangente (BONOMO, 2018).

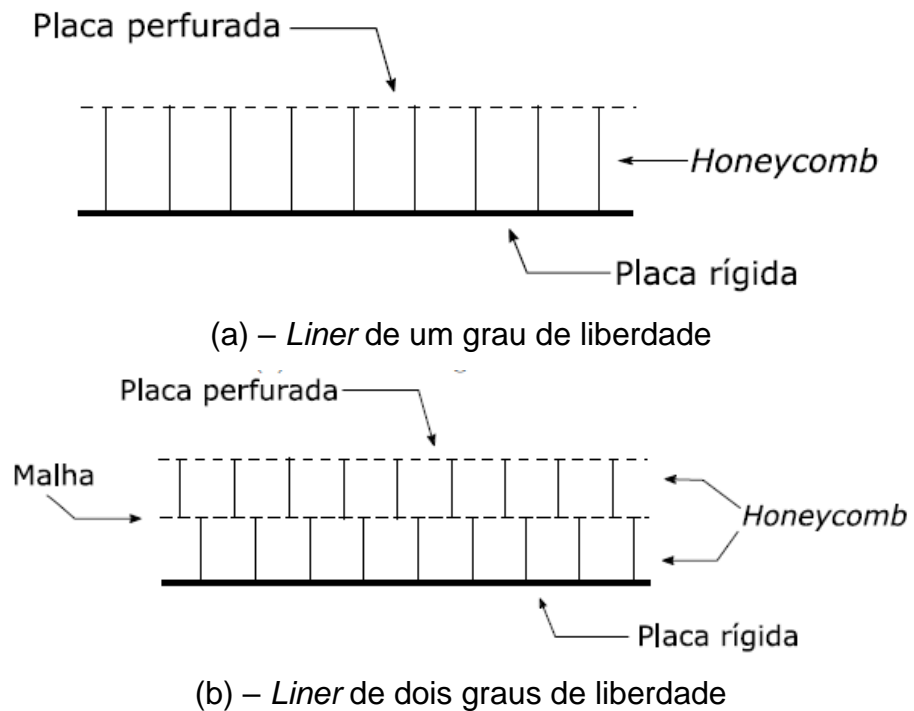


Figura 7 - Esquemas de diferentes tipos de *liner* - Fonte: Adaptado Spillerre, 2017

Os parâmetros geométricos podem ser ajustados de maneira a se obter uma faixa de atenuação centrada na componente tonal crítica. No caso de motores aeronáuticos, a frequência crítica é a de passagem de pá e seus harmônicos. Sabe-se que diâmetro dos furos, espessura e percentual de área aberta da placa perfurada e altura da cavidade afetam a impedância acústica do *liner* (MOTSINGER, 1991).

Para o cálculo do volume da cavidade, utilizar-se-á a equação de volume para um hexágono como segue:

$$V_h = \frac{3.a^2\sqrt{3}}{2} . h \quad (24)$$

onde  $a$  é o lado do hexágono e  $h$  é a altura.

Já para o cálculo do volume quadrado, tem-se a seguinte equação:

$$V_q = a^2 \cdot h \quad (25)$$

E para o cálculo do volume do cilindro, segue a seguinte equação:

$$V_c = \pi r^2 \cdot h \quad (26)$$

### 2.3 Motor Turbofan

O motor *Turbofan* é um motor a reação utilizado em aviões projetados especialmente para altas velocidades de cruzeiro, que possui um ótimo desempenho em altitudes elevadas, entre 10.000 metros e 15.000 metros, ou até um pouco mais, apresentando velocidades na faixa de 700 km/h até 1.000 km/h.

O motor é constituído por um *fan* (ventoinha, em inglês) que complementa o fluxo de ar gerado pelos compressores de baixa pressão e alta pressão. É um tipo bem mais moderno de motorização, uma evolução natural do motor turbojato (NASA, 2014).

Cada tipo de motor *turbofan* apresenta poucas diferenças no modo de operação, sendo que em todos os modelos modernos de motor *turbofan*, o *fan* é uma extensão de um compressor de baixa pressão (LPC, ou *Low Pressure Compressor*), este montado logo atrás do *fan*.

Praticamente todos os motores que impulsionam os aviões comerciais e executivos a jato, atualmente, são *turbofans*. Eles são apreciados por sua eficiência e por serem relativamente pouco ruidosos em relação aos modelos de aeronaves impulsionados por turbojatos (NASA, 2014).

São atualmente os mais viáveis métodos de propulsão para aeronaves comerciais por causa de seu alto poder e baixo consumo de combustível. No entanto, com a vasta regulamentação sobre o ruído impostos às aeronaves, fabricantes devem agora levar em conta o ruído externo ao voo uma consideração principal do projeto. O som que se propaga em um duto de entrada do *turbofan* aeronaves é quase inteiramente devido ao *fan*. O ruído do tom do *fan* é altamente dependente da potência do motor velocidade do *fan*. A geração de ruído do *fan* depende de muitos fatores (HANSON 2001).

O ruído de um motoro *turbofan* é predominantemente de uma faixa de frequência entre 800 e 10000 Hz.

## 2.4 Regulamentações sobre ruído

No que tange a regulamentação do ruído, o RBHA 91 - REGRAS GERAIS DE OPERAÇÃO PARA AERONAVES CIVIS. Na subparte I, Regras operacionais de ruído, como mostrado abaixo:

### **91.801 - APLICABILIDADE**

Esta subparte estabelece regras para operação de aeronaves civis no Brasil relacionadas com o nível de ruído produzido pelas mesmas. Esta subparte é aplicável às operações conduzidas segundo este regulamento e segundo os RBHA 121, 129 e 135.

### **91.803 - BASES DA REGULAMENTAÇÃO**

(a) As normas desta subparte são baseadas no Anexo 16 à Convenção Internacional de Aviação Civil, Volume I e na Portaria 13/GM5, de 05 de janeiro de 1994.

(b) Para fins de enquadramento nas regras desta subparte, as aeronaves civis brasileiras e estrangeiras são classificadas de acordo com o Capítulo do Anexo 16 em que se enquadram. As aeronaves que não se enquadram em nenhum dos Capítulos são denominadas "aeronaves não certificadas" (NC).

Como citado pela norma, há o Anexo 16 da ICAO, onde todas as diretrizes sobre o ruído são tratadas. Esse anexo, o *Volume 1 Aircraft Noise*, define quais são os tipos de aeronave a serem regulamentadas e quais são seus limites sonoros, sendo adotadas a posteriori, pela regulamentação de cada país, com as devidas adequações. As empresas de aeronaves então, são obrigadas a seguir tais normativos, para que suas licenças de operação e/ou comercialização de aeronaves continue vigente.

## 2.5 A impressora 3D

A tecnologia de impressão 3D auxilia na prototipagem de peças que até então, de formas diferentes de manufatura, seriam caras e levariam um enorme tempo. Para tal, na parte experimental do trabalho, projetou-se a prototipagem do arranjo de ressonadores de Helmholtz através da manufatura aditiva, devido a sua facilidade de trabalho, desperdício reduzido de material e custo baixo.

A primeira técnica de se produzir um protótipo a partir de um arquivo virtual foi descoberta por Chuck Hull em 1984. A invenção de Hull foi cunhada de estereolitografia ou *Stereolithography* (SLA) e patenteada em 1986. Esta técnica pioneira de prototipagem rápida foi definida pelo próprio inventor como “método e máquina para fazer objetos sólidos através da impressão sucessiva de finas camadas do material UV curável, uma em cima da outra”. (HULL, 1986).

No final da década de 80, Hull funda a 3D Systems cuja a atividade fim está diretamente relacionada com o desenvolvimento e comercialização da prototipagem rápida recém descoberta e patenteada. A 3D Systems atraiu atenção da mídia e do mercado na época, pois a SLA, desenvolvida por esta empresa, se utilizava comercialmente de um tipo de fabricação incomum: a fabricação aditiva. A fabricação comum é conhecida como subtrativa, pois basicamente consiste na usinagem, desbastamento, lapidação e outros métodos que retiram (ou subtraem) material a partir de um insumo bruto ou inacabado. Ou seja, a fabricação subtrativa faz uso de uma série de ferramentas previamente adquiridas ou fabricadas para tratar uma matéria prima. A combinação destes materiais já beneficiados é fator gerador do produto final. Na contramão deste fluxo, a fabricação aditiva não subtrai material a partir de uma matéria prima. As técnicas de impressão 3D, como a SLA, dispensam ferramentas intermediárias, exceto a própria impressora, para produzir. Para melhor compreensão, está representada graficamente (FIGURA 8) a técnica de impressão conhecida como estereolitografia.

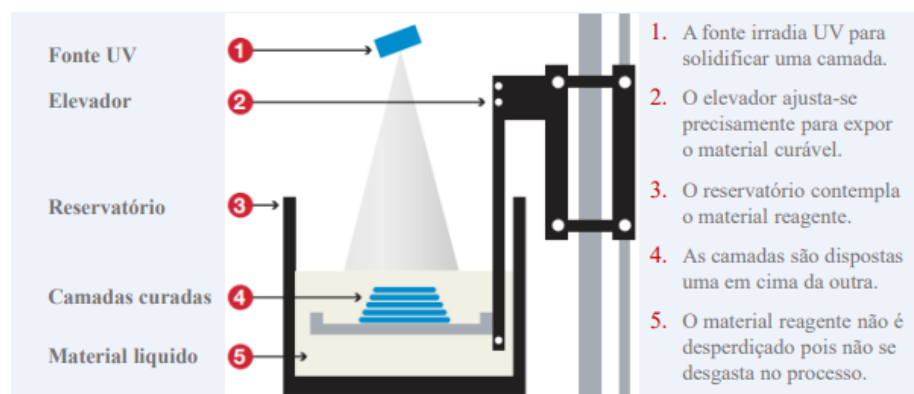


Figura 8 - Técnica de impressão 3D: SLA - Fonte: Price, 2012

O uso da tecnologia 3D na indústria é mais economicamente aplicável em designs complexos e alta personalização. A impressão 3D é vantajosa financeiramente se o volume de produção estiver entre 50 e 5000 unidades (SEDACCA, 2011).

A impressão 3D também vem sendo bastante difundida em ramos como a medicina e a engenharia. Na engenharia por exemplo, já é bastante utilizada para prototipagem, o que é uma grande vantagem quando se fala em custo. Uma das grandes vantagens é de trabalhar com geometrias complexas de maneira rápida e barata. Outra vantagem é a reduzida taxa de desperdício. Muitas outras vantagens podem ser obtidas através do FA, como por exemplo:

- Diminuição do tempo do desenvolvimento de produto;
- Diminuição dos erros de produção e conseqüentemente, menor custo;
- Aumento do número de variantes do produto, entre outras.

E devido à sua multidisciplinaridade e diversidade, as técnicas de fabrico aditivo encontram-se presentes nas mais diversas aplicações, nomeadamente na área alimentar, aeroespacial, automóvel, energia, bens de consumo, design, calçado entre outras (CHUA e LEONG, 2014).

### **2.5.1 PLA – Ácido Polilático**

O PLA é um termoplástico biodegradável derivado de fontes renováveis como amido de milho, raízes de mandioca e de cana, por isso é a opção mais ecologicamente amigável. Degrada-se em torno de 24 meses enterrado ou em 48 em água, o que é um tempo bem inferior quando comparado às centenas de anos dos outros plásticos.

Apresenta um aspecto brilhante e disponível em diversas cores opacas e translúcidas. É um termoplástico bastante rígido e resistente, o mais rígido comparado ao PETG e ABS, difícil de deformar ou flexionar, porém, devido a essa alta dureza, torna-se menos resistente a impacto entre os materiais aqui apresentados.

Sua alta fluidez de extrusão e baixa contração produz peças mais dimensionalmente precisas e com maior fidelidade aos detalhes, cantos mais acentuados e melhor acabamento de superfície do que os outros termoplásticos. Tem um custo relativamente baixo o que viabiliza a construção de protótipos.

## 2.6 Técnica dos dois microfones

A técnica dos dois microfones, (4 microfones para uma maior precisão), segue o padrão da ASTM E1050 – 12. Este é o método Teste Padrão para Impedância e Absorção de materiais acústicos usando um tubo, dois microfones e um sistema de análise de frequência digital. Um esquemático do modelo pode ser visto na imagem abaixo:

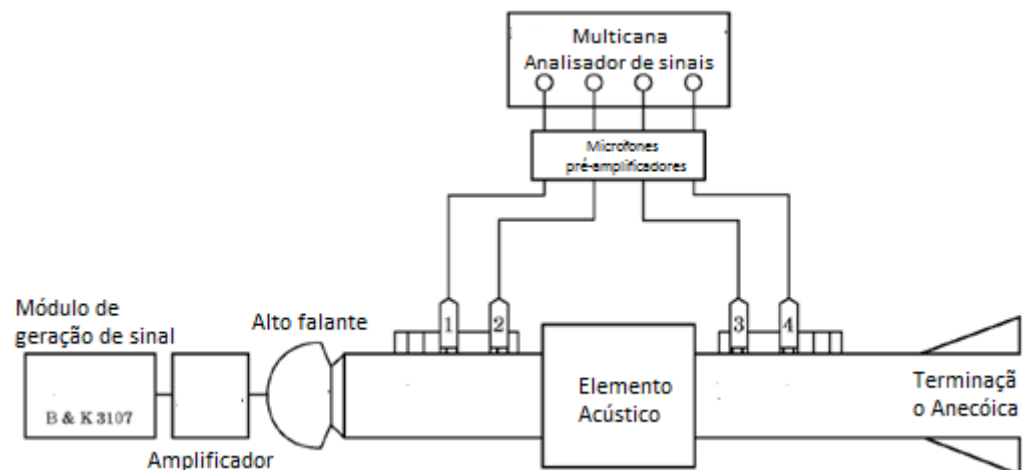


Figura 9 - Esquemático do método dos 2 microfones - Fonte: Selamet and Dickey, 1995

## 2.7 Amplificadores

### Amplificador Operacional

Amplificador operacional (Ampop) basicamente é um componente que permite um ganho para um sinal e com ele existem muitas aplicações possíveis. Uma das utilizações do ampop é no Ampop de Instrumentação. Este basicamente é um arranjo de ampops e resistores que permite facilmente variar o ganho do circuito, sem precisar usar um valor muito elevado para os resistores. Um circuito integrado (CI) é um componente composto por semicondutores, que miniaturiza um circuito



eletrônico. Existem vários de CIs de ampops e também existem alguns modelos para Ampop de Instrumentação.

### **Amplificador de Instrumentação**

O Amplificador de Instrumentação (In-amp) é um circuito eletrônico que basicamente elimina a necessidade do casamento de impedância com a resistência de entrada. Na prática é muito útil devido a maior proximidade com a idealidade e praticidade para com a variação do ganho, utilizando-se um potenciômetro. O In-amp é um ótimo circuito de amplificação para sinais de sensores. As principais características de um amplificador de instrumentação são: 1) Elevada impedância de entrada. 2) Controle do ganho através de uma única resistência. 3) Elevado ganho. 4) Elevada Rejeição de Modo Comum. (CMRR) 5) Perfeita simetria entre as entradas inversora e não inversora.

### 2.8 Transformada de Fourier

Em matemática, a transformada de Fourier é uma transformada integral que expressa uma função em termos de funções de base sinusoidal. Existem diversas variações diretamente relacionadas desta transformada, dependendo do tipo de função a transformar. A transformada de Fourier, epônimo a Jean-Baptiste Joseph Fourier, decompõe uma função temporal (um sinal) em frequências, tal como um acorde de um instrumento musical pode ser expresso como a amplitude (ou volume) das suas notas constituintes. A transformada de Fourier de uma função temporal é uma função de valor complexo da frequência, cujo valor absoluto representa a soma das frequências presente na função original e cujo argumento complexo é a fase de deslocamento da base sinusoidal naquela frequência.

A transformada de Fourier é chamada de representação do domínio da frequência do sinal original. O termo transformada de Fourier refere-se à ambas representações do domínio frequência e a operação matemática que associa a representação domínio frequência a uma função temporal. A transformada de Fourier não é limitada a funções temporais, contudo para fins de convenção, o domínio original é comumente referido como

domínio do tempo. Para muitas funções de interesse prático, pode-se definir uma operação de reversão: a transformada inversa de Fourier, também chamada de síntese de Fourier, de um domínio de frequência combina as contribuições de todas as frequências diferentes para a reconstituição de uma função temporal original.

Operações lineares aplicadas em um dos domínios (tempo ou frequência) resultam em operações correspondentes no outro domínio, o que, em certas ocasiões, podem ser mais fáceis de efetuar. A operação de diferenciação no domínio do tempo corresponde à multiplicação na frequência, o que torna mais fácil a análise de equações diferenciais no domínio da frequência. Além disso, a convolução no domínio temporal corresponde à multiplicação ordinária no domínio da frequência. Isso significa que qualquer sistema linear que não varia com o tempo, como um filtro aplicado a um sinal, pode ser expressado de maneira relativamente simples como uma operação nas frequências. Após realizar a operação desejada, a transformação do resultado alterna para o domínio do tempo. A Análise harmônica é o estudo sistemático da relação entre os domínios de tempo e frequência, incluindo os tipos de funções ou operações que são mais "simples" em um ou em outro, e possui ligações profundas a muitas áreas da matemática moderna (TAKAHASHI, 2002).

Diversas notações são convencionadas para denotar a transformada de Fourier de uma função. A Transformada de Fourier de uma função  $h = h(t)$  absolutamente integrável, é definida para  $\omega \in R$ , por:

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i\omega t} dt \quad (37)$$

Essa é a transformada de Fourier no domínio do tempo, por definição.

A Transformada Inversa de Fourier de  $g = g(\omega)$  é definida como:

$$H^{-1}(g(\omega)) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (38)$$

### 2.8.1 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

A Transformada rápida de Fourier (em inglês *fast Fourier transform*, ou FFT) é um algoritmo eficiente para se calcular a Transformada discreta de Fourier (DFT) e a sua inversa. A análise de Fourier converte um sinal do seu domínio original para uma representação no domínio da frequência e vice-versa. Uma Transformada rápida de Fourier calcula rapidamente essas transformações fatorizando a matriz da transformada discreta de Fourier em um produto de fatores esparsos (principalmente zero). Como resultado, ele consegue reduzir a complexidade de calcular a transformada discreta de Fourier de  $O(n^2)$ , ou seja, na ordem de  $n$  elevado ao quadrado, que surge se alguém simplesmente aplica a definição de transformada discreta de Fourier, a  $O(n \log n)$ , onde  $n$  é o tamanho dos dados.

As transformadas rápidas de Fourier são de grande importância em uma vasta gama de aplicações, de processamento digital de sinais para a resolução de equações diferenciais parciais a algoritmos para multiplicação de grandes inteiros. Transformadas rápidas de Fourier são amplamente utilizadas para aplicações diversas em engenharia, ciência e matemática. As ideias básicas foram popularizadas em 1965, mas alguns algoritmos foram obtidos em 1805. Em 1994, Gilbert Strang descreveu a transformada rápida de Fourier como "O algoritmo numérico mais importante da nossa vida." e foi incluída no Top 10 *Algorithms of 20th Century* pela revista *IEEE Computing in Science & Engineering*.

### 2.9 Valor Eficaz (RMS)

Valor Eficaz ou RMS (Root Mean Square) de uma onda periódica de corrente ou tensão está relacionado com o calor dissipado em uma resistência.

A clássica fórmula de potência permite obter o valor médio da potência dissipada na resistência (NAKASHIMA, 1999).

$$P_{Ave} = \frac{V_{RMS}^2}{R} = R \cdot I_{RMS}^2 \quad (39)$$

O valor eficaz representa o valor de uma tensão (ou corrente) contínua que produz a mesma dissipação de potência que a tensão (ou corrente) periódica. A potência instantânea dissipada em uma resistência é:

$$p(t) = \frac{v^2(t)}{R} = R \cdot i^2(t) \quad (40)$$

E a potência média dissipada é

$$P_{Ave} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T R \cdot i^2(t) \cdot dt \quad (41)$$

$$P_{Ave} = R \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) \cdot dt \quad (42)$$

Igualando as duas equações de potência média, obtemos a equação abaixo, origem do termo RMS

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) \cdot dt} \quad (43)$$

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) \cdot dt} \quad (44)$$

A figura abaixo mostra a relação entre o valor eficaz e a potência média dissipada em uma resistência de  $1\Omega$  para uma onda senoidal.

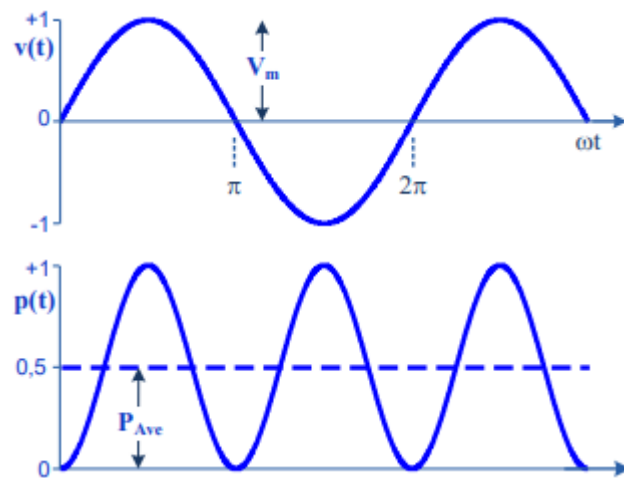


Figura 10 - Valor eficaz ou RMS de potência - Fonte: Nakashima, 2005

$$v(t) = v_m \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (45)$$

$$p(t) = \frac{V^2(t)}{R} = \frac{(V_m \cdot \sin(\omega t))^2}{R} \quad (46)$$

$$p(t) = \frac{V_m^2(1 - \cos(2\omega t))}{2R} \quad (47)$$

$$P_{Ave} = \frac{V_m^2}{2R} = \frac{V_{RMS}^2}{R} \quad (48)$$

$$V_{RMS} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (49)$$

### 3 METODOLOGIA

Na metodologia exemplificada abaixo, serão encontrados o desenvolvimento e resultados algébricos e experimentais sobre as diferentes configurações dos ressonadores, relacionando a *Transmission Loss*, e a perda sonora de acordo a configuração sobre os arranjos dos ressonadores.

#### 3.1 Modelagem com ressonadores de um só pescoço

Para o desenvolvimento da metodologia, utilizou-se o software MatLab no estudo algébrico.

No TCC 1, foram feitas análises de variados tipos de estrutura, como a de seção transversal hexagonal, cilíndrica e quadrada. Os esquemas dos três tipos de ressonadores analisados no TCC 1, podem ser vistas na figura 11, a qual generaliza todas as estruturas,

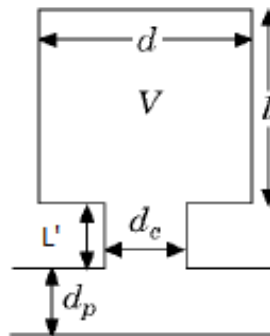


Figura 11 - Esquema com as dimensões geométricas [m] - Fonte: Mottsinger, 1983

onde  $L'$  é o comprimento efetivo do pescoço,  $d_c$  é o diâmetro do furo do pescoço,  $d$  é o diâmetro da cavidade,  $l$  é a profundidade da cavidade,  $d_p$  é o diâmetro do duto e  $V$  é o volume da cavidade. Os volumes das cavidades foram calculados através das equações (24), (25) e (26).

As dimensões iniciais consideradas no trabalho 1 são de um ressonador de *Helmholtz* com apenas um pescoço.

Tabela 1 - Dimensões iniciais das geometrias propostas do TCC 1

Teste da amostra	Ressonador A	Ressonador B	Ressonador C
Tipo	SDOF	SDOF	SDOF
Geometria	Hexagonal	Cilíndrico	Retangular
Diâmetro do furo $d_c$ [m]	0,006	0,006	0,006
Comprimento do pescoço $L'$ [m]	0,001	0,001	0,001
Diâmetro da cavidade $d$ [m]	0,050	0,050	0,050

Profundidade da cavidade $l$ [m]	0,065	0,055	0,043
Volume da Cavidade	0,0001055	0,000108	0,000107

Para o cálculo das frequências naturais e *Transmission Loss*, validou-se o código em MatLab para as equações do referencial através do trabalho de Selamat *and* Dickey, 1995, em que explora as características do ressonador para diferentes valores de geometria.

De acordo a equação (8), tem-se os seguintes valores das frequências naturais para cada tipo de geometria.

**Tabela 2 - Valores das Frequências naturais das geometrias propostas do TCC 1**

Teste da amostra	Ressonador 1	Ressonador B	Ressonador C
Tipo	SDOF	SDOF	SDOF
Geometria	Hexagonal	Cilíndrico	Retangular
Frequência natural - Equação (8)	895,51	885,08	889,21

As análises que posteriormente foram feitas, se deram por uma rotina feita no MatLab através do método de Newton-Raphson para se encontrar as frequências naturais através das equações (10) e (11). Observa-se que através deste método, a equação possui infinitas raízes para a função. Chuta-se então, um valor inicial para que o código convirja à uma raiz com a frequência esperada.

Com os valores das novas frequências naturais, calculou-se os valores da TL através da equação (6). Estes resultados podem ser acessados através do Apêndice C.

Já para este Trabalho, refez-se os cálculos dos ressonadores devido a necessidade de adaptação dos ressonadores ao tubo de impedância e aos requisitos mínimos de impressão. Para tal, escolheu-se a estrutura com seção transversal hexagonal para o estudo prático. Para o experimento, variou-se a profundidade da cavidade,  $l$ . Os novos dados dos ressonadores podem ser vistos abaixo:

**Tabela 3 - Novas dimensões para o ressonador Hexagonal**

Teste da amostra	Ressonador 1	Ressonador 2	Ressonador 3
Tipo	SDOF	SDOF	SDOF
Geometria	Hexagonal	Hexagonal	Hexagonal

Diâmetro do furo $d_c$ [m]	0,015	0,015	0,015
Comprimento do pescoço $L'$ [m]	0,005	0,005	0,005
Diâmetro da cavidade $d$ [m]	0,042	0,042	0,042
Profundidade da cavidade $l$ [m]	0,057	0,038	0,0285
Volume da Cavidade	$2,725 \times 10^{-6}$	$1,817 \times 10^{-6}$	$1,362 \times 10^{-6}$

Os novos valores das frequências naturais são os seguintes:

**Tabela 4 - Novos valores das frequências naturais**

Teste da amostra	Ressonador 1	Ressonador 2	Ressonador 3
Tipo	SDOF	SDOF	SDOF
Geometria	Hexagonal	Hexagonal	Hexagonal
Frequência natural - Equação (8)	583,12	623,56	755,24

### 3.2 Análise em Paralelo e Série

#### 3.2.1 Análise em Paralelo

A análise em paralelo se deu através da equação (26). Para tal análise, deixando os valores fixos conforme a tabela 1 e utilizando uma rotina em MatLab e tendo em mãos o valor da frequência natural da estrutura, fez-se os cálculos algébricos e observou-se o comportamento da impedância da estrutura de acordo a variação do número de ressonadores em paralelo. A análise foi feita pelos novos dados da Tabela 3, utilizando-se os tipos 1, 2 e 3 de ressonadores.

#### 3.2.2 Análise em Série

Para a combinação em série, segue-se os passos tidos da equação (26) até a equação (32). Nota-se através das equações, que é possível apenas fazer a análise de duas estruturas em série por vez. Sendo assim, colocou-se apenas quatro estruturas em série para a análise da impedância. Para os cálculos, adotou-se a distância  $L$  entre os ressonadores de 0,001 metros. A análise foi feita pelos novos dados da Tabela 3, utilizando os tipos 1, 2 e 3 de ressonadores.

A imagem abaixo exemplifica um arranjo de ressonadores em série e em paralelo:



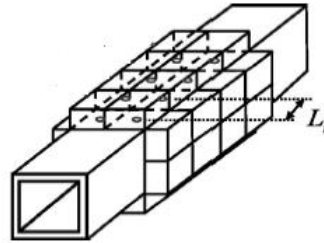


Figura 12 - Painel de um arranjo de ressonadores de Helmholtz

A posteriori, calculou-se a impedância do arranjo de ressonadores para a estrutura de seção transversal hexagonal. Os cálculos foram feitos em separado para o arranjo em paralelo e em série. Para tal, utilizou-se as equações (32) e (10).

### 3.3 Calibração dos Microfones

Para a calibração dos microfones de eletreto, utilizaram-se cinco frequências, que são: 300Hz, 450Hz, 600Hz, 750Hz e 900 Hz. A escolha dessas frequências foi devido a espuma acústica utilizada, que tem melhor desempenho nessa faixa de frequência e também devido a frequência de ressonância da maioria dos *Liners*. O valor RMS extraído do código em Python será utilizado como base de calibração para os microfones de eletreto. As medições foram feitas na caixa anecoica montada para os testes.

O processo de calibração se deu da seguinte forma: Utilizando o software Audacity, gerou-se as diferentes frequências, que eram lidas pelo microfone. Ainda pelo *software* Audacity, foi feita para todas as medições uma equalização do sinal, o que diminuía o ruído. Esse processo de equalização foi repetido por todo o experimento. Os microfones foram posicionados de igual forma para que recebessem a mesma intensidade da onda sonora emitida pelo alto-falante, como pode ser visto na imagem abaixo:



**Figura 13 - Posicionamento dos microfones na Câmara de teste**

Devido à baixa sensibilidade do microfone, eles foram aproximados um pouco mais próximo da fonte sonora para uma melhor aquisição.

Configurou-se no amplificador um ganho o mais semelhante possível para os dois microfones, como pode ser observado na imagem abaixo:



**Figura 14 - Configurando um mesmo ganho para os microfones**

Pode-se observar na imagem acima que o amplificador não existe uma escala. Portanto, foi adaptado em madeira uma escala para que facilitasse o posicionamento dos botões.

### 3.4 Procedimento Experimental

Para o estudo do procedimento experimental, desenvolveu-se uma rotina em Python que resolvesse a FFT de acordo às frequências analisadas combinadas com as estruturas ressonadoras, de modo que facilite na obtenção dos dados. O código fora desenvolvido pelo professor Henrique Gomes de Moura e pode ser encontrado no Apêndice B.

Como foi visto no referencial teórico através da equação (49), pode-se manipular tais equações, para se encontrar um valor numérico que corresponda a perda sonora através do tubo. Dessa forma, tem-se:

$$V_{RMS1} = \frac{V_{m1}}{\sqrt{2}} \quad (50)$$

e

$$V_{RMS2} = \frac{V_{m2}}{\sqrt{2}} \quad (51)$$

logo,

$$\frac{V_{RMS1}}{V_{RMS2}} = \frac{V_{m1}}{V_{m2}} \quad (52)$$

Sendo assim,

$$V_{m2} = V_{m1} \cdot \frac{V_{RMS2}}{V_{RMS1}} - P \quad (53)$$

Ou também pode ser:

$$P = V_{m1} \cdot \frac{V_{RMS2}}{V_{RMS1}} - V_{m2} \quad (54)$$

Onde  $P$  é a perda sonora que ocorre no tubo, sem a presença de qualquer ressonador.

Quando se adiciona uma estrutura ressonadora entre os microfones, a perda sonora se dará da seguinte forma:

$$V_{m2} = V_{m1} \cdot \frac{V_{RMS2}}{V_{RMS1}} - P_1 - P_2 \quad (55)$$

Onde  $P_2$  é a perda causada pela presença do(s) ressonador(es) e  $P_1$  é descoberto pelo experimento com as frequências sem a presença de ressonadores.

Para tanto, encontra-se os valores dessas perdas para cada frequência e combinação dos ressonadores que foram estudados. Para cada frequência analisada, fez-se 5 medições, o obteve-se a média do valor RMS. Foi elaborado uma rotina no MatLab para o cálculo das perdas sonoras.

## 4 CONSTRUÇÃO E TESTES

### 4.1 Dimensionamento da caixa acústica

Conforme apresentado por Negri (2008), o dimensionamento para uma caixa acústica será apresentado nesta seção.

O volume da caixa é dado pela equação:

$$V_b = \frac{V_a}{\alpha} \quad (56)$$

Onde,  $V_b$  é o volume da caixa;  $\alpha$  é a razão entre as compliâncias.

Para o cálculo de ' $\alpha$ ' usaremos a equação (52):

$$\alpha = \left( \frac{Q_{tc}}{Q_{ts}} \right)^2 - 1 \quad (57)$$

Onde  $Q_{tc}$  é o fator de qualidade do sistema, usaremos  $Q_{tc} = 0,8$ . Das especificações técnicas do fabricante do alto-falante, temos  $Q_{ts} = 0,96$ , portanto teremos um  $\alpha = 0,306$ . Substituindo esse valor na equação (56) para cálculo do volume da caixa considerando  $V_{as} = 9$  litros, teremos  $V_b = 29,4$  litros ou  $V_b = 0,0294\text{m}^3$ . Considerando a caixa como um cubo com suas arestas sendo de  $0,025\text{m}$  de comprimento, como pode ser visto abaixo:



**Figura 15 - Caixa acústica montada**

- 4 placas de iguais dimensões foram unidas formando a caixa e uma quinta placa fechou um dos lados;
- O interior da caixa é forrado com lã de vidro que é um material isolante que minimizam perdas e interferências nas medições;
- A tampa interna da caixa acústica é feita do mesmo material da caixa e em seu centro é feito um furo no qual será posicionado o alto-falante que será a fonte sonora do equipamento;

Fixado no centro da caixa de som, há um alto falante de 15 polegadas. O alto falante é do modelo Woofer Magnum 15" 350W RMS 4 Ohms, e suas informações técnicas podem ser encontradas no Anexo X.

#### 4.2 Tubo de Impedância

Para a construção da bancada de testes para os ressonadores de Helmholtz, primeiro construiu-se o tubo de impedância. O tubo tem seção transversal quadrada e suas paredes são em madeira do tipo compensado, sendo a espessura da parede de 10 mm. Ela tem 80 cm de extensão, suficientes para caber os microfones e os ressonadores para o teste. A parte interna do tubo tem uma profundidade de 15 cm.

A parte superior do tubo foi utilizada a mesma espuma Sonex Illtec da calibração dos microfones, o que facilitou na fixação destes.

#### 4.3 Circuito de Amplificação

Construiu-se um circuito de amplificação para a aquisição do sinal do microfone. O circuito é baseado na resposta de um amplificador com Polo Simples (SEDRA, 2005).

A primeira ideia do projeto era a aquisição de um CI que pudesse fazer a amplificação deste sinal, o INA 827, sendo este um Amplificador de instrumentação. Devido à dificuldade de achar o componente no país e a grande demora para uma possível importação, optou-se pela construção do circuito. Cada microfone de eletreto utilizaria de um circuito, sendo então um total de dois circuitos. O diagrama deste pode ser visto abaixo:

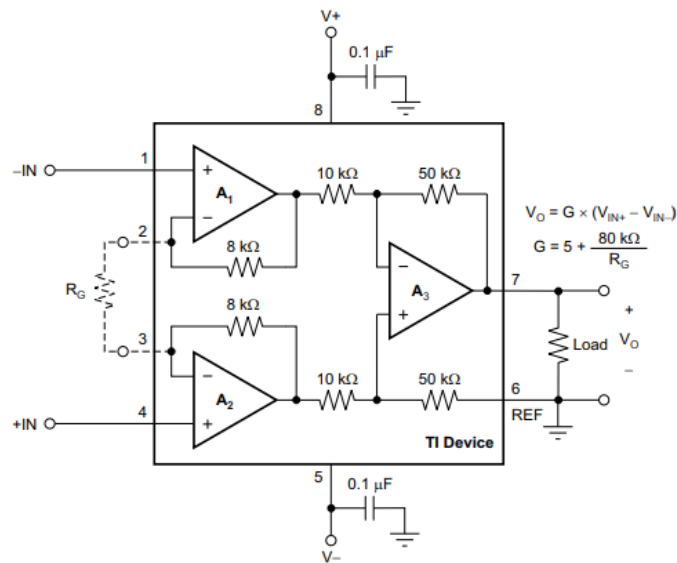
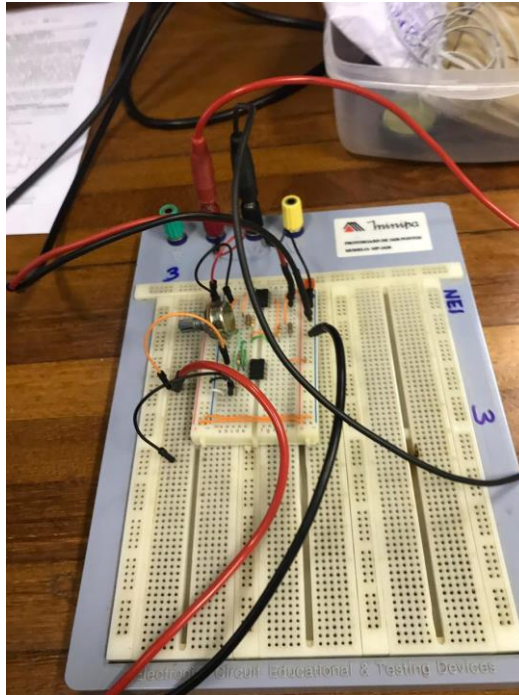


Figura 16-Esquemático simplificado – Fonte: Texas Instruments

Observa-se que o circuito se utiliza de três amplificadores operacionais, um potenciômetro que regula o ganho do circuito e 6 resistores.

Para a construção do circuito em si, houveram quatro tentativas. A primeira, todo o circuito foi montado em uma *protoboard* de 400 furos. Para o Ampop, utilizou-se o CI LM 358. Este CI possui em seu encapsulamento dois ampops, o que otimizaria o espaço da placa. Com o circuito pronto, utilizou-se do laboratório de circuitos da faculdade para determinar alguns parâmetros, com o auxílio de um gerador de funções, uma fonte de tensão e um osciloscópio. Nos primeiros testes, nenhuma resposta pode ser vista no osciloscópio, não havendo a formação de uma onda senoidal nem da amplificação. Mexendo em alguns fios do circuito, observou-se a possibilidade de haver mal contato destes cabos. Indo então para a segunda tentativa.

O circuito pode ser visto na imagem abaixo:

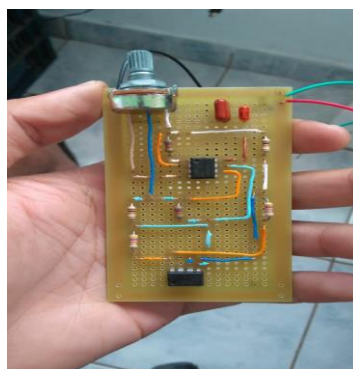


**Figura 17 - Primeira tentativa de montagem do circuito de amplificação**

Na segunda tentativa, substituiu-se os cabos que poderiam estar com mal contato por *jumpers*, muito utilizados nas matérias de circuitos eletrônicos. Mesmo com estes cabos, não houve nenhuma resposta que se esperava pelo osciloscópio. O amplificador operacional ainda era o LM 358.

Na terceira tentativa, decidiu-se soldar o circuito em uma placa perfurada, garantindo uma melhor conexão entre os componentes. Utilizou-se do mesmo ampop que nas vezes anteriores. Porém, observou-se novamente que não houve nenhuma resposta esperada com o osciloscópio, fazendo-se necessário a nova tentativa de construção.

O circuito montado pode ser visto na imagem abaixo:



**Figura 18 - Terceira tentativa da montagem do circuito de amplificação**

Para a quarta e última montagem, utilizou-se de uma placa perfurada, dupla-face em fibra de vidro e cobre. Para o amplificador operacional, utilizou-se desta vez o CI LM 348. Este CI, por sua vez, possui em seu encapsulamento, quatro ampops, sendo necessário então apenas um deste. Na primeira tentativa de teste observou-se que o circuito amplificava o sinal, porém não havia nenhum ganho com a alteração da resistência do potenciômetro. Por fim, descobriu-se que a tensão de entrada configurada no gerador de funções estava muito baixa, aproximadamente 20 milivolts, o que era atenuado pelos cabos que iam para a leitura do osciloscópio. Configurando essa tensão de entrada para uma tensão acima de 40 milivolts, conseguiu-se a resposta que era esperada, que era a amplificação do sinal.

Os dois circuitos montados, um para cada microfone, podem ser vistos na imagem abaixo:

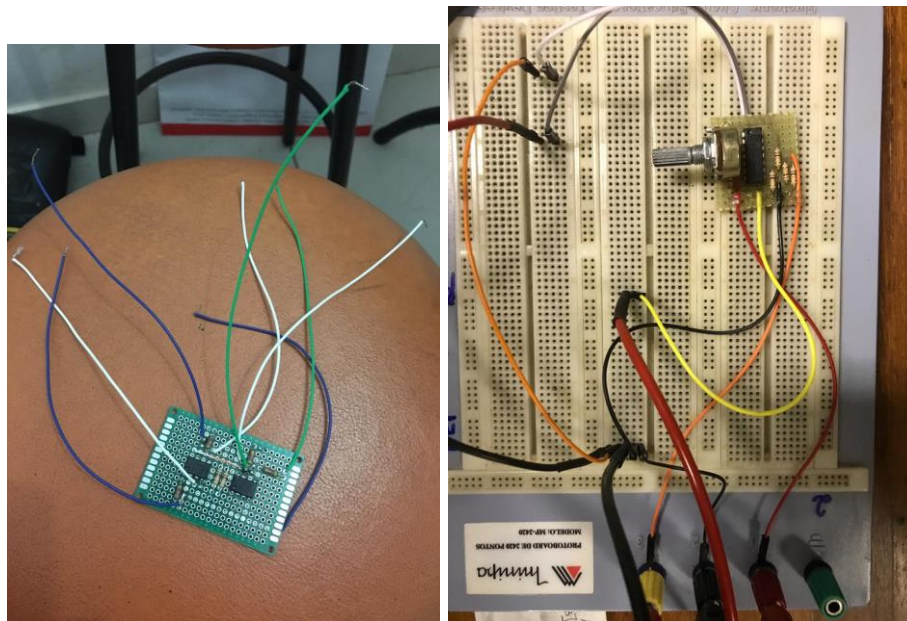


Figura 19 - Quarta tentativa da montagem do circuito de amplificação

#### 4.4 Calibração dos Microfones de Eletreto

##### 4.4.1 Caixa anecoica

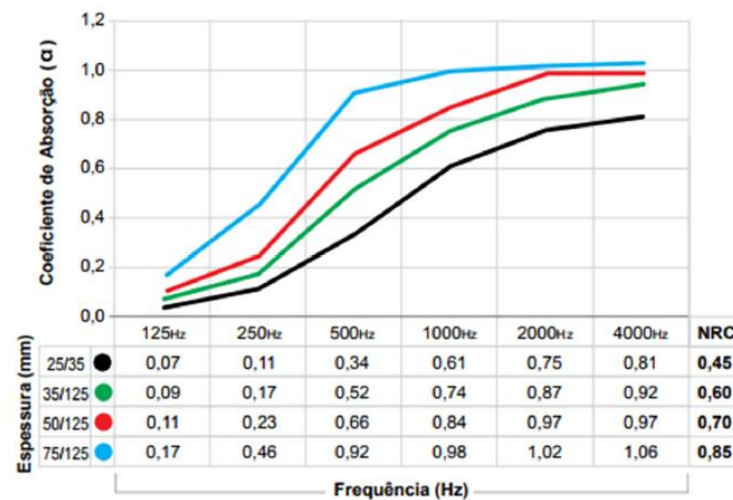
Para a calibração dos microfones, foi montado e forrado um caixa com a espuma acústica Sonex por todas as suas faces, para que se assemelhasse ao máximo a uma câmara anecoica, como pode ser visto pela imagem abaixo:





**Figura 20 - Colocação das espumas na câmara anecoica**

Buscou-se materiais com propriedades conhecidas e que sejam largamente usados com isolamento acústico, tornando os resultados obtidos mais relevantes. Foram selecionadas amostras de placas acústicas Sonex illtec de fabricação da empresa OWA Sonex, a imagem a seguir mostra valores para o coeficiente de absorção sonora de diferentes placas em diversas faixas de frequência.

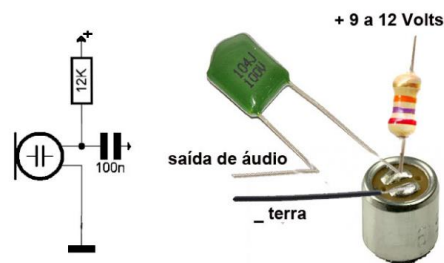


**Figura 21 - Coeficiente de absorção sonora Sonex em câmara reverberante - Fonte: Owa Sonex, 2017**

O gráfico apresenta dados para quatro configurações de perfil diferentes, mas para este trabalho, será considerado apenas o item na cor verde (35/125), devido ao coeficiente de absorção adequado as frequências que foram trabalhadas.

#### 4.4.2 Funcionamento dos microfones

Para o funcionamento dos microfones de eletreto, estes necessitam serem polarizados. Com polarização externa têm apenas dois terminais, um é a saída e alimentação +VCC e o outro terminal é o -VCC. A polarização do microfone de eletreto é feita através do circuito descrito abaixo:



**Figura 22 - Polarização do Microfone de Eletreto. - Fonte: Blog novaeletrônica**

O capacitor usado neste circuito pode variar entre 100nF a 10uF, isso depende do circuito eletrônico do amplificador de áudio e de outros fatores como sobre frequência de áudio.

Utilizou-se dois microfones para a calibração. Para a calibração em si, utilizou-se equipamentos comerciais, devido à dificuldade de validar os circuitos construídos, citados anteriormente. Para o sistema de amplificação, utilizou-se a placa de som *Focusrite Scarlett* e, para o sistema de amplificação de potência, utilizou-se o Amplificador Potência Profissional Pw 500 Stéreo.

As conexões dos cabos aos equipamentos amplificadores foram feitas através de plugs P10. Os cabos que vão do amplificador de potência ao microfone têm 3,3m de comprimento. O cabo que sai do microfone é um cabo *flat* de 0,07m, e o outro cabo é o cabo de áudio auxiliar P10 estéreo.

Houve também a construção de um amplificador de potência típico AB. O diagrama do circuito pode ser visto em Anexo B.

Devido à complexidade do circuito, este não obteve resposta favorável ao que se esperava pelo projeto. Sendo assim, optou-se pela utilização do Amplificador de Potência comercial citado acima.

A parte teórica que embasa o amplificador de potência típico classe AB pode ser vista no Anexo B do trabalho.

#### 4.5 Modelagem e Impressão dos ressonadores

Os ressonadores foram modelados através do software CATIA V5R19. Após a modelagem dos ressonadores, salvou-se os arquivos em formato .stl para que um software de fatiamento que é lido pela impressora 3D possa ser usado. O software utilizado para fatiamento foi o Simplify3D. Para a impressão dos ressonadores, utilizou-se a impressora 3D da Faculdade UnB – Gama. As impressões foram feitas com PLA. Algumas das configurações foram utilizadas como as *default* do *software* de fatiamento e algumas características de impressão podem ser destacadas pois estas são específicas para a utilização com o PLA, como pode ser visto abaixo:

**Tabela 5 - Configurações para a impressão do PLA**

<i>Primary Layer Height</i>	0,3 mm
<i>Top Solid Layer</i>	3
<i>Botton Solid Layers</i>	3
<i>Outline/Perimeter Shells</i>	3
<i>First Layer Height</i>	90%
<i>First Layer Width</i>	100%
<i>First Layer Speed</i>	50%
<i>Temperature Table</i>	60°C
<i>Temperature Extruder</i>	195°C
<i>X/Y Axis Movement Speed</i>	80 mm/s
<i>Z Axis Movement Speed</i>	16,7 mm/s
<i>Infill Extruder</i>	<i>Primary Extruder</i>
<i>Interior Fill Percentage</i>	100%
<i>Combine Infill Every</i>	1 Layer

Ao todo, foram impressas 19 cavidades, sendo estas combinadas entre si para o experimento, variando entre a análise individual, série, paralelo e matricial (série/paralelo).

Os detalhes de cada combinação estarão melhor explicados com as tabelas da análise de dados.

Imprimiu-se também 3 bases diferentes, que estruturalmente, servem para garantir o cumprimento do pescoço do ressonador.

#### 4.6 Construção da bancada de testes

A construção da bancada de testes se deu da seguinte forma. Fixou-se a caixa acústica a entrada do tubo. Colocou-se a espuma na parte superior do tubo e fixou-se os microfones. Conhecendo o comprimento e diâmetro do tubo pode-se estimar algumas medidas importantes, tais como: frequência máxima e mínima, a distância entre os dois microfones, a distância entre o microfone próximo a amostra e a distância entre o microfone próximo da fonte e a fonte. Segundo Nobile e Yeager (1983), tais estimativas podem ser feitas a partir das seguintes relações:

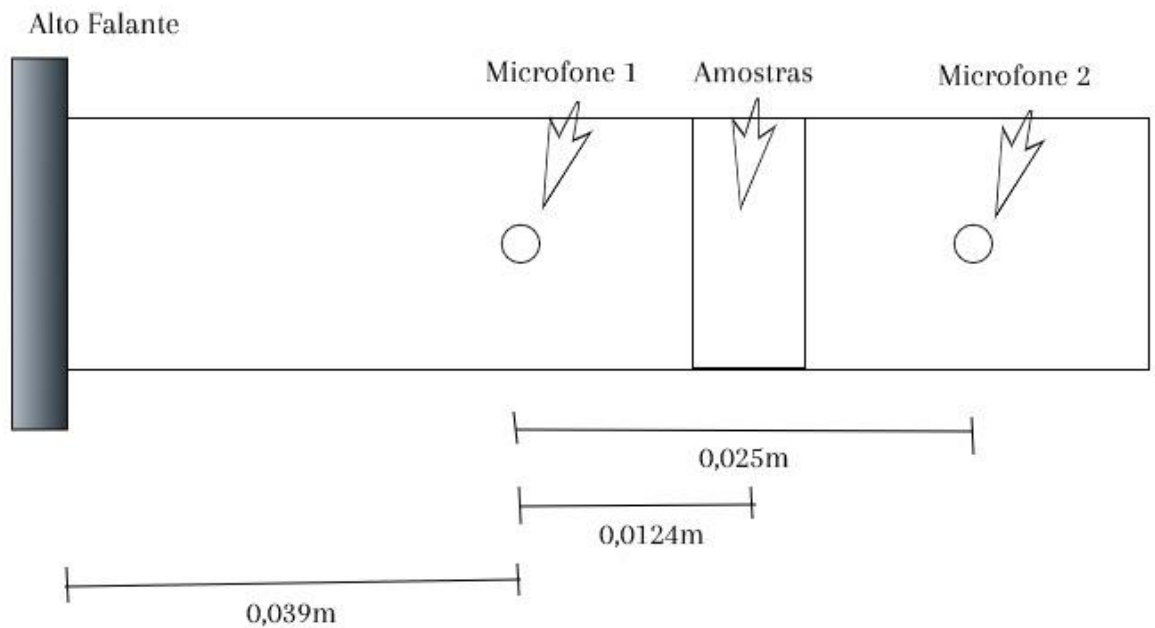
- Frequência Superior -  $f_s = 0,586 \frac{c}{d}$  e a frequência inferior  $f_i = \frac{c}{2L}$
- Espaçamento entre microfones: Limite superior  $s < \frac{0,45c}{f_s}$  e limite inferior  $s > \frac{0,05c}{f_i}$
- Relação de espaçamento e diâmetro do microfone -  $s > \frac{d_m}{0,2}$ .

onde  $s$  é a distância entre os dois microfones e foi selecionada como sendo 0,025m. A distância dos microfones ao centro das amostras é de 0,0124m,  $f_s$  é a frequência superior que é de 1314,17 Hz e  $f_i$  é a frequência inferior que é de 289Hz. As outras variáveis são  $c$  velocidade do som local, adotada como 343,7 m/s,  $L$  comprimento do tubo,  $d$  diâmetro interno do tubo e  $d_m$  diâmetro do microfone.

A distância entre o microfone e a amostra foi de um diâmetro interno do tubo já que segundo a ISO 10534-2, essa é a distância para amostras com estruturas semi-lateral e como se irá testar várias estruturas escolheu-se esse tipo de configuração, pois ela é uma estrutura intermediária.

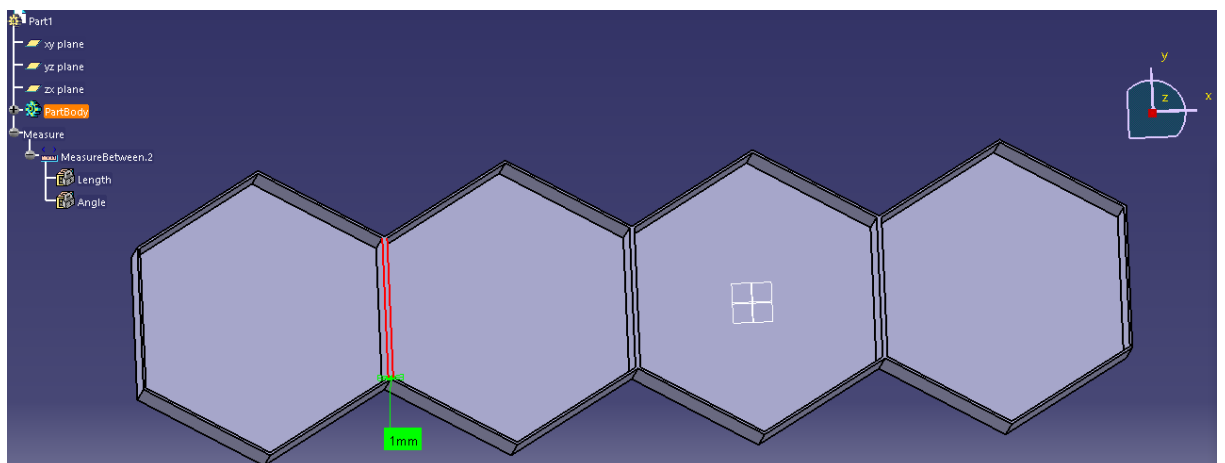
A distância entre o alto-falante e o microfone mais próximo é sugerido pela ISO para ser maior que três diâmetros internos do tubo. Essa distância é sugerida, pois somente com três diâmetros de distância do tubo pode-se afirmar que a onda que se propaga dentro dele é plana. Sendo assim, essa distância foi

colocada de 0,039m. Ainda de acordo com a ISO 10534-2, se faz necessário um pequeno espaço entre a tampa, onde ficará a amostra, porém nada se diz de quanto deve ser esse espaço. Então ele foi definido como de 0.001m. Esse espaço é para que exista uma camada de ar entre a amostra e a tampa. O esquemático descrito acima pode ser visto na imagem abaixo:



**Figura 23 - Esquemático das distâncias do tubo**

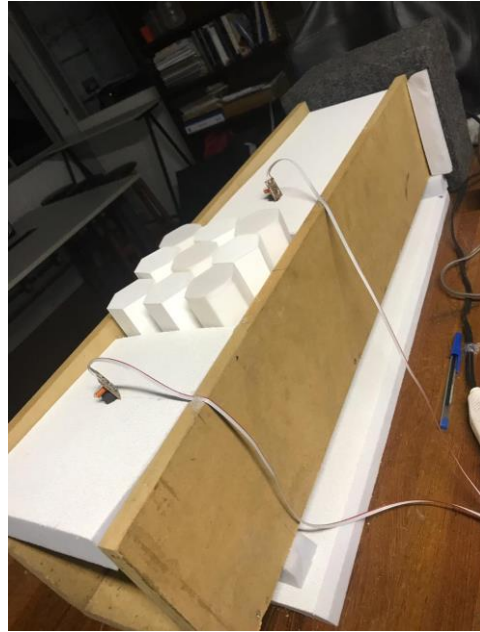
Os ressonadores quando arranjados em série estiveram a uma distância de 5 mm da aresta interna, como pode ser visto na imagem abaixo:



**Figura 24 - Distância entre os ressonadores**

Após a fixação dos microfones, colocou-se a estrutura dos ressonadores entre os microfones. Ligou-se todos os cabos dos microfones à potência, ao

amplificador e ao computador. A montagem final do tubo pode ser vista na imagem abaixo:



**Figura 25 - Montagem do tubo de impedância já com os ressonadores**

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No TCC 1, através das dimensões iniciais propostas para cada ressonador, e através das frequências naturais configuradas para cada geometria, utilizou-se a equação (9), mais simplificada, para descobrir a *Transmission Loss* de cada tipo de estrutura. Comparações foram feitas quando houvesse a variação de profundidade do ressonador, comprimento efetivo do pescoço e diâmetro da cavidade, observando então o comportamento da frequência, num espaço amostral que vai de 100Hz a 1000Hz, bem como a TL para cada estrutura.

Comparou-se também o comportamento da TL quando os ressonadores fossem arranjados em série e paralelo, bem como uma análise da impedância dessas estruturas. Por fim, analisou-se a impedância e perdas acústicas de um arranjo, combinando os ressonadores em série e paralelo simultaneamente, formando uma espécie de matriz de ressonadores, o mais próximo de um *Liner*. Os resultados encontrados estão todos no Apêndice B do trabalho, tanto os resultados algébricos bem como os gráficos de todas as estruturas.

### 5.1 CALIBRAÇÃO DOS MICROFONES

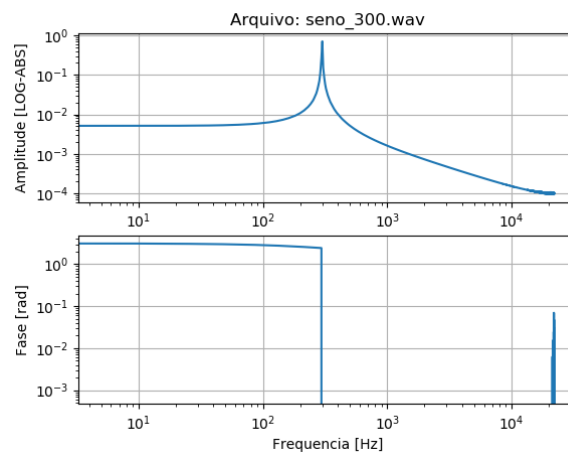
Foram feitas 3 medições por frequência para cada teste. Para o cálculo do  $V_m$ , utilizou-se da equação (49), visto que o valor de  $V_m$  extraído pelo código em Python é um valor posterior a FFT. Nota-se também que o valor RMS coletado do experimento, se relaciona a uma voltagem lida pelos microfones. Os dados coletados nessa calibração podem ser vistos abaixo:

**Tabela 6 - Dados obtidos através da calibração dos microfones**

Frequência 300Hz	Média RMS	Vp
Medição Calibração		
Microfone 1	0,00706	0,00999
Microfone 2	0,00686	0,00970
Frequência 450Hz	Média RMS	Vp
Medição Calibração		
Microfone 1	0,00396	0,00560
Microfone 2	0,00407	0,00575
Frequência 600Hz	Média RMS	Vp

Medição Calibração		
Microfone 1	0,00501	0,00709
Microfone 2	0,00489	0,00691
Frequência 750Hz	Média RMS	Vp
Medição Calibração		
Microfone 1	0,00766	0,01083
Microfone 2	0,00738	0,01043
Frequência 900Hz	Média RMS	Vp
Medição Calibração		
Microfone 1	0,00559	0,00791
Microfone 2	0,00534	0,00755

Serão mostrados abaixo gráficos que foram obtidos através dos testes. Limitou-se a mostrar apenas os gráficos dos dados obtidos pela frequência de 300Hz, visto que os demais gráficos seguem uma mesma lógica. O gráfico abaixo mostra a amplitude do sinal senoidal de entrada. Este sinal foi gerado pelo software *Audacity* e lido pelo código em Python criado, o qual gerou o gráfico abaixo. Os demais, podem ser encontrados no Apêndice B.

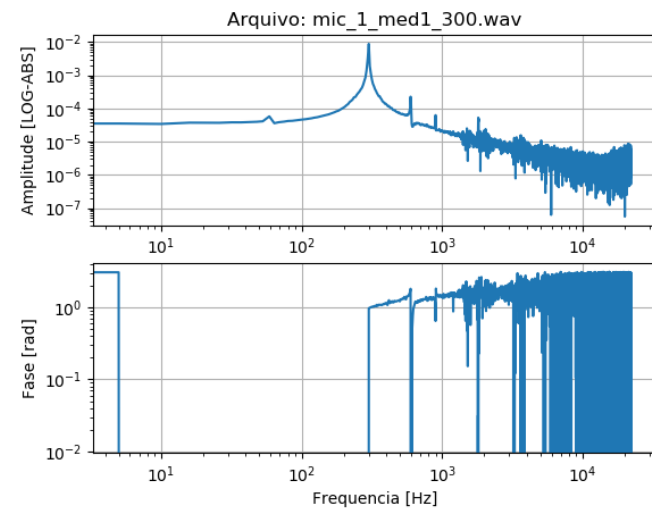


**Figura 26 - Gráfico da frequência de 300Hz pela fonte**

O gráfico seguinte é onde mostra a amplitude da onda, lida por um dos microfones, que pode ser observada pelo pico na frequência em análise. Neste caso o pico está na frequência de 300Hz. Assim segue para todas as demais frequências. Este gráfico já se mostra um pouco diferente do gráfico senoidal da fonte devido aos ruídos captados pelos

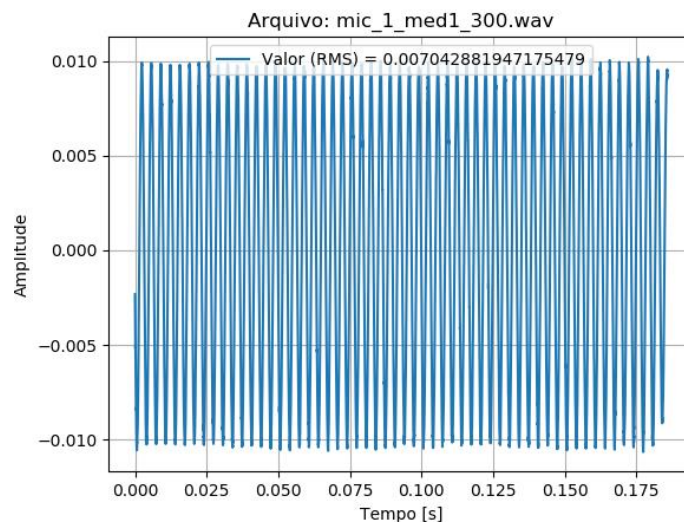


microfones. Observa-se também que neste gráfico há um pequeno pico por volta de 60 Hertz, que é a frequência da rede elétrica.



**Figura 27 - Gráfico da frequência de 300Hz pelo microfone 1 para o teste sem ressonadores**

O terceiro gráfico em análise por frequência é onde mostra a onda senoidal de acordo a frequência e o valor RMS, após a FFT.



**Figura 28 - Gráfico da onda de 300Hz e o valor RMS para o teste sem ressonadores**

## 5.2 Aquisição de dados e testes sem a presença de ressonadores

Assim que foi montado o tubo e posicionado os microfones, gerou-se as 5 frequências teste no Audacity para verificar a perda sonora que ocorreria sem a presença dos ressonadores. A amplitude do audacity,

$v_m$ , está diretamente relacionada a tensão dos microfones. Não foi calibrado de maneira a mostrar um valor em dB, porém se fez importante mostrar no trabalho. De posse dos resultados da média do RMS, calculou-se novamente os valores de  $V_m$ , encontrou-se um valor numérico que correspondesse a essa perda sonora através da equação (49). Nota-se que a razão  $\frac{V_{rms2}}{V_{rms1}}$  da equação (52) utilizada para o cálculo da perda sonora já com os microfones no tubo, é a razão extraída da calibração dos microfones. A média RMS e  $V_p$  serão dadas pela unidade [u] = unidade de referência para os microfones. Essa unidade foi gerado pelo audacity diretamente da placa de aquisição do estágio de pré-amplificação. Essa unidade foi simplesmente transferida para o cabo e não foi feita nenhuma calibração em amplitude. Este processo se repete para os testes com a presença do ressonador. A perda sonora será dada em percentual de [u]. Os dados e análises obtidos podem ser vistos abaixo:

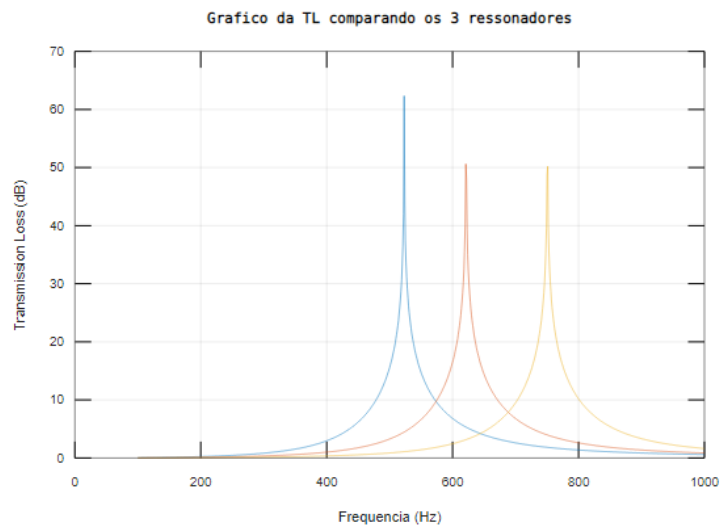
**Tabela 7 - Dados do teste sem ressonador no tubo**

Frequência 300Hz	Média RMS	Vp	Perda Sonora
Teste sem ressonador			
Microfone 1	0,01278	0,01807	0,00023
Microfone 2	0,01224	0,01730	
Frequência 450Hz	Média RMS	Vp	Perda Sonora
Teste sem ressonador			
Microfone 1	0,01446	0,02044	0,00127
Microfone 2	0,01395	0,01972	
Frequência 600Hz	Média RMS	Vp	Perda Sonora
Teste sem ressonador			
Microfone 1	0,01002	0,01417	0,00060
Microfone 2	0,00934	0,01320	
Frequência 750Hz	Média RMS	Vp	Perda Sonora
Teste sem ressonador			
Microfone 1	0,00697	0,00985	0,00011
Microfone 2	0,00663	0,00938	
Frequência 900Hz	Média RMS	Vp	Perda Sonora
Teste sem ressonador			
Microfone 1	0,00789	0,01115	9,32032E-07

Microfone 2	0,00753	0,01064
-------------	---------	---------

### 5.3 Testes com a presença de 1 ressonador no tubo

Para os novos valores citados na metodologia sobre as dimensões dos ressonadores deste trabalho, calculou-se novamente a *Transmission Loss* através da equação (15) para posterior comparação aos dados obtidos experimentalmente. O gráfico da *Transmission Loss* das novas estruturas pode ser visto abaixo:



**Figura 29 - Gráfico comparativo da TL dos 3 ressonadores**

Em azul, o ressonador de profundidade  $l = 0,055m$ . Em vermelho, o ressonador de profundidade  $l = 0,040m$  e em laranja, o ressonador com profundidade  $l = 0,028m$ .

Observa-se que, assim como foi analisado no Trabalho 1, com o aumento da profundidade, aumenta-se a frequência de ressonância do ressonador.

#### 5.3.1 Análise experimental dos ressonadores avaliados individualmente

Nesta análise, observou-se o comportamento dos 3 ressonadores quando testados individualmente no tubo, de acordo a variação das 5 frequências teste. Com a coleta de cinco medidas por frequência, fez-se a média do valor do RMS e colocou-se na tabela abaixo. O valor RMS é retirado do gráfico gerado pelo código que se encontra no Apêndice B, bem como o valor das amplitudes. Calculou-se agora a perda total,

através da equação (55), que é a soma da perda sonora sem a presença dos ressonadores com a perda sonora na presença dos ressonadores. Observou-se que próximo a frequência de ressonância, a perda sonora é maior quando comparado às outras frequências. Para o caso do primeiro ressonador, o de profundidade  $l = 0,05m$ , a maior perda sonora foi quando próxima a frequência de 450Hz. Os dados obtidos podem ser vistos abaixo:

**Tabela 8 - Dados da aquisição analisando 1 ressonador de profundidade  $l = 0,055m$**

Frequência 450Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
1 ressonador - l = 55 mm				
Microfone 1	0,01446	0,02044	0,00889	0,01016
Microfone 2	0,00856	0,01210		

Os demais dados do teste com este ressonador, bem como as perdas encontradas, podem ser analisados e comparados com as informações do Apêndice D.

Para o segundo ressonador, o de profundidade  $l = 0,40m$ , observou-se o mesmo caso, onde a maior perda sonora ocorre próximo a frequência de ressonância. Neste caso, a frequência de ressonância deste ressonador encontra-se próxima a 600Hz. A tabela abaixo mostra os dados obtidos com o experimento:

**Tabela 9 - Dados da aquisição analisando 1 ressonador de profundidade  $l = 0,040m$**

Frequência 600Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
1 ressonador - l = 40 mm				
Microfone 1	0,01002	0,01417	0,00546	0,00607
Microfone 2	0,00590	0,00834		

Os demais dados deste teste podem ser obtidos também através do Apêndice D.

E por fim, com o terceiro ressonador de profundidade  $l = 0,028m$ , observa-se que maior perda sonora foi mais próxima a 450Hz, e não de 700Hz como previsto. Isso pode ser do fato de que, em algum momento da coleta de dados, possa ter havido influências externas, como ruídos e interferências. Os dados deste teste podem ser vistos na tabela abaixo:

**Tabela 10 - Dados da aquisição analisando 1 ressonador de profundidade  $l = 0,028m$**

Frequência 750Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
------------------	-----------	----------------	--------------	--------------------

1 ressonador - $l = 28$ mm				
Microfone 1	0,00697	0,00985	0,00449	0,00460
Microfone 2	0,00354	0,00500		

Como anteriormente, os outros dados deste teste podem ser encontrados no Apêndice D.

### 5.3.2 Análise experimental dos ressonadores em paralelo e série (3 ressonadores)

Com os ressonadores configurados em paralelo, fez-se o mesmo procedimento experimental realizado para os ressonadores individualmente. Os dados apresentados abaixo, representam a perda sonora de um arranjo em paralelo e série do ressonador com profundidade de  $l = 0,055m$ . Para a análise dos demais dados, sugere-se a leitura destes no Apêndice D.

**Tabela 11 - Dados da aquisição analisando 3 ressonadores de profundidade  $l = 0,055m$  (Paralelo)**

3 ressonadores - $l = 55$ mm - Paralelo	Perda Sonora total
Frequência 300Hz	0,00976157
Frequência 450Hz	0,01237498
Frequência 600Hz	0,00728448
Frequência 750Hz	0,00351787
Frequência 900Hz	0,00409177

**Tabela 12 - Dados da aquisição analisando 3 ressonadores de profundidade  $l = 0,055m$  (Série)**

3 ressonadores - $l = 55$ mm - Série	Perda Sonora total
Frequência 300Hz	0,00963430
Frequência 450Hz	0,01033852
Frequência 600Hz	0,00796613
Frequência 750Hz	0,00459267
Frequência 900Hz	0,00469988

Os dados seguintes são do arranjo em paralelo e série dos ressonadores com profundidade  $l = 0,40m$ . Novamente, para análise completa, sugere-se a leitura dos dados no Apêndice D.

**Tabela 13 - Dados da aquisição analisando 3 ressonadores de profundidade  $l = 0,040m$  (Paralelo)**

3 ressonadores - $l = 40$ mm - Paralelo	Perda Sonora total
Frequência 300Hz	0,00861323
Frequência 450Hz	0,01035832

Frequência 600Hz	0,00730711
Frequência 750Hz	0,00319260
Frequência 900Hz	0,00403803

**Tabela 14 - Dados da aquisição analisando 3 ressonadores de profundidade  $l = 0,040\text{m}$  (Série)**

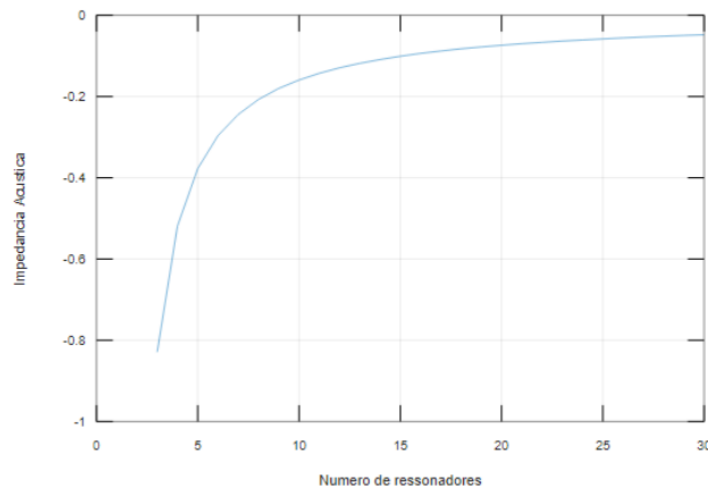
3 ressonadores - $l = 40\text{ mm}$ - Série	Perda Sonora total
Frequência 300Hz	0,01009250
Frequência 450Hz	0,01105977
Frequência 600Hz	0,00658021
Frequência 750Hz	0,00404113
Frequência 900Hz	0,00480170

De posse desses dados, observa-se que, com o aumento do número de ressonadores, tanto em paralelo quanto em série, há um aumento da perda sonora quando comparado com os ressonadores analisados individualmente, de acordo as suas respectivas profundidades. Outra análise que pode ser feita é que, com as análises feitas no TCC 1 que se encontram no Apêndice C, com o arranjo de ressonadores em série e em paralelo, há um aumento da impedância acústica. A impedância acústica por definição é uma soma de uma parte real com uma imaginária, como pode ser visto abaixo:

$$z = R + jX$$

onde  $R$  é a resistência acústica e  $X$  é a reatância acústica.

Uma dessas comparações pode ser vista pelo gráfico abaixo, que mostra a resistência acústica, que aumenta de acordo ao aumento do número de ressonadores.



**Figura 30 - Gráfico da resistência acústica de acordo ao número de ressonadores**

O gráfico abaixo mostra a reatância acústica, que é a oposição que o sistema oferece a passagem da onda sonora. Nota-se que quanto maior o número de ressonadores, maior é a reatância, ou seja, maior é a oposição a passagem do som da estrutura.

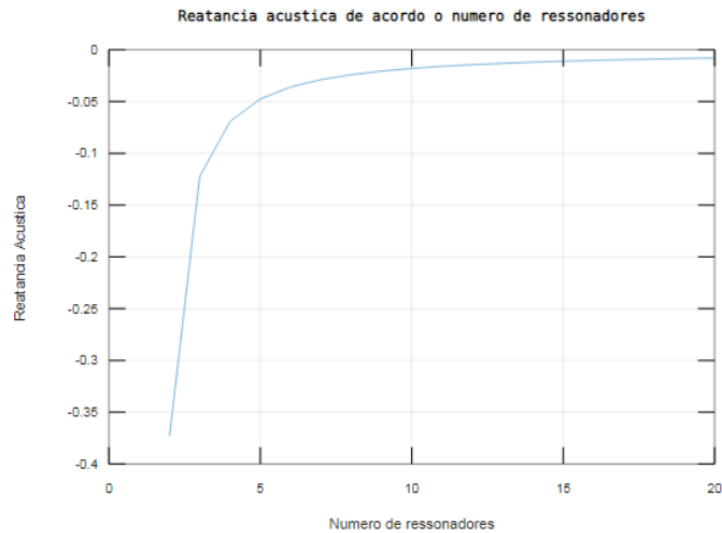


Figura 31 - Gráfico da reatância acústica de acordo ao número de ressonadores

### 5.3.3 Análise experimental dos ressonadores arranjados em paralelo e série simultaneamente (9 ressonadores)

Para a análise da matriz de ressonadores, foram feitas medições com as mesmas frequências utilizadas anteriormente. A tabela abaixo mostra a análise da perda sonora a partir dos dados colhidos experimentalmente..

Tabela 15 - Dados da aquisição analisando 9 ressonadores de profundidade  $l = 0,055m$

9 ressonadores - $l = 55 \text{ mm}$ - Paralelo/Série	Perda Sonora Total
Frequência 300Hz	0,010511112
Frequência 450Hz	0,012035578
Frequência 600Hz	0,009391666
Frequência 750Hz	0,005169672
Frequência 900Hz	0,004824332

Com os dados experimentais dos arranjos de ressonadores, nota-se que a perda sonora é maior quando comparado ao arranjo em série e paralelos, separadamente, como no caso analisado, para a profundidade  $l = 0,055m$ .

## 6 CONCLUSÃO

Por todo exposto, tira-se algumas conclusões do trabalho.

Para a parte analítica que fora desenvolvida no TCC 1, observou-se grande influência da geometria com relação às propriedades dos ressonadores. Comprimento efetivo de pescoço, diâmetro da cavidade e profundidade da cavidade são propriedades geométricas que influenciam diretamente na frequência de ressonância e na *Transmission Loss* da estrutura. Com isso, cumpriu-se o objetivo proposto que fora a análise de diferentes tipos de estrutura relacionados as suas características acústicas para a análise da mitigação de ruído.

Uma grande importância pode ser dada também as estruturas desenvolvidas por impressão 3D, ferramenta esta que facilita a prototipagem de peças com variados desenhos geométricos, como foi o caso do ressonador de seção transversal hexagonal, que seria bem difícil sua confecção por outro método de construção.

Cabe ressaltar a observação de que mesmo com um baixo custo alocado ao trabalho, conseguiu-se resultados que vão de acordo ao que fora proposto, mesmo que com algumas poucas diferenças, o que pode ser aprimorado com trabalhos subsequentes.

Tem-se como perspectivas futuras deste trabalho, a continuação do processo de estudos por meio da da *Transmission Loss* e impedância da estrutura, que não foi possível com este trabalho, mantendo a utilização pela tecnologia de fabrico aditivo, podendo ser desenvolvida uma bancada de testes que possa ser mais fiel ao estudo algébrico e que, este mesmo estudo algébrico se some a um estudo numérico, e que a prática possa se harmonizar ainda mais com a teoria proposta.



## REFERÊNCIAS

- SPILLERE, A. M. N. **“Towards optimal design of acoustic liners in turbofan aero-engines”**. [S.l.: s.n.], 2017. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica), UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina), Florianópolis, Brasil.
- MOTSINGER, R.; KRAFT, R. **“Design and performance of duct acoustic treatment”**. 1991.
- LENZI, A. **“Apostila de fundamentos em acústica”**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFSC., Elsevier, 2012.
- VANDERGRIFT, G. **“A simple derivation of the Green's function for a rectangular Helmholtz resonator at low frequency. Journal of Acoustic Society”**, vol.94, pp. 574-575, 1993.
- NAGAYA, K., HANO, Y., SUDA, A. **“Silencer consisting of two-stage Helmholtz resonator with auto-tuning control. Journal of Acoustic Society of America”**, vol. 110, no. 1, pp. 289-295, 2001.
- ESFANDIARI, Y. **“Parametric study of Helmholtz resonator performance and effect of poroacoustic material use in resonator design”**, Tese de doutorado, 2017
- HELMHOLTZ, H. von. **“On the Sensation of Tone.”** (1985).
- SELAMET, A. & DICKEY, N. S. **“Theoretical, computational and experimental investigation of Helmholtz resonators with fixed volume:lumped versus distributed analysis”**. *J. Sound Vib.* 187, 0–3 (1984).
- PANTON, R. L. & MILLER, J. M. **“Resonant frequencies of cylindrical Helmholtz resonators”**. *J. Acoust. Soc. Am.* 57, 1533–1535 (1975).
- KINSLER, L. **“Fundamentals of acoustics”**. (1982).
- SEDACCA, B. **“Hand built by lasers. Engineering and Technology”**, v. 6, n. 1, 2011, p. 58—60.
- PRICE, T. R. Infographic: **“A Brief History of 3D Printing”**. Disponível em: < <http://individual.troweprice.com/> >. Acesso em 19/09/2018.
- HULL, C. **“A note on the risk-adjusted discount rate method”**, 1986
- DABAGUE, L. A. M. **“O processo de inovação no segmento de impressoras 3D”**, 2014
- AIRBUS, 2018. **“Global market forecast - airbus”**. Technical report, AIRBUS S.A.S. 2018.
- SMITH, M. J. T. **“Aircraft Noise”**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2004. (Cambridge Aerospace series)
- BATARD, H. **“Development of the quiet aircraft-industrial needs in terms of aircraft noise and main achievements in europe”**. Forum Acusticum, 2005.
- BIES, David A., and HANSEN, Colin. **“Engineering Noise Control”**. (2003)
- SPILLERE, A. M. N. **“Towards optimal design of acoustic liners in turbofan aero-engines”**. [S.l.: s.n.], 2017. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica), UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina), Florianópolis, Brasil.
- BONOMO, L. A. **“Análise de incertezas de uma bancada para redução de impedância acústica com escoamento”** (Trabalho de conclusão de curso em

Engenharia Mecânica), UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina), Florianópolis, Brasil, 2018.

SOEDEL, W. “**Gas Pulsations in Compressor and Engine Manifolds**”. Ray W. Herrick Laboratories, Purdue University, 1978.

SANTOS, J. L. P. dos. “**Estudo do potencial tecnológico de materiais alternativos em absorção sonora**”. Editora da UFSM, Santa Maria, 2005.

SILVA, P. “**Acústica arquitetônica & condicionamento de ar**”. 4ª edição. EDTAL – Empresa Acústica Ltda, Belo Horizonte, 2002.

HENRIQUE, L. L. Acústica Musical. “**Fundação Calouste Gulbenkian**”, Lisboa, 2002. 1130p

CHUA, C. K. and LEONG, K. F. (2014). “**3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications**”, 4th ed., World Scientific, Singapore.

Hanson, D.B., “**Theory for Broadband Noise of Rotor and Stator Cascades With Inhomogeneous Inflow Turbulence Including Effects of Lean and Sweep**”, NASA/CR-2001-210762, May 2001.

CRI ONLINE. **Xun Chinês. S/D**. Disponível em:

<<http://portuguese.cri.cn/chinaabc/chapter23/chapter230305.htm>> Acesso em: 4 de outubro de 2018.

BEDOUT, J. M., FRANCKEK, M. A., BERNHARD, R. J. e MONGEAU, L. “**Adaptive - Passive Noise Control with Self-Tuning Helmholtz Resonators**”. Journal of Sound and Vibration, vol. 202, pp. 109-123, 1997.

ESTEVE, S. J. e JOHNSON, M. E. “**Adaptive Helmholtz resonators and passive vibration absorbers for cylinder interior noise control. Journal of Sound and Vibration**”. Vol. 288, pp. 1105–1130, 2005.

BERNHARD, R. J. “**The state of the art of active–passive noise control**”, Proceedings of Noise-Con’94, Ft. Lauderdale, USA, 1994.

AUGUST P. “**Projeto ótimo de ressonadores de helmholtz para controle passivo de ruído em cavidades acústicas**” 2012

Beranek, L. L. and Ver, I. L., **Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications**, 1ª Ed., New York: Wiley, 1992

**Método de Newton-Raphson**. Disponível em:

<[http://www2.ufersa.edu.br/portal/view/uploads/setores/114/arquivos/matematica/calculo\\_numerico/met\\_newton\\_raphson.pdf](http://www2.ufersa.edu.br/portal/view/uploads/setores/114/arquivos/matematica/calculo_numerico/met_newton_raphson.pdf)>. Acesso em 12 de dezembro de 2018.

SEDRA, S.; SMITH, K.. **Microeletrônica**. 4ª. Edição, Pearson Makron Books, São Paulo, Brasil, 2005

NAKASHIMA, Kazuo, **Valor Médio Eficaz**, Instituto de Engenharias e Sistemas e Tecnologias da Informação – Universidade Federal de Itajubá, 1993.

## ANEXOS

### ANEXO A

#### O Método de Newton-Raphson

O método de Newton-Raphson, desenvolvido por Isaac Newton e Joseph Raphson, tem o objetivo de estimar as raízes de uma função. O primeiro passo é escolher uma aproximação inicial. Após isso, calcula-se a equação da reta tangente (por meio da derivada) da função nesse ponto e a interseção dela com o eixo das abcissas, a fim de encontrar uma melhor aproximação para a raiz. Repetindo-se o processo, cria-se um método iterativo para encontrarmos a raiz da função.

O método iterativo é dado por:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}, n \in \mathbb{N}$$

Onde  $x_n$  é uma aproximação inicial dada,  $n$  indica a  $n$ ésima iteração do algoritmo e  $f'(x_n)$  é a derivada da função  $f$  no ponto  $x_n$ .

#### Condições de convergência

As condições suficientes de convergência podem ser estabelecidas com mais rigor: “Seja  $[a, b]$  um intervalo que contém uma só raiz da equação  $f(x) = 0$ . A sucessão de valores  $x_i$  gerados pelo método de Newton-Raphson é monótona e limitada pela raiz  $x_0$  (portanto convergente) se:

1.  $f'(x) \neq 0, \forall x \in [a, b]$ ;
2.  $f''(x)$  é de sinal constante em  $]a, b[$ , ou seja,  $f''(a) \cdot f''(b) > 0$ ;
3. O valor inicial  $x_0$  for o extremo do intervalo  $[a, b]$ , em que  $f(x_0) \cdot f''(x_0) < 0$ , isto é toma-se  $x_0 = a$  ou  $x_0 = b$  de modo que  $f(x_0)$  e tenham o mesmo sinal.”

## ANEXO B

Montagem de um amplificador de potência típico classe AB

### Introdução

- Uma eficiência elevada implica poucas perdas por dissipação;
- A potência dissipada no amplificador é limitada pela máxima temperatura da junção Coletor-Base ( $150^{\circ}$  e  $200^{\circ}$  para Silício);
- Os transístores utilizados são transístores de potência e são necessários cuidados especiais em relação às suas propriedades térmicas;
- O modelo de pequenos sinais nem sempre é aplicável

a) Classe A – conduzem durante o ciclo completo dos sinais de entrada ( $360^{\circ}$ )

b) Classe B – conduzem apenas durante meio ciclo dos sinais de entrada ( $180^{\circ}$ )

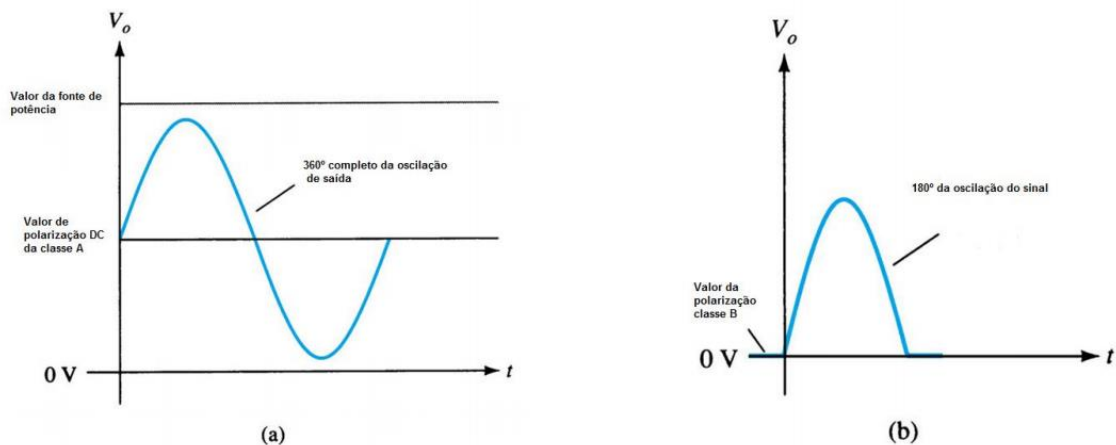
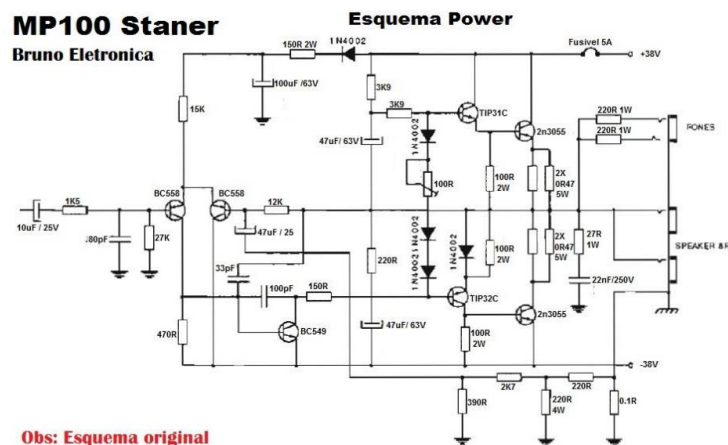


Figura 32- Condução da onda (Fonte: Morgado Dias – Eletrônica II)



Obs: Esquema original

Figura 33 - Diagrama do circuito do amplificador de potência - Fonte: Bruno Eletrônica

O circuito é composto de alguns setores, descritos abaixo:

1. Filtragem “All-pass” e Acoplador Z;
2. Buffer de entrada;

3. Regulador de ganho unitário inicial – Filtragem “All-Pass”;
4. Fonte de corrente;
5. Amplificador de Classe AB de ganho aumentado;
6. Auto falantes;
7. Saída de corrente;
8. Realimentação Negativa e Fuga de corrente Quiescente (regulagem da temperatura

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Códigos em MatLab

#### A.1 - Código para o cálculo da frequência de ressonância através da equação (8):

```
c = 343.7;
lc = 0.005;
v = 0.000108;
d = 0.006;
ac = pi*((d/2)^2);

fr = (c/(2*pi))*sqrt(ac/(v*lc))
```

## A.2 - Cálculo da *Transmission Loss* através da equação (15)

```

%% input
c = 343.7;
lc = 0.001;
l = 0.055;
l1 = 0.075;
l2 = 0.095;
dc = 0.006;
Ac = pi*(dc/2)^2;
d = 0.05;
Av = pi*((d/2)^2);
dt = 0.042;
ap = pi*(dt/2)^2;

fr = 100:1:1000;

k = (2*pi*fr)/c;

TL = 10*log10(1+((Ac/(2*ap))*tan(k*lc) +
(Av/Ac)*tan(k*l))./(1-(Av/Ac)*tan(k*l).*tan(k*lc))).^2);

TLL = 10*log10(1+((Ac/(2*ap))*tan(k*lc) +
(Av/Ac)*tan(k*l1))./(1-(Av/Ac)*tan(k*l1).*tan(k*lc))).^2);

TLLL = 10*log10(1+((Ac/(2*ap))*tan(k*lc) +
(Av/Ac)*tan(k*l2))./(1-(Av/Ac)*tan(k*l2).*tan(k*lc))).^2);

figure(1);
plot(fr,TL)
grid on;
hold on;
plot(fr,TLL)
grid on;
hold on;
plot(fr,TLLL)
grid on;
xlabel('Frequencia (Hz)')
ylabel('Transmission Loss (dB)')
title('Comparacao da TL para ressonadores com diferentes profundidades de
cavidade');

```

### A.3 – Código para o cálculo da impedância em paralelo

```
c = 343.7; %m/s
d = 0.05;
l = 0.065;
v = pi*((d/2)^2)*l;
f = 756.85;
L = 0.001;
k = (2*pi*f)/c;
s = pi*((0.006/2)^2);
n = 2;

zc = -(c/(k*v))*i

zt = ((c*(k^2))/pi) + ((c*k*L)/s)*i

zeq = (zc*zt)/(n*zt + zc);
zn = zeq/zt;
x = imag(zn);

figure(1)
plot (n,x)
grid on;
xlabel('Numero de ressonadores')
ylabel('Reatancia Acustica')
title('Reatancia acustica de acordo o numero de ressonadores');
```



#### A.4 – Código para o cálculo da impedância em série

```

c = 343.7; %m/s
d = 0.05;
l = 0.043;
v = pi*((d/2)^2)*l;
f = 756.85;
L = 0.001;
k = (2*pi*f)/c;
s = pi*((0.006/2)^2);
n = 2:1:20;
lr = 0.07;

zc = -(c/(k*v))*i;

zt = ((c*(k^2))/pi) + ((c*k*L)/s)*i;

zL = (zt*zc)/(zt+zc);

z0 = zt*(((zL/zt)+tan(k*lr))*i)/(1+(zL/zt)*tan(k*lr))

zeq = ((1/zc)+(1/z0))^-1
abs(zeq)

```

## A.5 – Código para o cálculo da frequência de ressonância através da equação (19)

```

%% input
c = 343.7;
lc = 0.001;
l = 0.065;
Ac = pi*(0.006/2)^2;
Av = (3*((0.05/2)^2)*sqrt(3))/2;

%% Grafico das infinitas raizes
fr = 700:1:1600;
y = (tan(((2*pi*fr)/c)*lc) .* tan(((2*pi*fr)/c)*l) - Ac/Av);

figure;
plot(fr,y);
grid on;
xlabel('fr');
ylabel('f(fr)');
title('Infinitas Raizes - Visao Geral');

%% Achar uma Raiz
fun = @(fr) (tan((2*pi*fr)/c*lc) * tan((2*pi*fr)/c*l) - Ac/Av); %
parameterized function

fr0 = 800;
fr = fsolve(fun,fr0)

```

## A.6 – Código para o cálculo da frequência de ressonância através da equação (20)

```

%% input
c = 343.7;
lc = 0.001;
l = 0.0428;
Ac = pi*(0.006/2)^2;
d = 0.05;
Av = d^2;

%% Grafico das infinitas raizes
fr = 0:1:1000;
%y = (tan(((2*pi*fr)/c)*lc) .* tan(((2*pi*fr)/c)*l) - Ac/Av);
y = Av/Ac*lc/l*((2*pi*fr)/c)*l - (cot((2*pi*fr)/c)*l);
figure;
plot(fr,y);
grid on;
xlabel('fr');
ylabel('f(fr)');
title('Infinitas Raizes - Visao Geral');

fun = @(fr) (Av/Ac)*(lc/l)*((2*pi*fr)/c)*l - (cot((2*pi*fr)/c)*l);
fr0 = 863;
fr = fsolve(fun,fr0)

```

## A.7 – Código para os gráficos da *Transmission Loss* observando a variação da profundidade da cavidade

```

%% input
c = 343.7;
lc = 0.001;
l = 0.055:0.02:0.055+9*0.02;
dc = 0.006;
Ac = pi*(dc/2)^2;
d = 0.05;
Av = pi*((d/2)^2);
dt = 0.042;
ap = pi*(dt/2)^2;

fr = 100:1:1000;

k = (2*pi*fr)/c;

N = numel(l);
cmp = hsv(N);
%%cmp = jet(N);
leg = cell(10,1);
%%
figure;
hold on;
grid on;

for i = 1:N
    TL = 10*log10(1+((Ac/(2*ap))*tan(k*lc) + (Av/Ac)*tan(k*l(i)))./(1-
(Av/Ac)*tan(k*l(i))).*tan(k*lc))).^2);
    plot(fr,TL,'Color',cmp(i,:));
    leg{i} = sprintf('L = %.4f',l(i));
end
xlabel('Frequencia (Hz)')
ylabel('Transmission Loss (dB)')
title('Comparacao da TL para ressonadores com diferentes profundidades de
cavidade');
legend(leg);

```

## APÊNDICE B – Código em Python

```

# Henrique G M
# Analisador simples de sinais
# 27/06/19
import wave
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import struct
import math
import pdb

from scipy.signal import hamming, convolve

#####
# Sinal para Teste
#N= 8192
#A1= 3
#f1= 150
#fs= 44100
#dt= 1.0/fs
#fm= fs/2.0
#tt= np.arange(0,N*dt,dt)
#wt= 2*np.pi*f1*tt
#xt= A1*np.cos(wt)

#####
# Leitura de sinal
#####

filename= 'mic_1_med1_300.wav'
arquivoWav = wave.open(filename, 'r')
print "Numero canais: ", arquivoWav.getnchannels()
print "Numero bytes: " ,arquivoWav.getsampwidth()
print "Taxa de amostragem: ", arquivoWav.getframerate()
print "Numero de frames: ", arquivoWav.getnframes()
print "Compactacao: ", arquivoWav.getcompname()

frames= arquivoWav.readframes(arquivoWav.getnframes())
deltaX= 1.0 / arquivoWav.getframerate()
tempo = np.arange(start=0, stop= arquivoWav.getnframes()*deltaX, step= deltaX,
dtype=np.float)
wavDataList = [struct.unpack("<h", frames[nLoop] + frames[nLoop+1])[0] for nLoop
in range(0,len(frames),2) ]
wavArray= np.array(wavDataList)

#####
# Parametros de amostragem
#####
N= 8192

```

```

fs= arquivoWav.getframerate()
#####
df= float(fs/N)
dt= 1.0/fs
fm= fs/2.0
#####

xt= wavArray[-N:]
xt= np.divide(xt,32773.75)
tt= np.arange(0,N*dt,dt)
ff = fs*np.arange((N/2))/N; # frequency vector
arquivoWav.close()

xrms= np.sqrt(np.mean(xt**2))
#####
# Analisador
# FFT

xf= np.fft.fft(xt)[0:int(N/2)]/N # FFT function from numpy
xf[1:]= 2*xf[1:] # need to take the single-sided spectrum only
absxf= np.abs(xf) # be sure to get rid of imaginary part
angxf= np.angle(xf)

xdtft= np.absolute(np.fft.fftshift(xf))
freqs= np.fft.fftfreq(N,df)
nfreqs= np.fft.fftshift(freqs)

# Graficos

plt.plot(tt,xt)
plt.xlabel('Tempo [s]')
plt.ylabel('Amplitude')
plt.grid(True)
plt.title('Arquivo: ' + filename)
plt.legend(['Valor (RMS) = ' + str(xrms)], loc=9)

fig= plt.figure()
ax= fig.add_subplot(211)
ax.plot(ff,absxf)
ax.set_xscale('log')
ax.set_yscale('log')
plt.ylabel('Amplitude [LOG-ABS]')
plt.xlabel('Frequencia [Hz]')
plt.title('Arquivo: ' + filename)
plt.grid(True)

ax= fig.add_subplot(212)
ax.plot(ff,angxf)
ax.set_xscale('log')
ax.set_yscale('log')

```

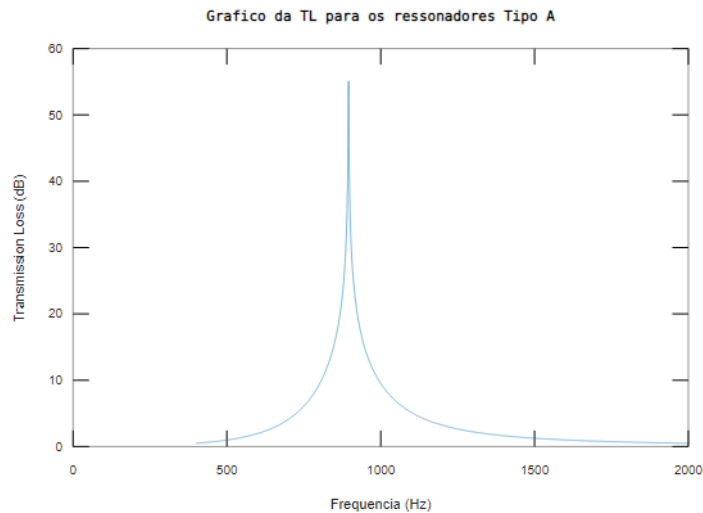
```
plt.ylabel('Fase [rad]')  
plt.xlabel('Frequencia [Hz]')  
plt.grid(True)
```

```
plt.show()
```

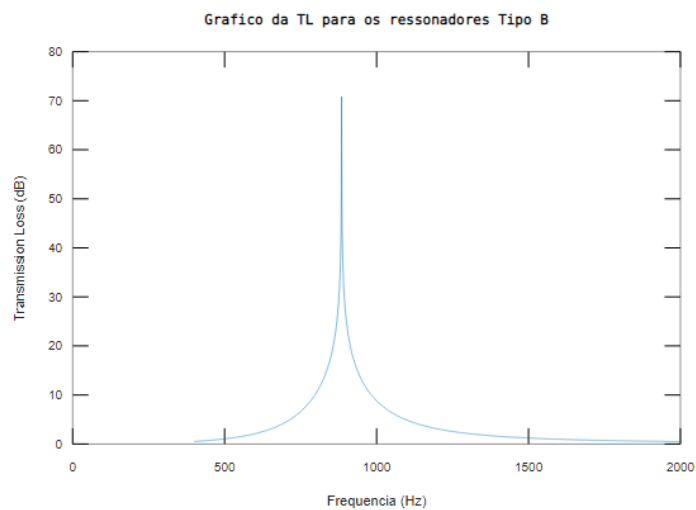
**APÊNDICE C – Resultados encontrados das *Transmission Losses* das geometrias, bem como os gráficos que as representam, os valores das frequências naturais para cada geometria e os resultados sobre as combinações em série em paralelo de cada estrutura, bem como o arranjo matricial.**

Os resultados abaixo são frutos do TCC 1 e que podem ser avaliados separadamente do TCC 2. Abaixo serão vistos os gráficos e valores da TL para cada tipo de ressonador analisado.

Posteriormente, foi feita a análise para o arranjo de ressonadores em série e em paralelo, extraindo a impedância da estrutura. Por fim, analisou-se a TL dos ressonadores organizados em série/paralelo simultaneamente, formando um arranjo matricial de ressonadores.



**Figura 34 - Gráfico da *Transmission Loss* para os ressonadores Tipo A pela equação (2).**



**Figura 35 -Gráfico da *Transmission Loss* para os ressonadores Tipo B pela equação (2).**



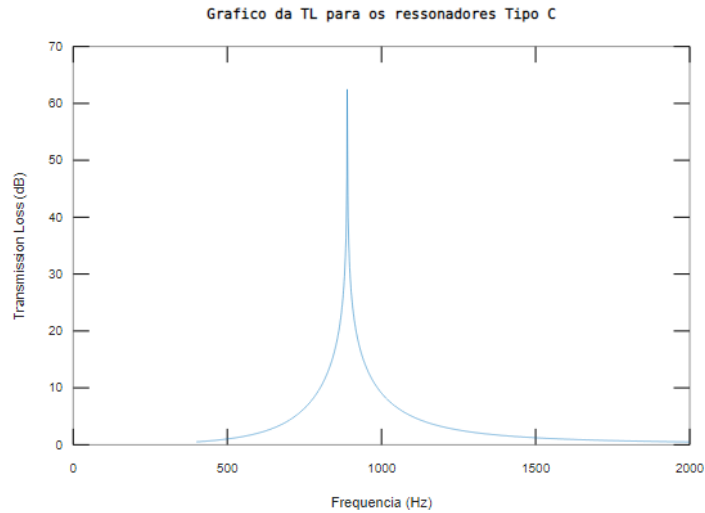


Figura 36 - Gráfico da *Transmission Loss* para os ressonadores Tipo C pela equação (2)

Encontrou-se também o valor em Decibel para a *Transmission Loss* de cada tipo de ressonador, como pode ser visto na tabela abaixo:

Tabela 16 - Valores da *Transmission Loss* através da equação (2)

Teste da amostra	Ressonador A	Ressonador B	Ressonador C
Tipo	SDOF	SDOF	SDOF
Geometria	Hexagonal	Cilíndrico	Retangular
TL [dB]	54,76	70,85	62,47

Agora, a tabela abaixo mostra a comparação das frequências naturais usando diferentes abordagens, sendo estas através da equação (8), (10) e (11).

Tabela 17 - Valores da frequência natural calculados através das equações (8), (10) e (11)

Teste da amostra	Ressonador A	Ressonador B	Ressonador C
Tipo	SDOF	SDOF	SDOF
Geometria	Hexagonal	Cilíndrico	Retangular
Frequência natural - Equação (8)	895,51	885,08	889,21
Frequência natural - Equação (10)	756,85	784,03	823,62
Frequência natural - Equação (11)	861,22	862,00	860,93

Essa diferença de frequência natural se dá principalmente pelo fato da equação (8) não levar em consideração os parâmetros geométricos como é feito pela equação (10) e (11)

De posse das novas frequências naturais, a tabela abaixo mostra a comparação da *Transmission Loss* através das equações (2) e (6)

**Tabela 18 - Valores da *Transmission Loss* calculados combinando das equações (8) e (10) com as equações (2) e (6)**

Teste da amostra	Ressonador A	Ressonador B	Ressonador C
Tipo	SDOF	SDOF	SDOF
Geometria	Hexagonal	Cilíndrico	Retangular
TL pela Equação (2) [dB] - $f_r$ pela equação (8) [hz]	54,76	70,85	62,46
TL pela Equação (6) [dB] - $f_r$ pela equação (10) [hz]	62,81	67,05	63,35

## A.1 Hexagonal

A.1.1 Análise ressonador A (Hexagonal) alterando o comprimento do pescoço

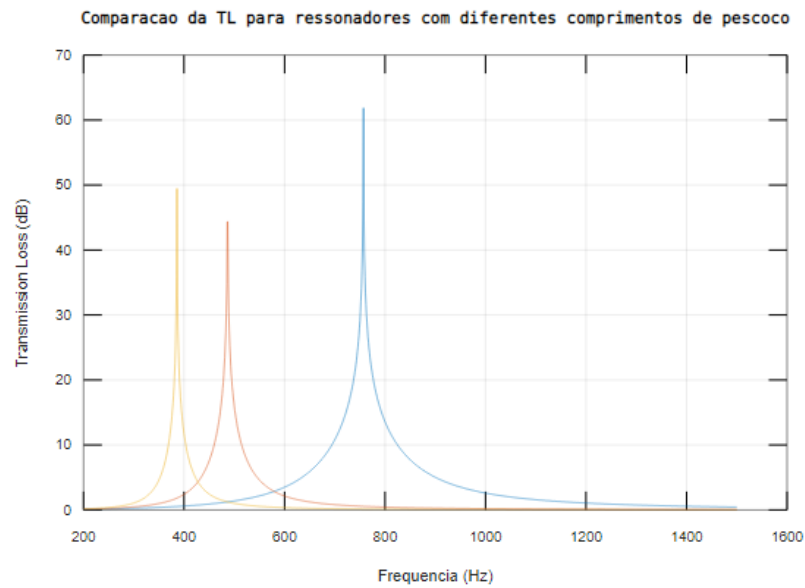
**Tabela 19 - Valores das frequências naturais avaliadas quando se altera o comprimento efetivo do pescoço**

Teste da amostra (Hexagonal) – SDOF	
Frequência natural - Equação (10) - $L' = 0,001$ m	756,85
Frequência natural - Equação (10) - $L' = 0,003$ m	486,79
Frequência natural - Equação (10) - $L' = 0,005$ m	385,86

Observa-se que o valor da frequência natural diminui com o aumento do pescoço. O resultado vai de acordo a bibliografia, em que a equação demonstra o seu comportamento proporcional de acordo a variação de  $L'$ .

**Tabela 20 - Valores das *Transmission Losses* avaliadas quando se altera o comprimento efetivo do pescoço**

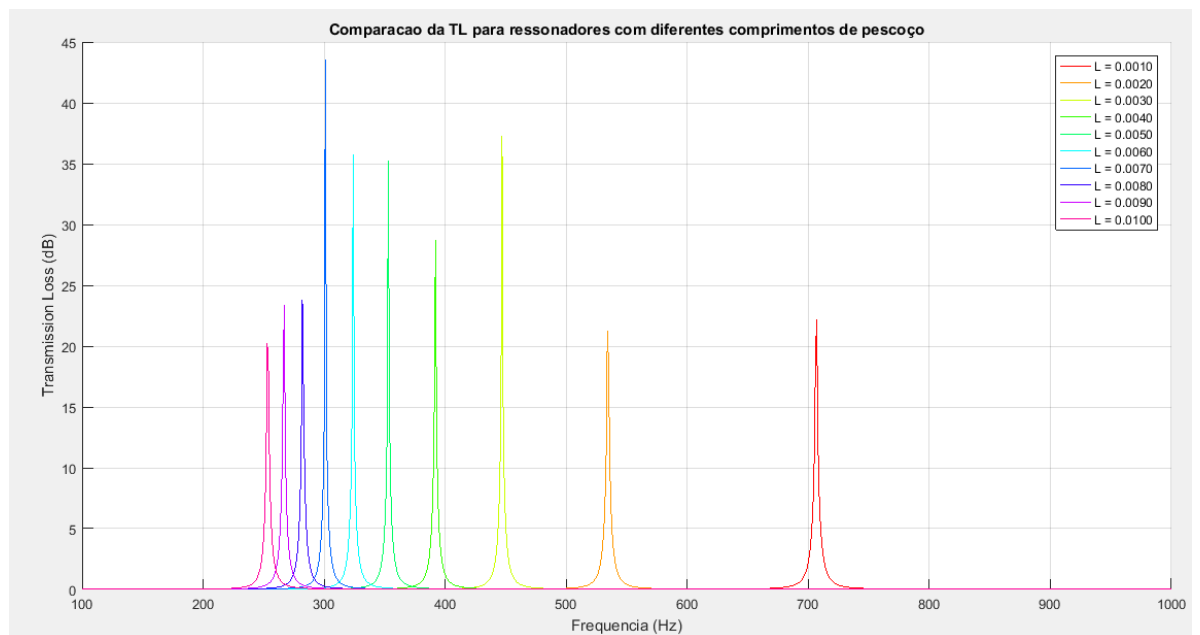
Teste da amostra	Ressonador A
Tipo	SDOF
Geometria	Hexagonal
TL pela Equação (6) - $f_r$ pela equação (10) - $L' = 0,001$ m	62,81
TL pela Equação (6) - $f_r$ pela equação (10) - $L' = 0,003$ m	44,23
TL pela Equação (6) - $f_r$ pela equação (10) - $L' = 0,005$ m	49,73



**Figura 37 - Comparação da *Transmission Loss* para diferentes tipos de configuração de pescoço.** Sendo azul =  $L' = 0,001\text{m}$ , vermelho  $L' = 0,003\text{m}$  e laranja  $L' = 0,005\text{m}$ .

Devido ao comportamento não linear dos picos da *Transmission Loss*, decidiu-se por avaliar 10 valores de pescoço, aumentando de 0,001 m a cada iteração.

O gráfico pode ser visto abaixo:



**Figura 38 - Valores da *Transmission Loss* de acordo a 10 variações de comprimento de pescoço**

Observa-se que com a diminuição do pescoço, diminui-se a frequência de ressonância, porém, não houve uma diminuição linear do pico do valor da *Transmission Loss*. As próximas análises seguirão então, apenas com três variações geométricas, com seus respectivos gráficos.

Análise ressonador A (Hexagonal) alterando o volume da cavidade

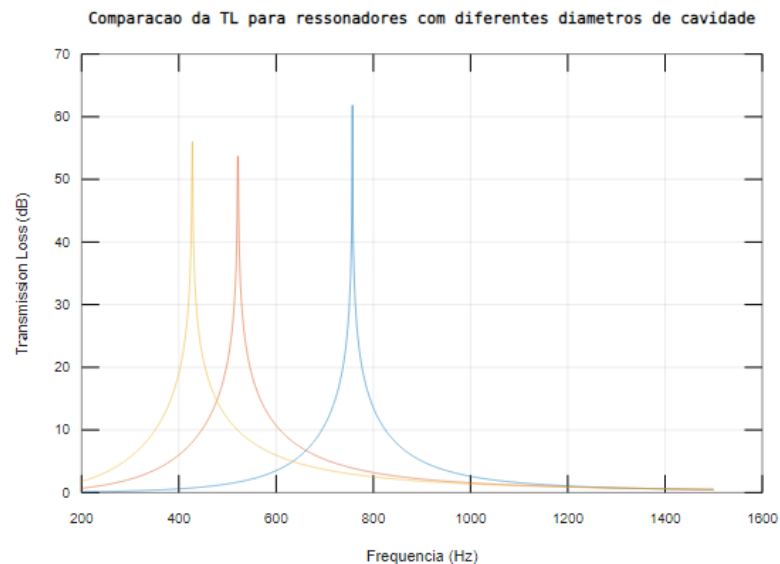
Os novos valores da frequência natural podem ser vistos através da tabela abaixo, quando se varia o volume da câmara, mantendo o comprimento efetivo do pescoço em 0,001 m.

**Tabela 21 - Valores das frequências naturais avaliadas quando se altera o volume da cavidade**

Teste da amostra (Hexagonal) - SDOF	
Frequência natural - Equação (10) - $d = 0,05$ m	756,85
Frequência natural - Equação (10) - $d = 0,08$ m	521,51
Frequência natural - Equação (10) - $d = 0,10$ m	427,68

**Tabela 22 - Valores das *Transmission Losses* avaliadas quando se altera o volume da cavidade**

Teste da amostra	Ressonador A
Tipo	SDOF
Geometria	Hexagonal
<i>TL</i> pela Equação (6) - $F_r$ pela equação (10) - $d = 0,05$ m	62,81
<i>TL</i> pela Equação (6) - $F_r$ pela equação (10) - $d = 0,08$ m	50,24
<i>TL</i> pela Equação (6) - $F_r$ pela equação (10) - $d = 0,10$ m	57,87



**Figura 39 - Comparação da *Transmission Loss* para diferentes tipos de configuração de cavidade.**

Sendo azul =  $d = 0,05$ m, vermelho  $d = 0,08$ m e laranja  $d = 0,10$ m.

### A.1.2 Análise ressonador A (Hexagonal) alterando a profundidade da cavidade

**Tabela 23 - Valores das frequências naturais avaliadas quando se altera a profundidade da cavidade**

Teste da amostra (Hexagonal) – SDOF	
Frequência natural - Equação (10) - $l = 0,065$ m	756,85
Frequência natural - Equação (10) - $l = 0,085$ m	633,47
Frequência natural - Equação (10) - $l = 0,10$ m	565,97

**Tabela 24 - Valores das *Transmission Losses* avaliadas quando se altera a profundidade da cavidade**

Teste da amostra	Ressonador A
Tipo	SDOF
Geometria	Hexagonal
TL pela Equação (6) - Fr pela equação (10) - $l = 0,065$ m	63,04
TL pela Equação (6) - Fr pela equação (10) - $l = 0,085$ m	58,32
TL pela Equação (6) - Fr pela equação (10) - $l = 0,100$ m	73,40

Nota-se que frequência natural e a *Transmission Loss* não se alterou quando calculadas através das equações (8) e (2). Isso se deve ao fato dessas equações não levar em consideração o parâmetro geométrico profundidade.



**Figura 40 - Comparação da *Transmission Loss* para diferentes tipos de profundidade de cavidade**

Sendo azul =  $l = 0,065$ m, vermelho  $l = 0,085$ m e laranja  $l = 0,100$ m.

## A.2 Cilíndrico

### A.2.1 Análise ressonador B (Cilíndrico) alterando o comprimento do pescoço

Tabela 25 - Valores das frequências naturais avaliadas quando se altera o comprimento efetivo do pescoço

Teste da amostra (Cilíndrico) – SDOF	
Frequência natural - Equação (10) - $L' = 0,001$ m	783,81
Frequência natural - Equação (10) - $L' = 0,003$ m	489,54
Frequência natural - Equação (10) - $L' = 0,005$ m	385,71

Tabela 26 - Valores das TL's avaliadas quando se altera o comprimento efetivo do pescoço

Teste da amostra	Ressonador B
Tipo	SDOF
Geometria	Cilíndrico
TL pela Equação (6) - Fr pela equação (10) - $L' = 0,001$ m	56,12
TL pela Equação (6) - Fr pela equação (10) - $L' = 0,003$ m	46,77
TL pela Equação (6) - Fr pela equação (10) - $L' = 0,005$ m	43,02

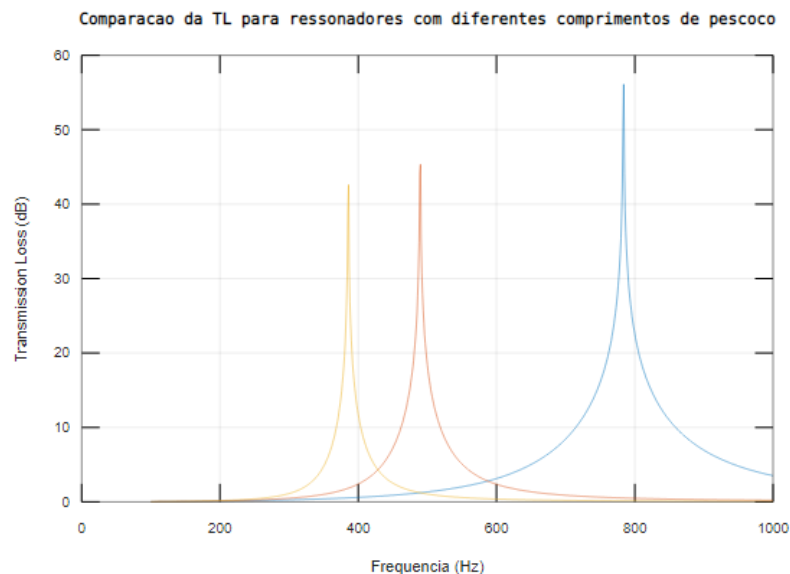


Figura 41 - Comparação da *Transmission Loss* para comprimentos de pescoço. Sendo azul =  $L = 0,001$ m, vermelho  $l = 0,003$ m e laranja  $l = 0,005$ m.

### A.2.2 Análise ressonador B (Cilíndrico) alterando o volume da cavidade

Os novos valores da frequência natural podem ser vistos através da tabela abaixo, quando se varia o volume da câmara, mantendo o comprimento efetivo do pescoço em 0,001 m.

**Tabela 27 - Valores das frequências naturais avaliadas quando se altera o volume da cavidade**

Teste da amostra (Cilíndrico) - SDOF	
Frequência natural - Equação (10) - $d = 0,05$ m	783,81
Frequência natural - Equação (10) - $d = 0,08$ m	527,80
Frequência natural - Equação (10) - $d = 0,10$ m	428,50

**Tabela 28 - Valores das TL's avaliadas quando se altera o volume da cavidade**

Teste da amostra	Ressonador B
Tipo	SDOF
Geometria	Cilíndrico
TL pela Equação (6) - $F_r$ pela equação (10) - $d = 0,05$ m	57,33
TL pela Equação (6) - $F_r$ pela equação (10) - $d = 0,08$ m	60,55
TL pela Equação (6) - $F_r$ pela equação (10) - $d = 0,10$ m	54,92

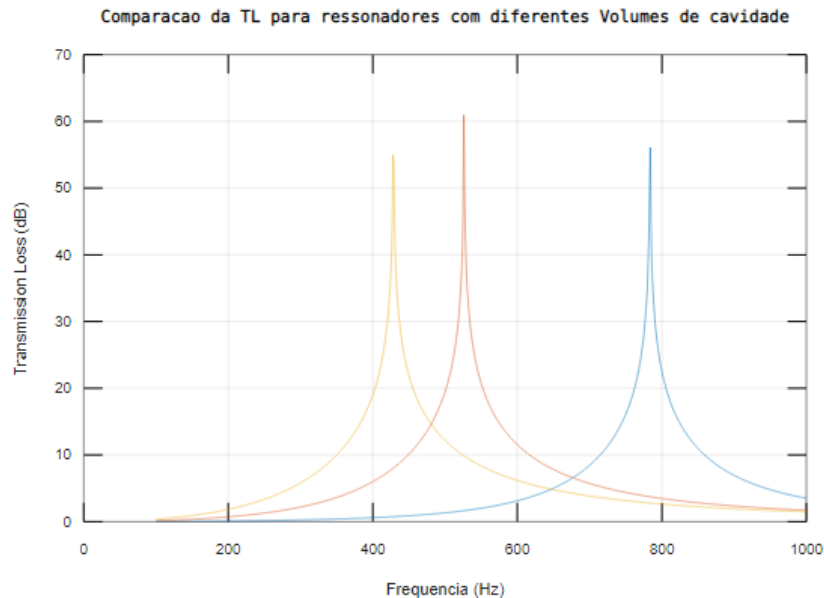


Figura 42 - Comparação da *Transmission Loss* para diferentes tipos de configuração de cavidade

Sendo azul =  $d = 0,05$  m, vermelho  $d = 0,08$  m e laranja  $d = 0,10$  m.

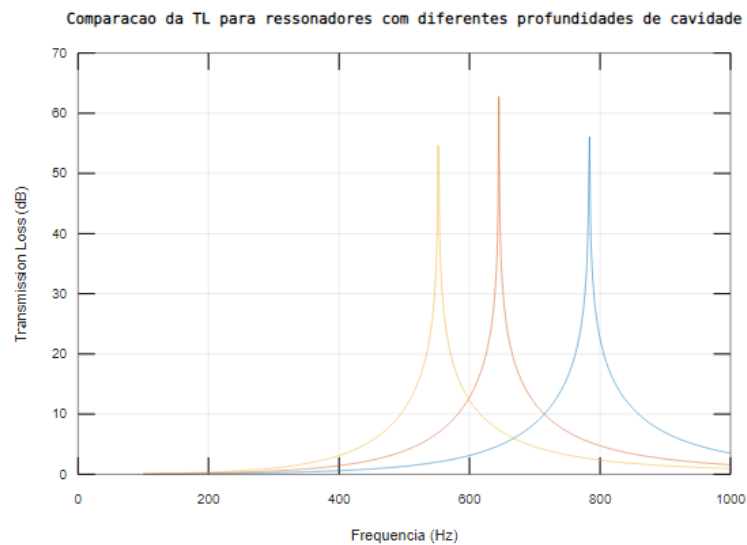
### A.2.3 Análise ressonador B (Cilíndrico) alterando a profundidade da cavidade

**Tabela 29 - Valores das frequências naturais avaliadas quando se altera a profundidade da cavidade**

Teste da amostra (Cilíndrico) – SDOF	
Frequência natural - Equação (10) - $l = 0,055$ m	783,81
Frequência natural - Equação (10) - $l = 0,075$ m	645,22
Frequência natural - Equação (10) - $l = 0,095$ m	552,47

**Tabela 30 - Valores das TL's avaliadas quando se altera a profundidade da cavidade**

Teste da amostra	Ressonador B
Tipo	SDOF
Geometria	Cilíndrico
TL pela Equação (6) - Fr pela equação (10) - $l = 0,055 \text{ m}$	56,36
TL pela Equação (6) - Fr pela equação (10) - $l = 0,075 \text{ m}$	64,24
TL pela Equação (6) - Fr pela equação (10) - $l = 0,095 \text{ m}$	54,77



**Figura 43 - Comparação da *Transmission Loss* para diferentes tipos de profundidade de cavidade**

Sendo azul =  $l = 0,065\text{m}$ , vermelho  $l = 0,085\text{m}$  e laranja  $l = 0,100\text{m}$ .

### A.3 Retangular

A.3.1 Análise ressonador C (Retangular) alterando o comprimento do pescoço

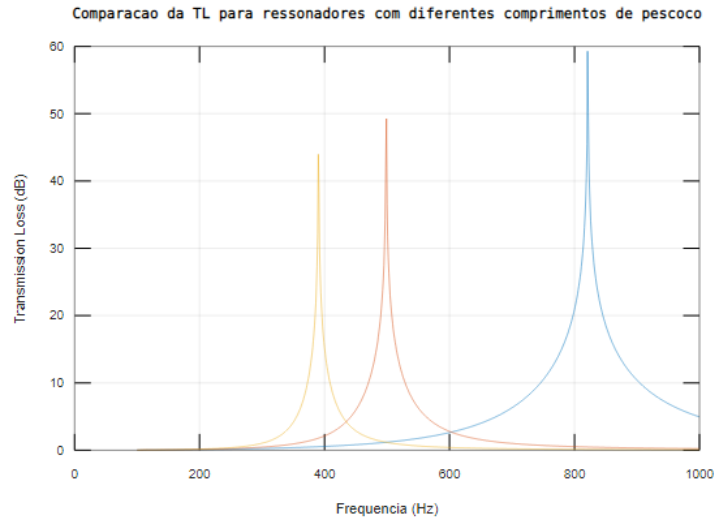
**Tabela 31 - Valores das frequências naturais avaliadas quando se altera o comprimento efetivo do pescoço**

Teste da amostra (Retangular) – SDOF	
Frequência natural - Equação (10) - $L' = 0,001 \text{ m}$	821,55
Frequência natural - Equação (10) - $L' = 0,003 \text{ m}$	498,70
Frequência natural - Equação (10) - $L' = 0,005 \text{ m}$	390,38

**Tabela 32 - Valores das TL's avaliadas quando se altera o comprimento efetivo do pescoço**

Teste da amostra	Ressonador C
Tipo	SDOF
Geometria	Retangular
TL pela Equação (6) - Fr pela equação (10) - $L' = 0,001 \text{ m}$	59,86
TL pela Equação (6) - Fr pela equação (10) - $L' = 0,003 \text{ m}$	49,88
TL pela Equação (6) - Fr pela equação (10) - $L' = 0,005 \text{ m}$	44,12





**Figura 44 - Comparação da *Transmission Loss* para diferentes tipos de configuração de pescoço**

Sendo azul =  $L = 0,001\text{m}$ , vermelho  $l = 0,003\text{m}$  e laranja  $l = 0,005\text{m}$ .

A.3.2 Análise ressonador C (Retangular) alterando o volume da cavidade

Os novos valores da frequência natural podem ser vistos através da tabela abaixo, quando se varia o volume da câmara, mantendo o comprimento efetivo do pescoço em  $0,001\text{ m}$ .

**Tabela 33 - Valores das frequências naturais avaliadas quando se altera o volume da cavidade**

Teste da amostra (Quadrado) - SDOF	
Frequência natural - Equação (10) - $d = 0,05\text{ m}$	821,55
Frequência natural - Equação (10) - $d = 0,08\text{ m}$	538,24
Frequência natural - Equação (10) - $d = 0,10\text{ m}$	437,77

**Tabela 34 - Valores das TL's avaliadas quando se altera o volume da cavidade**

Teste da amostra	Ressonador C
Tipo	SDOF
Geometria	Retangular
TL pela Equação (6) - $F_r$ pela equação (10) - $d = 0,05\text{ m}$	59,91
TL pela Equação (6) - $F_r$ pela equação (10) - $d = 0,08\text{ m}$	54,83
TL pela Equação (6) - $F_r$ pela equação (10) - $d = 0,10\text{ m}$	62,13

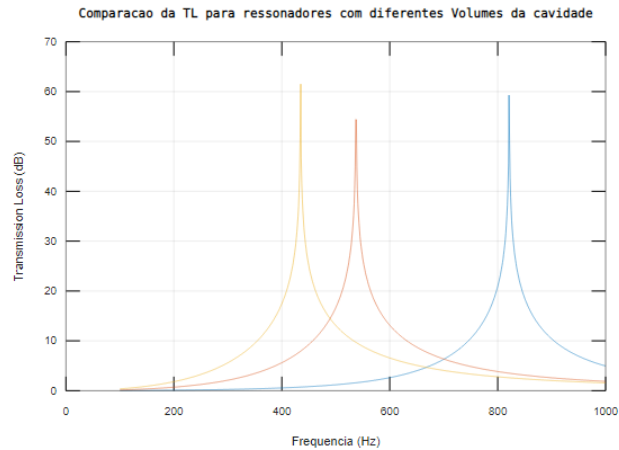


Figura 45 - Comparação da *Transmission Loss* para diferentes tipos de configuração de cavidade. Sendo azul =  $d = 0,05\text{m}$ , vermelho  $d = 0,08\text{m}$  e laranja  $d = 0,10\text{m}$ .

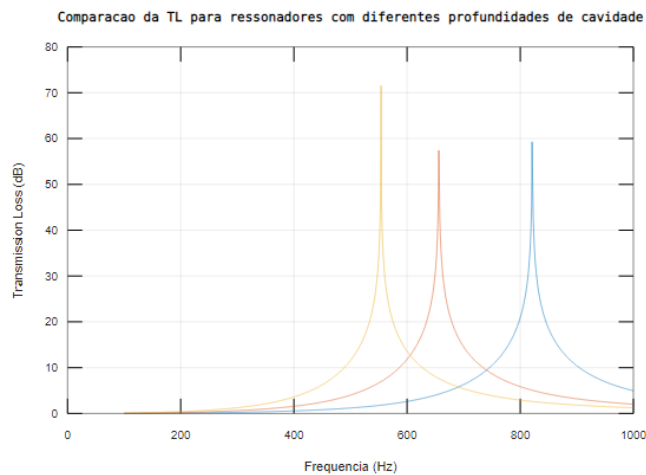
### A.3.3 Análise ressonador C (Retangular) alterando a profundidade da cavidade

**Tabela 35 - Valores das frequências naturais avaliadas quando se altera a profundidade da cavidade**

Teste da amostra (Retangular) – SDOF	
Frequência natural - Equação (10) - $l = 0,043\text{ m}$	821,55
Frequência natural - Equação (10) - $l = 0,063\text{ m}$	656,31
Frequência natural - Equação (10) - $l = 0,083\text{ m}$	553,96

**Tabela 36 - Valores das TL's avaliadas quando se altera a profundidade da cavidade**

Teste da amostra	Ressonador C
Tipo	SDOF
Geometria	Quadrado
TL pela Equação (6) - Fr pela equação (10) - $l = 0,043\text{ m}$	59,81
TL pela Equação (6) - Fr pela equação (10) - $l = 0,063\text{ m}$	58,12
TL pela Equação (6) - Fr pela equação (10) - $l = 0,083\text{ m}$	71,92



**Figura 46 - Comparação da *Transmission Loss* para diferentes tipos de profundidade de cavidade.**

Sendo azul  $l = 0,065\text{m}$ , vermelho  $l = 0,085\text{m}$  e laranja  $l = 0,100\text{m}$ .

#### A.4 Análise de impedância equivalente

##### A.4.1 Combinação em paralelo

##### Hexagonal

O gráfico abaixo foi obtido através das equações (28) e (17), e mostra a relação da impedância de acordo ao número de ressonadores na estrutura. O gráfico mostra a resistência acústica, a parte real da impedância. Nota-se que quanto maior o número de ressonadores, maior será a resistência acústica, indo de acordo a literatura. Observa-se também que a partir de 7 ressonadores em paralelo, o valor da resistência já se suaviza.

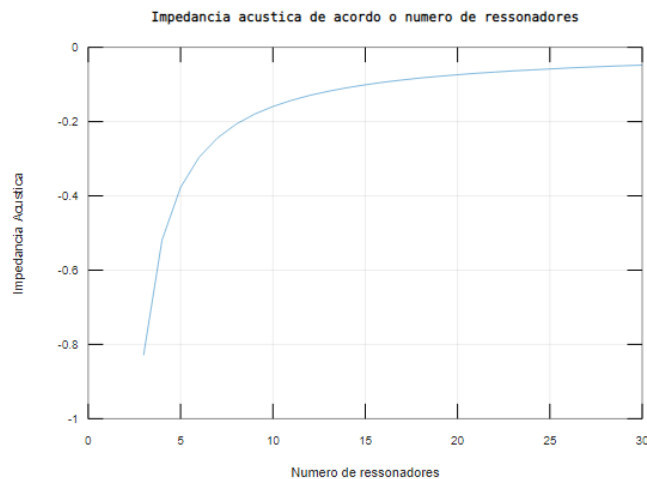


Figura 47 – Gráfico da resistência acústica de acordo ao número de ressonadores

O gráfico abaixo mostra a parte imaginária da impedância, chamada de reatância acústica, que é a oposição que o sistema oferece a passagem da onda sonora. Nota-se que quanto maior o número de ressonadores, maior é a reatância, ou seja, maior é a oposição a passagem do som da estrutura.

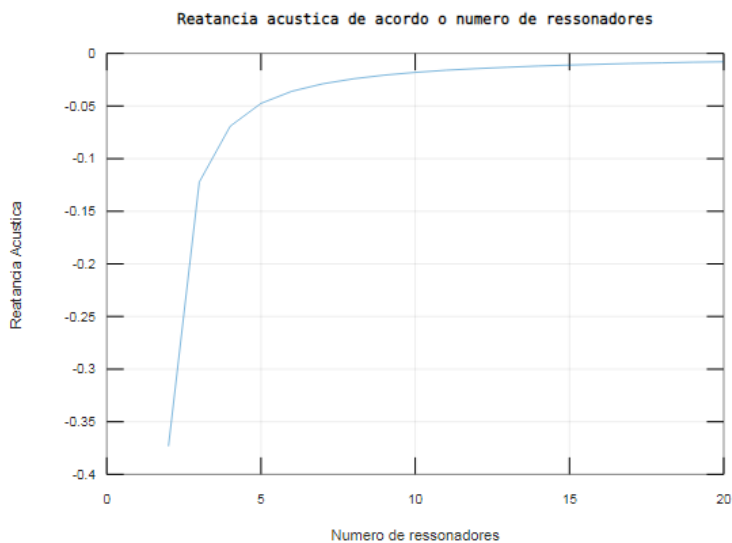


Figura 48 – Gráfico da reatância acústica de acordo com o número de ressonadores

### Cilíndrico

Seguiu-se a mesma análise de impedância para o ressonador cilíndrico. O gráfico que relaciona o número de ressonadores com o a resistência acústica da estrutura pode ser vista abaixo:

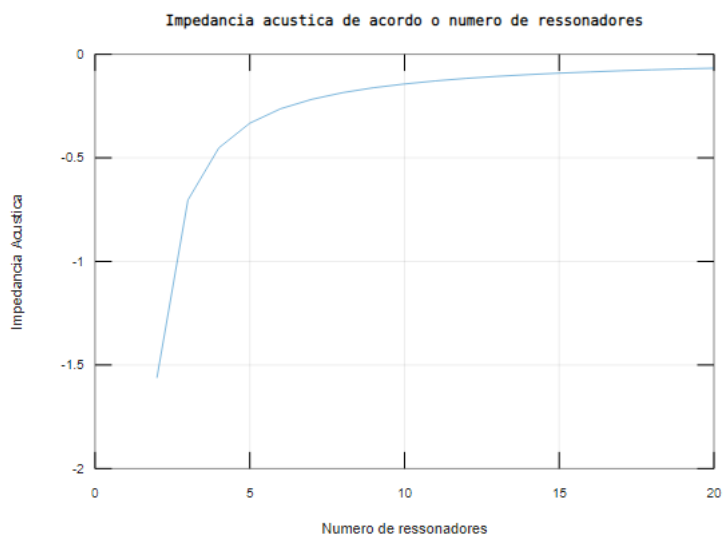


Figura 49 – Gráfico da resistência acústica de acordo com o número de ressonadores

O gráfico abaixo mostra a reatância acústica. A mesma discussão é tida pela qual foi feita para a estrutura Hexagonal.

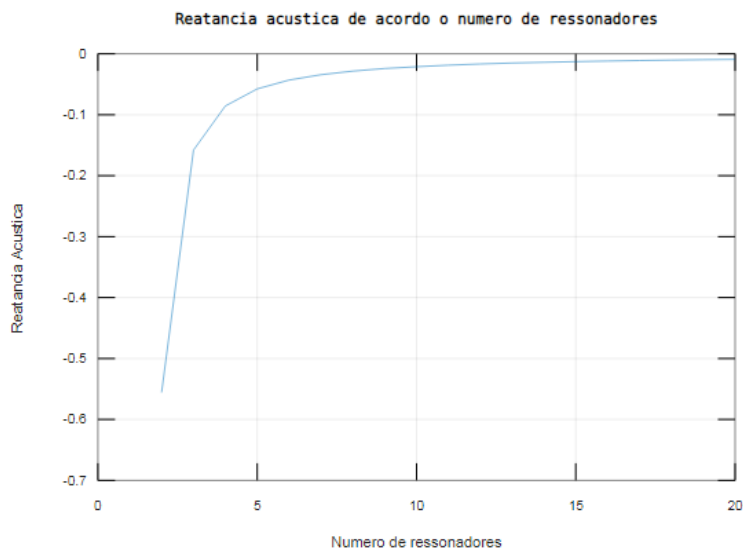


Figura 50 – Gráfico da reatância acústica de acordo o número de ressonadores

Nota-se que a partir de 4 ressonadores em paralelo, a impedância tende-se a estabilizar.

### Retangular

A mesma análise se seguiu para o ressonador quadrado. O gráfico pode ser visto abaixo:

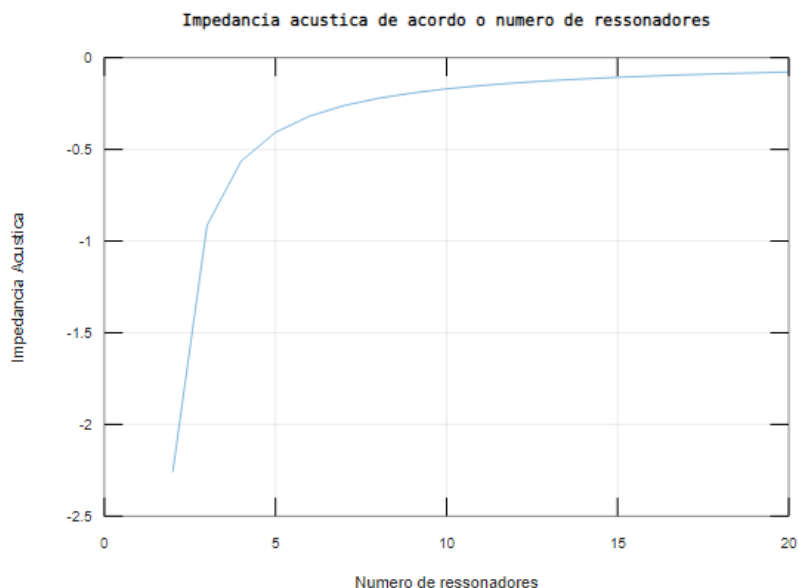


Figura 51 – Gráfico da resistência acústica de acordo ao número de ressonadores

Nota-se que a partir de 5 ressonadores, a resistência acústica tende a se estabilizar. O gráfico abaixo mostra a reatância acústica. A mesma discussão é tida pela qual foi feita para a estrutura Hexagonal.

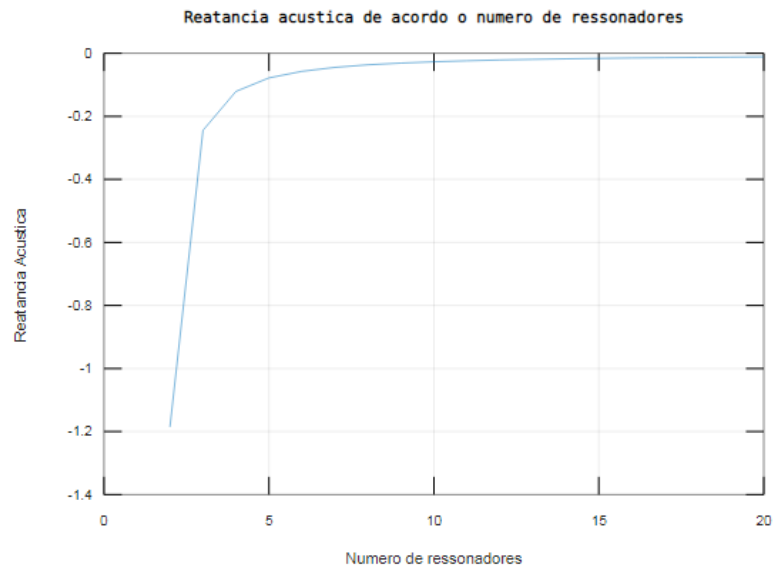


Figura 52 – Gráfico da reatância acústica de acordo ao número de ressonadores

#### A.4.2 Combinação em série Hexagonal

Para a combinação em série, tem-se os seguintes resultados:

**Tabela 37 - Tabela da impedância de acordo o número de ressonadores em série (Hexagonal)**

Número de ressonadores em série	Impedância $K\Omega$
1	39,03
2	174,64
3	194,63
4	311,87

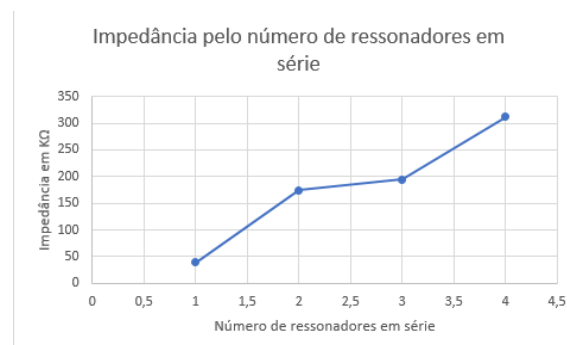


Figura 53 - Gráfico da impedância pelo número de ressonadores em série para a estrutura Hexagonal

Nota-se que a impedância aumenta com o aumento da quantidade de ressonadores em série, indo de acordo com a literatura e intensão do estudo.

### Cilíndrico

Para a combinação em série, tem-se os seguintes resultados:

**Tabela 38 - Tabela da impedância de acordo o número de ressonadores em série (Cilíndrico)**

Número de ressonadores em série	Impedância K $\Omega$
1	44,47
2	145,80
3	189,82
4	327,96

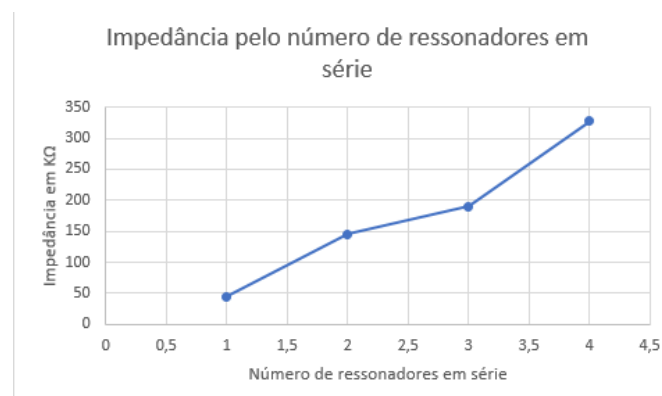


Figura 54 - Gráfico da impedância pelo número de ressonadores em série para a estrutura cilíndrica

A mesma análise pode ser feita para a impedância em série do ressonador tipo Hexagonal, sendo a relação direta do aumento da impedância de acordo com o aumento do número de ressonadores em série.

### Retangular

Para a combinação em série, tem-se os seguintes resultados:

**Tabela 39 - Tabela da impedância de acordo o número de ressonadores em série**

Número de ressonadores em série	Impedância
1	54,3
2	127,12
3	232,97
4	308,48

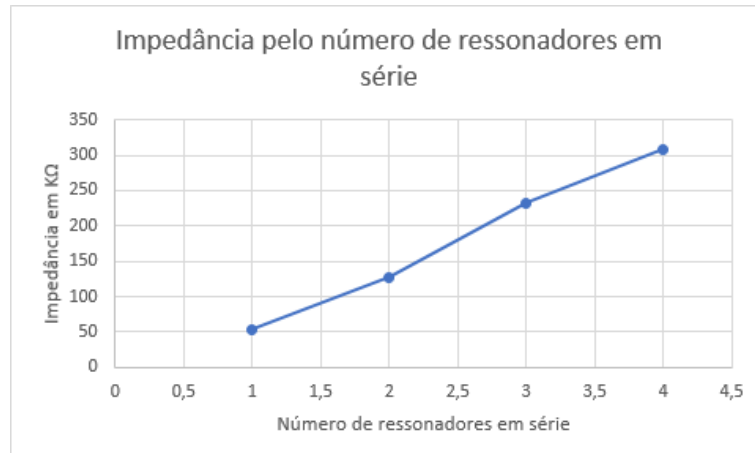


Figura 55 - Gráfico da impedância pelo número de ressonadores em série

Segue-se a mesma análise feita para o ressonador Hexagonal e Cilíndrico.

#### A.4.3 Impedância de um arranjo de ressonadores (Hexagonal)

Resultado para os cálculos da *Transmission Loss* para o arranjo de ressonadores de seção transversal hexagonal.

Tabela 40 - *Transmission Loss* para o arranjo em paralelo (Hexagonal)

Número de ressonadores em paralelo	<i>Transmission Loss</i> (dB)
10	82,37

Tabela 41 - *Transmission Loss* para o arranjo em série (Hexagonal)

Número de ressonadores em série	<i>Transmission Loss</i> (dB)
4	87,49

Observa-se que o valor das *Transmission Losses* para o arranjo de ressonadores é maior que quando comparado a um ressonador apenas. Isso vai de acordo à literatura, já que um arranjo de ressonadores implica numa maior mitigação de ruído para uma dada faixa de frequência.



## APÊNDICE D – Resultados completos das análises experimentais

### Apêndice D.1

**Tabela 42 - Conjunto de resultados do ressonador analisado individualmente com profundidade de l = 0,055m**

Frequência 300Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
1 ressonador - l = 55 mm				
Microfone 1	0,01278	0,018073649	0,008946654	0,009181752
Microfone 2	0,00608	0,008598418		
Frequência 450Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
1 ressonador - l = 55 mm				
Microfone 1	0,01446	0,020449528	0,008895714	0,010168816
Microfone 2	0,00856	0,012105668		
Frequência 600Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
1 ressonador - l = 55 mm				
Microfone 1	0,01002	0,01417042	0,006675732	0,007278831
Microfone 2	0,005046	0,007136122		
Frequência 750Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
1 ressonador - l = 55 mm				
Microfone 1	0,00697	0,009857069	0,002256032	0,002372358
Microfone 2	0,00512	0,007240773		
Frequência 900Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
1 ressonador - l = 55 mm				
Microfone 1	0,00789	0,011158145	0,004492474	0,004493406
Microfone 2	0,004354	0,006157486		

**Tabela 43 -Conjunto de resultados do ressonador analisado individualmente com profundidade de l = 0,040m**

Frequência 300Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
1 ressonador - l = 40 mm				
Microfone 1	0,01278	0,018073649	0,00605883	0,006293928
Microfone 2	0,008122	0,011486243		
Frequência 450Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
1 ressonador - l = 40 mm				
Microfone 1	0,01446	0,020449528	0,00516219	0,006435292
Microfone 2	0,0112	0,015839192		
Frequência 600Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
1 ressonador - l = 40 mm				
Microfone 1	0,01002	0,01417042	0,005467994	0,006071093
Microfone 2	0,0059	0,00834386		

Frequência 750Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
1 ressonador - l = 40 mm				
Microfone 1	0,00697	0,009857069	0,000997381	0,001113708
Microfone 2	0,00601	0,008499424		
Frequência 900Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
1 ressonador - l = 40 mm				
Microfone 1	0,00789	0,011158145	0,003836279	0,003837211
Microfone 2	0,004818	0,006813681		

**Tabela 44 - Conjunto de resultados do ressonadores analisados individualmente com profundidade de l = 0,028m**

Frequência 300Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
1 ressonador - l = 28 mm				
Microfone 1	0,01278	0,018073649	0,009738613	0,009973711
Microfone 2	0,00552	0,007806459		
Frequência 450Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
1 ressonador - l = 28 mm				
Microfone 1	0,01446	0,020449528	0,009871521	0,011144623
Microfone 2	0,00787	0,011129861		
Frequência 600Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
1 ressonador - l = 28 mm				
Microfone 1	0,01002	0,01417042	0,004025496	0,004628595
Microfone 2	0,00692	0,009786358		
Frequência 750Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
1 ressonador - l = 28 mm				
Microfone 1	0,00697	0,009857069	0,004490489	0,004606815
Microfone 2	0,00354	0,005006316		
Frequência 900Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
1 ressonador - l = 28 mm				
Microfone 1	0,00789	0,011158145	0,003819309	0,003820241
Microfone 2	0,00483	0,006830652		

**Tabela 45 - Conjunto de resultados do ressonadores analisados em paralelo com profundidade de l = 0,055m**

Frequência 300Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
3 ressonadores - l = 55 mm - Paralelo				
Microfone 1	0,01278	0,018073649	0,009526481	0,009761579
Microfone 2	0,00567	0,008018591		

Frequência 450Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
3 ressonadores - l = 55 mm - Paralelo				
Microfone 1	0,01446	0,020449528	0,011101887	0,012374989
Microfone 2	0,007	0,009899495		
Frequência 600Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
3 ressonadores - l = 55 mm - Paralelo				
Microfone 1	0,01002	0,01417042	0,006681389	0,007284488
Microfone 2	0,005042	0,007130465		
Frequência 750Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
3 ressonadores - l = 55 mm - Paralelo				
Microfone 1	0,00697	0,009857069	0,003401545	0,003517871
Microfone 2	0,00431	0,00609526		
Frequência 900Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
3 ressonadores - l = 55 mm - Paralelo				
Microfone 1	0,00789	0,011158145	0,004090838	0,00409177
Microfone 2	0,004638	0,006559123		

**Tabela 46 - Conjunto de resultados do ressonadores analisados em série com profundidade de l = 0,055m**

Frequência 300Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
3 ressonadores - l = 55 mm - Série				
Microfone 1	0,01278	0,018073649	0,009399202	0,0096343
Microfone 2	0,00576	0,00814587		
Frequência 450Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
3 ressonadores - l = 55 mm - Série				
Microfone 1	0,01446	0,020449528	0,009065419	0,010338522
Microfone 2	0,00844	0,011935962		
Frequência 600Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
3 ressonadores - l = 55 mm - Série				
Microfone 1	0,01002	0,01417042	0,00736304	0,007966139
Microfone 2	0,00456	0,006448814		
Frequência 750Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
3 ressonadores - l = 55 mm - Série				
Microfone 1	0,00697	0,009857069	0,004476347	0,004592673
Microfone 2	0,00355	0,005020458		
Frequência 900Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
3 ressonadores - l = 55 mm - Série				

Microfone 1	0,00789	0,011158145	0,004698949	0,004699882
Microfone 2	0,004208	0,005951011		

**Tabela 47 - Conjunto de resultados do ressonadores analisados em paralelo com profundidade de l = 0,040m**

Frequência 300Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
3 ressonadores - l = 40 mm - Paralelo				
Microfone 1	0,01278	0,018073649	0,00837814	0,008613238
Microfone 2	0,006482	0,009166932		
Frequência 450Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
3 ressonadores - l = 40 mm - Paralelo				
Microfone 1	0,01446	0,020449528	0,009085218	0,010358321
Microfone 2	0,008426	0,011916163		
Frequência 600Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
3 ressonadores - l = 40 mm - Paralelo				
Microfone 1	0,01002	0,01417042	0,006704016	0,007307116
Microfone 2	0,005026	0,007107837		
Frequência 750Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
3 ressonadores - l = 40 mm - Paralelo				
Microfone 1	0,00697	0,009857069	0,003076275	0,003192602
Microfone 2	0,00454	0,00642053		
Frequência 900Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
3 ressonadores - l = 40 mm - Paralelo				
Microfone 1	0,00789	0,011158145	0,004037098	0,00403803
Microfone 2	0,004676	0,006612863		

**Tabela 48 - Conjunto de resultados do ressonadores analisados em série com profundidade de l = 0,040m**

Frequência 300Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
3 ressonadores - l = 40 mm - Série				
Microfone 1	0,01278	0,018073649	0,009857407	0,010092505
Microfone 2	0,005436	0,007687665		
Frequência 450Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
3 ressonadores - l = 40 mm - Série				
Microfone 1	0,01446	0,020449528	0,009786668	0,011059771
Microfone 2	0,00793	0,011214714		
Frequência 600Hz	Média RMS	Amplitude = Vp	Perda Sonora	Perda Sonora Total
3 ressonadores - l = 40 mm - Série				
Microfone 1	0,01002	0,01417042	0,005977111	0,00658021

Microfone 2	0,00554	0,007834743		
<b>Frequência 750Hz</b>	<b>Média RMS</b>	<b>Amplitude = Vp</b>	<b>Perda Sonora</b>	<b>Perda Sonora Total</b>
3 ressonadores - l = 40 mm - Série				
Microfone 1	0,00697	0,009857069	0,003924804	0,00404113
Microfone 2	0,00394	0,005572001		
<b>Frequência 900Hz</b>	<b>Média RMS</b>	<b>Amplitude = Vp</b>	<b>Perda Sonora</b>	<b>Perda Sonora Total</b>
3 ressonadores - l = 40 mm - Série				
Microfone 1	0,00789	0,011158145	0,004800773	0,004801705
Microfone 2	0,004136	0,005849187		

**Tabela 49 - Conjunto de resultados do ressonadores analisados em paralelo/série com profundidade de l = 0,055m**

<b>Frequência 300Hz</b>	<b>Média RMS</b>	<b>Amplitude = Vp</b>	<b>Perda Sonora</b>	<b>Perda Sonora Total</b>
9 ressonadores - l = 55 mm - Série/Paralelo				
Microfone 1	0,01278	0,018073649	0,010276014	0,010511112
Microfone 2	0,00514	0,007269058		
<b>Frequência 450Hz</b>	<b>Média RMS</b>	<b>Amplitude = Vp</b>	<b>Perda Sonora</b>	<b>Perda Sonora Total</b>
9 ressonadores - l = 55 mm - Série/Paralelo				
Microfone 1	0,01446	0,020449528	0,010762476	0,012035578
Microfone 2	0,00724	0,010238906		
<b>Frequência 600Hz</b>	<b>Média RMS</b>	<b>Amplitude = Vp</b>	<b>Perda Sonora</b>	<b>Perda Sonora Total</b>
9 ressonadores - l = 55 mm - Série/Paralelo				
Microfone 1	0,01002	0,01417042	0,008788567	0,009391666
Microfone 2	0,003552	0,005023287		
<b>Frequência 750Hz</b>	<b>Média RMS</b>	<b>Amplitude = Vp</b>	<b>Perda Sonora</b>	<b>Perda Sonora Total</b>
9 ressonadores - l = 55 mm - Série/Paralelo				
Microfone 1	0,00697	0,009857069	0,005053346	0,005169672
Microfone 2	0,003142	0,004443459		
<b>Frequência 900Hz</b>	<b>Média RMS</b>	<b>Amplitude = Vp</b>	<b>Perda Sonora</b>	<b>Perda Sonora Total</b>
9 ressonadores - l = 55 mm - Série/Paralelo				
Microfone 1	0,00789	0,011158145	0,0048234	0,004824332
Microfone 2	0,00412	0,00582656		

Resultados experimentais das medições com o tubo livre, sem a presença dos ressonadores.

**Tabela 50 - Resultados dos testes com o duto livre sem os ressonadores**

Frequência 300Hz	Média RMS	Amplitude	Perda Sonora
Teste sem ressonador			
Microfone 1	0,01278	0,00903682	0,000117549
Microfone 2	0,01224	0,00865499	
Frequência 450Hz	Média RMS	Amplitude	Perda Sonora
Teste sem ressonador			
Microfone 1	0,01446	0,01022476	0,000636551
Microfone 2	0,01395	0,00986414	
Frequência 600Hz	Média RMS	Amplitude	Perda Sonora
Teste sem ressonador			
Microfone 1	0,01002	0,00708521	0,00030155
Microfone 2	0,00934	0,00660438	
Frequência 750Hz	Média RMS	Amplitude	Perda Sonora
Teste sem ressonador			
Microfone 1	0,00697	0,00492853	5,81632E-05
Microfone 2	0,006633	0,00469024	
Frequência 900Hz	Média RMS	Amplitude	Perda Sonora
Teste sem ressonador			
Microfone 1	0,00789	0,00557907	4,66016E-07
Microfone 2	0,00753	0,00532451	