MANLIUS CAESAR TORQUATO DOS SANTOS ROCHA

**Desenvolvimento de um transdutor ultrassônico capacitivo aplicado na
geração de som audível**

São Paulo
(2021)

MANLIUS CAESAR TORQUATO DOS SANTOS ROCHA

**Desenvolvimento de um transdutor ultrassônico capacitivo aplicado na
geração de som audível**

Versão Corrigida

(Versão Original encontra-se na unidade que aloja
o Programa de Pós-Graduação)

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciência

Orientador:
Prof. Dr. Flávio Buiochi

São Paulo
(2021)

MANLIUS CAESAR TORQUATO DOS SANTOS ROCHA

**Desenvolvimento de um transdutor ultrassônico capacitivo aplicado na
geração de som audível**

Versão Corrigida

(Versão Original encontra-se na unidade que aloja
o Programa de Pós-Graduação)

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciência

Área de Concentração:
Engenharia de Controle e Automação
Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Flávio Buiochi

São Paulo
(2021)

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Manlius, Manlius Caesar T. dos Santos Rocha

Desenvolvimento de um transdutor ultrassônico capacitivo aplicado na geração de som audível / M. C. T. S. R. Manlius -- versão corr. -- São Paulo, 2021.

162 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Transdutores 2.Ultrassom 3.Método dos elementos finitos (Modelagem) 4.Acústica I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

Nome: Manlius Caesar Torquato dos Santos Rocha

Título: Desenvolvimento de um transdutor ultrassônico capacitivo aplicado na geração de som audível

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de Mestre em
Ciência.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Dedico este trabalho à minha mãe Sandra Regina da Silva Rocha, aos meus avós Reginaldo da Silva Rocha e Nair dos Santos Rocha e a minha esposa Terumi Iwahata, por sempre acreditarem em mim e darem todas as condições para que conseguisse chegar até aqui.

Dedico também ao Prof. Dr. Flávio Buiochi pela sua iniciativa, capacidade de coordenação e liderança, sempre acreditando em mim.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Flávio Buiochi, pelo acompanhamento e orientação do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao caríssimo colega Carlos Arturo Burbano Reyna pela sua ajuda nos ensaios experimentais e pelas proveitosas discussões.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistema Mecânicos que direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (processo nº 2017/13094-4) pelo suporte financeiro a esta pesquisa.

A minha mãe Sandra Regina da Silva Rocha à qual dedico grande parte do mérito deste trabalho, sempre me apoiando e dando as condições para que pudesse chegar até aqui, pois apenas a família sabe as dificuldades e lutas pelas quais passamos.

Pela ciência venceremos, “SCIENTIA VINCES”.

Se cheguei até aqui foi porque me apoiei no ombro dos gigantes.

“Isaac Newton”

O conhecimento de cada verdade é algo que vale a pena em si mesmo.

“Leonhard Euler”

RESUMO

Este trabalho trata do desenvolvimento de transdutores capacitivos ultrassônicos e do uso de uma combinação de sinais gerados por esses transdutores para produzir frequências audíveis. A geração desses campos audíveis e diretivos possibilitará novas aplicações não viáveis hoje com a utilização dos alto-falantes convencionais que necessitam utilizar sinais de alta frequência ou grandes superfícies emissoras para alcançar os mesmos efeitos. Utilizando-se o software ANSYS, é feita uma modelagem por elementos finitos de transdutores capacitivos com cavidades triangulares, sendo simuladas seis medidas para as larguras dessas cavidades, entre 0,75 e 2 mm, combinadas com duas medidas de espessura de membrana (12 e 20 μm). É usado o software MATLAB para simular o campo acústico gerado por um transdutor, ou pela combinação de transdutores, com posterior verificação da possibilidade de gerar frequências audíveis combinando frequências ultrassônicas próximas. Foram construídos protótipos desses transdutores e do circuito elétrico necessário para o funcionamento dos mesmos, com base nos valores obtidos nas simulações no ANSYS e no MATLAB (da frequência de ressonância, dos deslocamentos normais à superfície de radiação, dos valores de pressão acústica, das tensões e correntes elétricas necessárias e da possibilidade de gerar sinais audíveis através da combinação de sinais ultrassônicos). Em seguida, esses transdutores são excitados de maneira contínua ou por uma salva de senóides, permitindo verificar que os modelos usados neste trabalho são adequados para o projeto dos protótipos e que é possível obter uma frequência audível a partir da combinação de sinais de frequências ultrassônicas próximas.

Palavras-chave: Transdutor capacitivo, ultrassom, modelagem por elementos finitos, geração de som.

ABSTRACT

This paper deals with the development of ultrasonic capacitive transducers and the use of a combination of signals generated by these transducers to produce audible frequencies. The generation of these audible and directive fields enables new applications, which are infeasible today with the use of conventional speakers, today with the use of conventional speakers are need to use high frequency signals or large emitting surfaces to achieve the same effects. The finite element software ANSYS is used to model capacitive transducers with six measurements for the widths of the triangular cavities, measuring between 0.75 and 2 mm, combined with two membrane thicknesses (12 and 20 μm). The MATLAB software is used for simulating the acoustic field generated by a transducer or by a combination of transducers, with further verification of the possibility of generating audible frequencies, by combining close ultrasonic frequencies. The transducer prototypes constructed and the electrical circuit needed for their operation are based on the values obtained from ANSYS and MATLAB (such as resonance frequency, normal displacements to the emission surface, acoustic pressure values, voltages and electrical currents and the possibility of generating audible signals from the combination of ultrasonic signals). These transducers are then excited continuously or by a burst, showing that the models used in this work are adequate for the prototype design and that it is possible to generate audible frequency signals from the combination of ultrasonic frequency signals.

Keywords: Capacitive transducer, ultrasound, finite element modeling, sound generation.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.2 JUSTIFICATIVAS.....	4
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5
1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
1.4.1 TRANSDUTORES CAPACITIVOS	5
1.4.2 CAMPO ACÚSTICO	7
1.4.3 CAMPO ACÚSTICO DIRETIVO	9
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 MODELAGEM MECÂNICA E ELÉTRICA.....	11
2.2 MODELAGEM DO CAMPO ACÚSTICO	13
2.2.1 INTERAÇÃO ENTRE DUAS FONTES DE EMISSÃO ACÚSTICA	21
2.2.2 SOLUÇÃO ANALÍTICA DA INTEGRAL DE RAYLEIGH.....	24
2.2.3 SOLUÇÃO NUMÉRICA DA INTEGRAL DE RAYLEIGH	26
2.2.4 REGIÕES DE INTERESSE PARA DETERMINAÇÃO DOS VALORES DE PRESSÃO ACÚSTICA	27
2.2.5 DIRETIVIDADE DE CAMPO ACÚSTICO.....	28
2.3 MODULAÇÃO EM AMPLITUDE - AM	30
CAPÍTULO 3: SIMULAÇÕES.....	32
3.1 SIMULAÇÕES MECÂNICAS E ELÉTRICAS.....	32
3.2 GERAÇÃO DA MALHA (TIPO E QUANTIDADE DE ELEMENTOS)	35
3.3 ANÁLISE ELETROSTÁTICA	37
3.3.1 CONVERGÊNCIA DA FORÇA ELETROSTÁTICA	38
3.4 ANÁLISE ESTÁTICA.....	40
3.4.1 RESULTADOS DAS ANÁLISES ESTÁTICAS.....	42

3.5 ANÁLISE MODAL.....	45
3.6 ANÁLISE HARMÔNICA	46
3.7 SIMULAÇÃO DO CAMPO ACÚSTICO	47
3.7.1 VERIFICAÇÃO DE CONVERGÊNCIA DOS VALORES DE PRESSÃO	50
3.7.2 SIMULAÇÕES DOS CAMPOS ACÚSTICOS COMBINADOS	54
3.7.3 SIMULAÇÕES DOS CAMPOS ACÚSTICOS CONSIDERANDO A FASE E O TEMPO.....	59
CAPÍTULO 4: VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL.....	65
4.1 PROCEDIMENTOS	65
4.1.1 DESENVOLVIMENTO DOS PROTÓTIPOS.....	65
4.1.2 DESENVOLVIMENTO DO CIRCUITO ELÉTRICO.....	67
4.1.3 DETERMINAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIAS E DOS DESLOCAMENTOS	70
4.1.4 DETERMINAÇÃO DOS VALORES DE PRESSÃO ACÚSTICA.....	72
4.1.5 DETERMINAÇÃO DA FORMAÇÃO DE UMA FREQUÊNCIA AUDÍVEL	72
CAPÍTULO 5: DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	75
5.1 ANÁLISES ELÉTRICAS E MECÂNICAS.....	75
5.2 ANÁLISES ACÚSTICAS.....	79
5.2.1 VALORES DE PRESSÃO ACÚSTICA	79
5.2.2 FORMAÇÃO DE UMA FREQUÊNCIA AUDÍVEL	83
5.2.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS CAMPOS ACÚSTICOS.....	91
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	94
6.1 CONCLUSÕES	94
6.2 TRABALHOS FUTUROS.....	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
APÊNDICE A - ROTINAS DO MATLAB PARA SIMULAÇÃO DO CAMPO ACÚSTICO	105
APÊNDICE B - CÓDIGOS APDL PARA SIMULAÇÃO DO ANSYS	114
ANEXO A - CIRCUITO AMPLIFICADOR.....	142

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1-1 - FONTE SONORA CONVENCIONAL E DIRETIVA.....	1
FIGURA 1-2 - A) TRANSDUTOR CAPACITIVO B) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA METADE DE UM TRANSDUTOR CAPACITIVO COM RANHURAS CONCÊNTRICAS E DO CIRCUITO ELÉTRICO DE EXCITAÇÃO.....	3
FIGURA 2-1 - SISTEMA DE COORDENADAS ESFÉRICO.	16
FIGURA 2-2 - ESFERA COM AS CONDIÇÕES DE CONTORNO.	19
FIGURA 2-3 - INTERAÇÃO ENTRE DUAS FONTES ACÚSTICAS.....	21
FIGURA 2-4 - GEOMETRIA UTILIZADA NA EQUAÇÃO DE DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO ACÚSTICA.	23
FIGURA 2-5 - REGIÃO DE CAMPO PRÓXIMO E CAMPO DISTANTE.	27
FIGURA 2-6 - PADRÃO DE RADIAÇÃO DE UM PISTÃO PLANO.....	29
FIGURA 2-7 - FORMAÇÃO DA ONDA MODULADA ATRAVÉS DA INTERAÇÃO DE FREQUÊNCIAS.	30
FIGURA 2-8 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE UM SINAL MODULADO.	31
FIGURA 3-1 - MODELO DA METADE DE UMA CAVIDADE DE RANHURA TRIANGULAR.	32
FIGURA 3-2 - A) TENSÕES ATUANTES NO TRANSDUTOR B) DESLOCAMENTOS DA MEMBRANA CAUSADOS PELA TENSÃO DC E AC.....	34
FIGURA 3-3 – MALHA E GEOMETRIA COM SEUS ELEMENTOS E RESPECTIVOS NÓS. REGIÃO A (MEMBRANA) E REGIÃO B (CAVIDADE). PARA $L_1/2=0,375\text{MM}$.	35
FIGURA 3-4 - MALHA E NÓS USADOS NA ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DA FORÇA ELETROSTÁTICA ATUANTE NO CENTRO E NA BORDA DA MEMBRANA, PARA $H=0,375\text{MM}$ E $L_1/2=0,375\text{MM}$.	38
FIGURA 3-5 - CONVERGÊNCIA DA FORÇA ELETROSTÁTICA (FY) NA BORDA E NO CENTRO DA MEMBRANA PARA $H=0,375\text{MM}$ E LARGURA: $L_1/2=0,375\text{MM}$.	39
FIGURA 3-6 - VALORES DA FORÇA ELÉTRICA (FY), QUE ATUAM AO LONGO DA MEMBRANA, PARA $H=0,375\text{MM}$ E $L_1/2=0,375\text{MM}$.	39
FIGURA 3-7 - CONDIÇÕES DE CONTORNO USADAS NA ANÁLISE ESTATICA.	40
FIGURA 3-8 - A) POSIÇÃO NÃO-DEFORMADA DA MEMBRANA B) POSIÇÃO DEFORMADA DA MEMBRANA.	41
FIGURA 3-9 - CONVERGÊNCIA DO DESLOCAMENTO ESTATICO PARA $L_1/2= 0,375\text{MM}$ E $E=12$ E $E=20\mu\text{M}$.	43
FIGURA 3-10 - CONVERGÊNCIA DO DESLOCAMENTO ESTATICO 1º, 2º E 3º ITERAÇÕES PARA $E=12\mu\text{M}$. PARA L DIVERSOS.	44
FIGURA 3-11 - CONVERGÊNCIA DO DESLOCAMENTO ESTATICO 1º, 2º E 3º ITERAÇÕES PARA $E=20\mu\text{M}$. PARA L DIVERSOS.	44
FIGURA 3-12 - PERFIL DO 1º MODO PARA $H=0,375\text{MM}$, $L_1/2=0,375\text{MM}$ E $E=12\mu\text{M}$.	45
FIGURA 3-13 - RESPOSTA EM FREQUÊNCIA E LARGURA DA BANDA PARA O $L_1/2=0,375\text{MM}$ E $E=12\mu\text{M}$ E FREQUÊNCIA 66,6 KHZ.	47
FIGURA 3-14 - EXEMPLO DE ELEMENTOS INFINITESIMAIS DISTRIBUÍDOS NA SUPERFÍCIE SUPERIOR DA MEMBRANA. PARA $L_1/2=0,375\text{MM}$ E $E=12\mu\text{M}$.	48
FIGURA 3-15 - CONFIGURAÇÕES USADAS NO CÁLCULO DO CAMPO ACÚSTICO A) UM TRANSDUTOR (1TDX) B) DOIS TRANSDUTORES SOBREPOSTOS (2TDX) C) QUATRO TRANSDUTORES (4TDX) D) OITO TRANSDUTORES (8TDX).....	50

FIGURA 3-16 - A) CAMPO ACÚSTICO NORMALIZADO NO PLANO XZ B) DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO ACÚSTICA AO LONGO DO EIXO ACÚSTICO (DIREÇÃO Z) C) DIRETIVIDADE D) CONVERGÊNCIA DE PRESSÃO PARA 1 TDX DE 66,6 KHZ.	51
FIGURA 3-17 - A) CAMPO ACÚSTICO NORMALIZADO NO PLANO XZ B) DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO ACÚSTICA AO LONGO DO EIXO ACÚSTICO (DIREÇÃO Z) C) DIRETIVIDADE D) CONVERGÊNCIA DE PRESSÃO PARA 1 TDX DE 60,1 KHZ.	52
FIGURA 3-18 - CONVERGÊNCIA DE PRESSÃO PARA 1 TDX DE A) 41, B) 33, C) 34 E D) 25 KHZ.	53
FIGURA 3-19 - CAMPOS ACÚSTICOS SIMULADOS E DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO ACÚSTICA PARA 66/66 KHZ A) E B) NA MESMA POSIÇÃO C) E D) $\Delta x=50\text{MM}$ E) E F) $\Delta x=100\text{MM}$	54
FIGURA 3-20 - CAMPOS ACÚSTICOS SIMULADOS E DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO ACÚSTICA PARA 66/60 KHZ A) E B) NA MESMA POSIÇÃO C) E D) $\Delta x=50\text{MM}$ E) E F) $\Delta x=100\text{MM}$	55
FIGURA 3-21 - CAMPOS ACÚSTICOS SIMULADOS E DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO ACÚSTICA PARA OS PARES A) E B) 41/33 C) E D) 34/25 E) E F) 66/34 COM $\Delta x=50\text{MM}$	56
FIGURA 3-22 - CAMPOS ACÚSTICOS SIMULADOS E DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO ACÚSTICA PARA 66/60/66/60 KHZ A) E B) COM $\Delta x_1=50\text{MM}$, $\Delta x_2=75\text{MM}$ C) E D) $\Delta x_1=100\text{MM}$, $\Delta x_2=300\text{MM}$	58
FIGURA 3-23 - CAMPOS ACÚSTICOS SIMULADOS E DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO ACÚSTICA PARA 66/60/66/60/66/60/66/60 KHZ A) E B) $\Delta x=\Delta y=50\text{MM}$ C) E D) $\Delta x=\Delta y=100\text{MM}$	59
FIGURA 3-24 - ONDAS DE 66,6KHZ E 60,1KHZ INICIANDO SUA EMISSÃO NO MESMO INSTANTE DE TEMPO E NA MESMA FASE ($B_1=0$ E $B_2=0$).	61
FIGURA 3-25 - VARIAÇÃO DA FASE PARA 2 TDX 66,6KHZ E 60,1 KHZ - NA MESMA POSIÇÃO.	62
FIGURA 3-26 - FREQUÊNCIA DA RESULTANTE.	64
FIGURA 4-1 - TRANSDUTOR CAPACITIVO CONSTRUÍDO.	65
FIGURA 4-2 - A) DESENHO ESQUEMÁTICO DO TRANSDUTOR SEM TENSÃO APLICADA NA MEMBRANA B) COM TENSÃO APLICADA NA MEMBRANA.	66
FIGURA 4-3 - CIRCUITO EQUIVALENTE.	67
FIGURA 4-4 - A) DESENHO ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO CONSTRUÍDO. B) CIRCUITO CONSTRUÍDO PARA AMPLIFICAÇÃO DO SINAL.	69
FIGURA 4-5 - BANCADA PARA VERIFICAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA E DOS DESLOCAMENTOS DA SUPERFÍCIE SUPERIOR DA MEMBRANA.	70
FIGURA 4-6 - INFLUÊNCIA DA TENSÃO VDC NAS FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIAS.	71
FIGURA 4-7 - A) MÁQUINA DE VARREDURA B) DETALHE DE MEDIÇÃO DE UM TRANSDUTOR C) DETALHE PARA MEDIÇÃO AUDÍVEL DE OITO TRANSDUTORES E UM TRANSDUTOR D) CABINE ISOLADA ACUSTICAMENTE.	74
FIGURA 5-1 - COMPORTAMENTO DAS FORÇAS F_Y NA BORDA. PARA L DIVERSOS.	75
FIGURA 5-2 - COMPORTAMENTO DAS FORÇAS F_Y NO CENTRO. PARA L DIVERSOS.	76
FIGURA 5-3 - PERFIS DE DESLOCAMENTO ESTÁTICO PARA A MEMBRANA, PARA TODAS AS MEDIDAS DE RANHURA E PARA OS DOIS VALORES DE ESPESSURA.	76
FIGURA 5-4 - FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA NO 1º MODO DE VIBRAR.	77
FIGURA 5-5 - DESLOCAMENTOS DO NÓ CENTRAL DA MEMBRANA DEVIDO À EXCITAÇÃO DO 1º MODO DE RESSONÂNCIA.	78

FIGURA 5-6 - PERFIL DOS DESLOCAMENTOS ESTÁTICOS, SIMULADOS DA MEMBRANA PARA AS CONDIÇÕES COM E SEM PRÉ-TENSÃO COM AR E SEM AR NA CAVIDADE ($L_1/2 = 0,375\text{MM}$ E $E = 12\mu\text{M}$).	78
FIGURA 5-7 - COMPARAÇÃO DAS PRESSÕES NO EIXO ACÚSTICO OBTIDOS PELOS MÉTODOS ANALÍTICO, NUMÉRICO E EXPERIMENTAL PARA FREQUÊNCIA DE 66,6 KHZ.	80
FIGURA 5-8 - COMPARAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO PERFIL DE PRESSÃO NA DIREÇÃO TRANSVERSAL PARA A FREQUÊNCIA DE 66,6 KHZ A) POSIÇÃO 50MM B) POSIÇÃO 67MM C) POSIÇÃO 100MM D) POSIÇÃO 150MM.	80
FIGURA 5-9 - CAMPOS ACÚSTICOS NORMALIZADOS A) SIMULADO E B) EXPERIMENTAL OBTIDOS PARA UM TRANSDUTOR DE 66,6 KHZ.	81
FIGURA 5-10 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ANALÍTICO, NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DA PRESSÃO NO EIXO ACÚSTICO PARA UM TRANSDUTOR DE FREQUÊNCIA DE 60,1 KHZ.	82
FIGURA 5-11 - COMPARAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO PERFIL DE PRESSÃO NA DIREÇÃO TRANSVERSAL PARA A FREQUÊNCIA DE 60,1 KHZ AS POSIÇÕES: A) 50MM B) 60MM C) 100MM E D) 150MM.	82
FIGURA 5-12 - CAMPOS ACÚSTICOS NORMALIZADOS A) SIMULADO E B) EXPERIMENTAL OBTIDOS PARA UM TRANSDUTOR DE 60,1 KHZ.	83
FIGURA 5-13 – ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DO SINAL MEDIDO NA POSIÇÃO $X=0$ E $Z=388\text{MM}$ NO EIXO DE SIMETRIA, PARA A CONFIGURAÇÃO DE OITO TRANSDUTORES.	84
FIGURA 5-14 - VARIAÇÃO NO TEMPO DA AMPLITUDE DE PRESSÃO NORMALIZADA PARA OITO TRANSDUTORES NAS POSIÇÕES $X=0\text{MM}$ E A) $Z= 50$ B) 150 C) 250 E D) 388MM.	84
FIGURA 5-15 - VARIAÇÃO NO TEMPO DA AMPLITUDE DE PRESSÃO NORMALIZADA PARA OITO TRANSDUTORES NAS POSIÇÕES $X=-5\text{MM}$ E A) $Z= 50$ B) 150 C) 250 E D) 388MM.	85
FIGURA 5-16 - VARIAÇÃO NO TEMPO DA AMPLITUDE DE PRESSÃO NORMALIZADA PARA OITO TRANSDUTORES NAS POSIÇÕES $X=-10\text{MM}$ E A) $Z= 50$ B) 150 C) 250 E D) 388MM.	86
FIGURA 5-17 - CAMPO DE PRESSÃO ACÚSTICA NORMALIZADOS NA FREQUÊNCIA DE 6,6 KHZ, FORMADO COM 8 TRANSDUTORES.	87
FIGURA 5-18 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DO SINAL MEDIDO NA POSIÇÃO $X=0$ E $Z=388\text{MM}$ DO EIXO ACÚSTICO, PARA UM TRANSDUTOR COM PORTADORA 60 KHZ E MODULANTE 6,6 KHZ.	88
FIGURA 5-19 - VARIAÇÃO NO TEMPO DA AMPLITUDE DE PRESSÃO NORMALIZADA PARA UM TRANSDUTOR COM PORTADORA DE 60,1 KHZ NAS POSIÇÕES $X=0\text{MM}$ E A) $Z= 50$ B) 150 C) 250 E D) 388MM.	88
FIGURA 5-20 - VARIAÇÃO NO TEMPO DA AMPLITUDE DE PRESSÃO NORMALIZADA PARA UM TRANSDUTOR COM PORTADORA DE 60,1 KHZ NAS POSIÇÕES $X=-5\text{MM}$ E A) $Z= 50$ B) 150 C) 250 E D) 388MM.	89
FIGURA 5-21 - VARIAÇÃO NO TEMPO DA AMPLITUDE DE PRESSÃO NORMALIZADA PARA UM TRANSDUTOR COM PORTADORA DE 60,1 KHZ NAS POSIÇÕES $X=-10\text{MM}$ E A) $Z= 50$ B) 150 C) 250 E D) 388MM.	90
FIGURA 5-22 - CAMPO DE PRESSÃO ACÚSTICA NORMALIZADO DE 6,6 KHZ FORMADO PELA MODULAÇÃO DE UM TRANSDUTOR COM PORTADORA 60 KHZ E ONDA MODULANTE DE 6,6 KHZ.	91
FIGURA 5-23 - VERIFICAÇÃO DOS VALORES DE AMPLITUDE DE PRESSÃO NOS PONTOS (X,Z). A) PARA OITO TRANSDUTORES E B) PARA UM TRANSDUTOR COM PORTADORA DE 60,1 KHZ.	92
FIGURA 5-24 - COMPARAÇÃO DE VALORES DE PRESSÃO NOS ÂNGULOS 0° , $22,5^\circ$ E $44,5^\circ$ A) OITO TRANSDUTORES B) PORTADORA DE 60,1 KHZ.	93

LISTA DE TABELAS

TABELA 3-1 - PROPRIEDADES DIELÉTRICAS E MECÂNICAS DOS MATERIAIS USADOS.	33
TABELA 3-2 - QUANTIDADE DE ELEMENTOS UTILIZADOS NAS DIVERSAS GEOMETRIAS.	36
TABELA 3-3 - VALORES ENCONTRADOS DA RAZÃO DE ASPECTO PARA AS ESPESSURAS DE 12 μM E 20 μM , UTILIZANDO A MAIOR QUANTIDADE DE ELEMENTOS C6.	37
TABELA 3-4 - VALORES DE CONVERGÊNCIA DE FORÇA ELÉTRICA. PARA $L_1/2=0,375\text{MM}$ $H=0,375\text{MM}$ E $E=12$ E 20 μM	43
TABELA 3-5 - VALORES DE CONVERGÊNCIA DE DESLOCAMENTO ESTÁTICO. PARA $L_1/2=0,375\text{MM}$ $H=0,375\text{MM}$ E $E=12$ E 20 μM	43
TABELA 3-6 - VALORES ENCONTRADOS DA PRIMEIRA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA L DIVERSOS.	45
TABELA 3-7 - VALORES DO DESLOCAMENTO DINÂMICO DO NÓ CENTRAL DEVIDO À EXCITAÇÃO NO 1º MODO DE RESSONÂNCIA.	46
TABELA 3-8 - QUANTIDADE DE ELEMENTOS DA MALHA ACÚSTICA.	51
TABELA 3-9 - CONVERGÊNCIA DOS VALORES DE PRESSÃO PARA OS TRANSDUTORES DE FREQUÊNCIA DE 66,6 KHZ E 60,1 KHZ.	53
TABELA 3-10 - VALORES DE B USADOS (DEFASAGEM DE UMA ONDA PARA A PRÓXIMA).	61
TABELA 4-1 - CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS TRANSDUTORES DE 66,6 KHZ E 60,1 KHZ.....	68
TABELA 4-2 - A) VALORES DE FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA B) VALORES DE DESLOCAMENTOS ENCONTRADOS EXPERIMENTALMENTE, CONSIDERANDO UMA RANHURA $L_1=0,75\text{MM}$ LOCALIZADA EM 3 POSIÇÕES AO LONGO DO RAIO DO TRANSDUTOR.....	71
TABELA 5-1 - MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS E VALORES SIMULADOS DAS FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA.	79
TABELA 5-2 - MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS E VALORES SIMULADOS DOS DESLOCAMENTOS.	79
TABELA 5-3 - POSIÇÕES (x,z) DO CAMPO ACÚSTICO PARA OITO TRANSDUTORES.	84
TABELA 5-4 - POSIÇÕES (x,z) DO CAMPO ACÚSTICO PARA UM TRANSDUTOR.....	88
TABELA 5-5 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DE AMPLITUDE PRESSÃO NAS POSIÇÕES $x=0$, -5, -10 MM COM $z=50$, 150, 250, 388 MM.....	92
TABELA 5-6 - VALORES DE PRESSÃO PARA OS ÂNGULOS 0° , $22,5^\circ$ E $44,5^\circ$	92

LISTA DE SÍMBOLOS

β	ângulo de fase
S_m	área da membrana
λ	comprimento de onda
K	condutividade térmica
ρ_c	densidade de carga
ρ	densidade do ar
ρ_m	densidade do material
σ	distância do centro de emissão ao elemento dS
r	distância variável em relação ao centro de emissão
r'	distância variável em relação ao elemento dS
$Q(t)$	fonte de força
ω	frequência angular de excitação
f	frequência da onda
∇T	gradiente de temperatura
$\nabla \phi$	gradiente do escalar de velocidade potencial
$\nabla \Phi$	gradiente do potencial elétrico
Z_o	impedância acústica
$d\phi(r', t)$	incremento de velocidade do pistão plano
$[C]$	matriz de amortecimento
$[C^t]$	matriz de amortecimento térmico
$[c_d]$	matriz de coeficiente dielétricos
$[K^{tm}]$	matriz de condutividade por condução
$[M]$	matriz de massa
$[K]$	matriz de rigidez
$[K_d]$	matriz de rigidez dielétrica
u_o	módulo do vetor velocidade normal ao elemento de área dS.
k	número de onda
T	período da onda
ϵ	permissividade elétrica
P	pressão
$p(r, t)_T$	pressão total considerando a fase
a	raio da esfera de emissão
a_f	raio do transdutor
γ	taxa de calor específico
$\ddot{q}$	taxa de geração térmica
t	tempo

j	unidade imaginária
δ	variação de densidade
p	variação de pressão
T'	variação de temperatura
c_o	velocidade de propagação da onda acústica
$u(r, t)_T$	velocidade total considerando a fase
$\{\ddot{U}\}$	vetor aceleração de cada nó
$\vec{E}$	vetor campo elétrico
$\vec{D}$	vetor de deslocamento elétrico
$\{U\}$	vetor de deslocamentos nos nós da malha de MEF
$\{\dot{T}\}$	vetor derivada função temperatura
$\vec{q}$	vetor fluxo de calor
$\{Q^f\}$	vetor fluxo térmico
$\vec{F}_s$	vetor força de superfícies
$\vec{B}$	vetor forças externa por unidade de massa
$\{TG\}$	vetor gradiente de temperatura
$\{F\}$	vetor que representa as forças nodais externas ao sistema
$\{T\}$	vetor temperatura
$\{\tau\}$	vetor tensão mecânica
$\vec{u}$	vetor velocidade da partícula
$\{\dot{U}\}$	vetor velocidade de cada nó

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	Amplitude Modulation
ANSYS	Analysis Systems, Inc
APDL	Ansys Parametric Design Language
DC/AC	Direct Current/Alternating Current
FFT	Fast Fourier Transform
Tdx	Transdutor
MATLAB	Matrix Laboratory

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Os alto-falantes convencionais conseguem proporcionar a todos os ouvintes localizados em um mesmo espaço, a mesma informação sonora, entretanto quando se deseja que apenas uma única pessoa ou região desse espaço receba um determinado som, sem que outras pessoas escutem ou se incomodem, esses sistemas já não conseguem a mesma eficiência; devido às características que são necessárias para se obter esse tipo de campo acústico, audível e diretivo. Esses campos acústicos podem ser aplicados em museus, restaurantes, aeroportos e etc; formando regiões sonoras independentes no mesmo espaço conforme figura 1-1.

A dificuldade em conseguir gerar esses campos acústicos está associada à relação direta que existe entre o comprimento da onda e a faixa de frequência audível de 20 Hz a 20 kHz, significando que os comprimentos de ondas audíveis variam de alguns milímetros a alguns metros. Dessa forma para emissão de forma diretiva, seriam necessários alto-falantes com dimensões da ordem de metros, o que seria inviável técnica e financeiramente.

Figura 1-1 - Fonte sonora convencional e diretiva.

Em 1957, Peter J. Westervelt (WESTERVELT, 1957) demonstrou ser possível gerar campos audíveis e diretivos utilizando pequenas superfícies emissoras. No seu trabalho é demonstrado que utilizando dois sinais senoidais com frequências ultrassônicas próximas é possível criar uma terceira frequência menor do que as outras duas. Isso ocorre devido à interação que acontece entre os sinais ultrassônicos iniciais e o meio de propagação. Apenas a nova frequência, que é formada pela diferença das duas frequências iniciais conseguirá percorrer uma distância apreciável.

Como os sinais das ondas acústicas de alta frequência são atenuados, somente o sinal de frequência menor preencherá o percurso, formando um feixe estreito e diretivo (WESTERVELT, 1963). Em 1962, Bellin (BELLIN, 1962); realizou experimentos demonstrando as equações de Westervelt, ele utilizou um tanque com 560 x 890 mm, obtendo frequência audível a uma distância de 890 mm da superfície emissora do seu transdutor.

Para a emissão no ar de frequências ultrassônicas os transdutores capacitivos são considerados mais eficientes quando comparados com outras tecnologias, por exemplo, os transdutores piezelétricos. Os transdutores capacitivos possuem como princípio de funcionamento o uso de forças eletrostáticas e possuem sua impedância acústica muito próxima à impedância do ar (BOZKURT et al., 1999; ORALKAN et al., 2002; WYGANT et al., 2008).

Os dois tipos mais utilizados desses transdutores são os CMUTs (*Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers*) e os CUTs (*capacitive ultrasonic transducers*). Geralmente, os CMUTs são compostos de um arranjo de elementos capacitivos de dimensões bem reduzidas e se utilizam de técnicas de microfabricação (fotolitografia), sendo essa sua principal desvantagem, pois é um processo de difícil fabricação e muito custoso (HALLER, KHURI-YAKUB, 1994; TANAKA et al., 2009; CRETU, 2011). Já os transdutores ultrassônicos capacitivos (CUTs), que não se utilizam de técnicas de microfabricação, são mais simples de serem construídos e, portanto, mais baratos.

Neste trabalho, optou-se pela utilização de transdutores do tipo CUT. Um transdutor CUT típico é constituído por um disco metálico com ranhuras concêntricas (base), sobre o qual se encontra uma membrana de plástico, metalizada em uma das faces, formando um capacitor, como mostra a figura 1-2a). A membrana está tensionada sobre o disco metálico, de forma que toca todos os pontos dos ápices das ranhuras. O espaço da ranhura é preenchido com ar que atua como uma mola, quando comprimido pela membrana. Um campo elétrico aplicado entre o disco metálico e a metalização da membrana faz com que a membrana se deforme elasticamente. Ao cessar o campo elétrico, a membrana tende a voltar para a posição normal devido à força de restituição resultante do tensionamento e devido à expansão do ar contido na ranhura.

Figura 1-2 - a) Transdutor capacitivo b) Representação esquemática da metade de um transdutor capacitivo com ranhuras concêntricas e do circuito elétrico de excitação.

Fonte: INSTRUMATIC, 2020

O transdutor ultrassônico capacitivo pode operar tanto em emissão como em recepção. Como emissor, aplica-se uma tensão elétrica constante de polarização em conjunto com uma alternada entre o disco metálico e a superfície metalizada da membrana conforme figura 1-2b), gerando-se um campo elétrico e o aparecimento de forças elétricas que provocaram oscilações na membrana. Como consequência dessas oscilações longitudinais da membrana ocorre variação da pressão no ar o que produz as ondas acústicas. Neste trabalho, estuda-se apenas o modelo da emissão.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de transdutores ultrassônicos capacitivos com posterior investigação da formação de frequências audíveis através da combinação das frequências ultrassônicas geradas por esses transdutores. É realizada inicialmente a modelagem pelo método de elementos finitos desses transdutores, simulando diferentes geometrias (larguras das cavidades, entre 0,75 e 2 mm) e determinando os parâmetros de projeto (frequência de ressonância e deslocamentos da membrana). Em seguida, utilizando o software MATLAB, é feita a simulação do campo acústico gerado por esses transdutores e a verificação da geração de frequências audíveis.

Posteriormente são fabricados os protótipos, que nas simulações indicaram a possibilidade de gerar frequências audíveis a partir de frequências

ultrassônicas. Esses protótipos são submetidos a verificações experimentais sendo medidas as frequências de ressonância, os deslocamentos normais à superfície de radiação, as amplitudes de pressão acústica, as diretividade dos campos e a geração de frequências audíveis.

1.2 Justificativas

Este trabalho busca utilizar transdutores capacitivos, que geram sinais ultrassônicos, para a geração de sinais audíveis em um campo diretivo. O entendimento da formação desse tipo de campo acústico possibilitaria, por exemplo, reduzir o tamanho dos alto-falantes convencionais mantendo uma maior diretividade do som, esse novos alto-falantes funcionariam com uma lanterna acústica. Isso é possível porque o comprimento de onda ultrassônica é menor quando comparado com o das ondas sonora audíveis. Assim, a diretividade desses campos possibilitaria criar novas aplicações, por exemplo, em um ambiente fechado é possível criar regiões acústicas independentes e com características sonoras diferentes, possibilitando a um ouvinte, ouvir sons diferentes conforme se movimenta entre essas regiões.

Os transdutores capacitivos já foram estudados pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, em alguns trabalhos (ADAMOWSKI, 1994; BUIOCHI, 1998), que conseguiram caracterizar os parâmetros desses transdutores, frequência de ressonância e deslocamento; utilizando o método de elementos finitos.

Assim, este trabalho pretende dar continuidade a esses estudos e trazer uma análise do campo acústico com posterior verificação experimental da possibilidade da geração de sinais audíveis e diretivos com esse tipo de transdutor. Nessa linha de pesquisa encontram-se trabalhos que conseguiram utilizar transdutores ultrassônicos capacitivos com combinações de frequências para gerar campos audíveis diretivos (WYGANT, 2009; GAN, 2012; CERVENKA, 2013). Esses pesquisadores desenvolveram protótipos que geraram frequências audíveis em campo diretivo, com uma eficiência e consumo de energia iguais aos alto-falantes convencionais.

1.3 Organização da Dissertação

No capítulo 1 são apresentados a introdução e as justificativas ao tema, assim como os objetivos e revisões bibliográficas que apresentam os resultados mais importantes, ressaltando as características principais e relevantes da literatura pesquisada para o presente trabalho.

No capítulo 2 são descritos os fundamentos teóricos necessários para a abordagem da simulação computacional e para os cálculos dos parâmetros: frequência de ressonância, deslocamento da membrana e campo de pressão acústica.

No capítulo 3 são apresentados os resultados das simulações, sendo utilizados os softwares Ansys e Matlab.

No capítulo 4 tem-se o detalhamento do método para verificação experimental e do desenvolvimento do circuito elétrico utilizado.

No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados das simulações e das verificações experimentais, sendo comparado os valores simulados com os valores experimentais.

No capítulo 6 têm-se as conclusões gerais e as propostas para trabalhos futuros.

1.4 Revisão Bibliográfica

1.4.1 Transdutores Capacitivos

A ideia de utilizar transdutores capacitivos nas mais diversas aplicações é tão antiga quanto da utilização dos primeiros transdutores piezelétricos. Os transdutores capacitivos podem ser utilizados na geração de som (MASON, 1942; BORWIK, 1988), em ensaios não destrutivos por ultrassom (GRANDIA et al., 1995; HAYWARD, 1997). Também podem ser aplicados na medição de distâncias, na detecção de obstáculos por robôs e como sensores de proximidade (FURUKAWA et al., 1993; ELFES, 1989).

Em 1915, Langevin estudando transdutores capacitivos obteve algumas estimativas numéricas que indicavam que forças de campo elétrico da ordem de um

milhão de volts por centímetro poderiam ser mantidas, fazendo aparecer forças eletrostáticas tão grandes quanto um quilo por centímetro quadrado. Isso permitia o uso dos transdutores eletrostáticos em diversas aplicações (HUNT, 1982).

Em 1950, com os avanços na tecnologia de microfabricação, houve um novo impulso na construção de transdutores capacitivos de ultrassom, havendo demonstrações de transdutores capacitivos de imersão no ar (KUHL et al., 1954) e imersão em água (CANTRELL et al., 1979). Os transdutores capacitivos fabricados com essas novas tecnologias possuíam um desempenho melhor se comparados aos transdutores capacitivos construídos por Langevin.

Em 1980, os dispositivos CUTs e CMUTs continuaram sendo estudados e melhorados devido aos novos avanços da eletrônica e da microfabricação (HOHM; HESS, 1989; SUZUKI; HIGUCHI; TANIGAWA, 1989; RAFIQ; WYKES, 1991). Mas apesar de alguns avanços nessa época, esses dispositivos não eram bem caracterizados possuindo um desempenho inferior aos transdutores piezelétricos.

Em 1993, pesquisadores da universidade de Stanford nos Estados Unidos da América aperfeiçoaram as técnicas de microfabricação possibilitando reduzir o espaçamento entre os eletrodos, melhorando a eficiência dos transdutores capacitivos quando da sua emissão no ar. Esses pesquisadores conseguiram aumentar a faixa de frequência de resposta desses transdutores e reduziram as perdas de emissão conseguindo aproximar a eficiência desses transdutores com os transdutores piezelétricos (HALLER; KHURI-YAKUB, 1994).

No ano 2000, pesquisadores Taiwaneses introduziram o conceito de P-CMUT (*Polymer – Capacitive micromachined Ultrasound Transducer*). Os P-CMUTs usam como membrana materiais poliméricos que são mais flexíveis que as membranas de silício (WEI; CHANG et al, 2006). Essa maior flexibilidade permite que uma menor tensão elétrica, para polarizar o dispositivo, seja utilizada. O processo de fabricação do P-CMUT é extremamente complexo e ainda é um dos empecilhos para seu uso. Porém, algumas novas técnicas vêm surgindo, sendo que uma das mais promissoras é a que usa o *wafer-bonding* (colagem) (PARK et al., 2011).

Para cada aplicação dos transdutores capacitivos é necessário se ter um controle sobre os parâmetros de projeto, como frequência de ressonância e deslocamentos; que efetivamente influenciam sua operação (KINO, 1987). No início dos estudos dos transdutores capacitivos se propunham modelos analíticos de corda

vibrante (KINSLER, 1982). Esses modelos tratavam apenas da frequência de ressonância, desconsiderando a influência do ar dentro das ranhuras, que atua como uma mola resistente ao movimento da membrana. Posteriormente, surgiram trabalhos que levavam em conta o efeito da camada de ar dentro do transdutor (RAFIQ, 1991; HIETANEN et al., 1992; MATTILA et al., 1995). Entretanto, esses modelos também não explicavam totalmente o funcionamento do transdutor, já que desprezavam os efeitos da rigidez da membrana pré-tensionada e da geometria da ranhura, a qual interfere na distribuição da força eletrostática atuante na membrana. Assim, para obter modelos mais precisos dos transdutores, utiliza-se o método de elementos finitos (BATHE, 1982), que permite levar em conta a geometria do perfil da ranhura do transdutor, o ar presente em suas cavidades e a pré-tensão na membrana (ADAMOWSKI et al., 1994; BUIOCHI, 1998; ZHANG, 2013).

1.4.2 Campo Acústico

O campo acústico é uma distribuição de valores de pressão produzidos por uma onda acústica. A onda acústica pode ser definida como sendo uma onda mecânica que utiliza um meio material para se propagar com uma determinada velocidade. As ondas acústicas se movimentam de duas formas que as definem como ondas longitudinais e ondas transversais. As ondas longitudinais são aquelas que têm sua propagação no mesmo sentido da oscilação das partículas e as ondas transversais são aquelas em que as partículas oscilam em sentido perpendicular ao de propagação (KINSLER et al., 1982).

As primeiras soluções matemáticas que determinavam os valores de pressão de um campo acústico foram feitas por Lord Rayleigh em 1945, que desenvolveu equações que descrevem, na forma de integral, o fenômeno de propagação de ondas acústicas (RAYLEIGH, 1945).

A partir dessas equações, em 1960, Freedman apresentou um trabalho mostrando o campo acústico gerado por transdutores retangulares que produziam uma melhor aproximação de uma onda plana no campo próximo (FREEDMAN, 1960).

Em 1969, Tupholme apresentou uma solução para o cálculo de pulsos de pressão produzidos por um pistão móvel fixado a um anteparo rígido. Ele desenvolveu uma solução analítica para um pistão circular (TUPHOLME, 1969).

Em 1971, Zemanek desenvolveu um método numérico para o cálculo do campo acústico de um transdutor, de geometria circular, considerando uniforme o movimento da face do pistão, e mostrou a distância em que ocorre a transição entre o campo próximo e o campo distante (ZEMANEK, 1971).

No mesmo ano, em 1971, Stepanishen, desenvolveu um dos modelos mais utilizados até hoje, o método da resposta impulsiva, permitindo obter o potencial de velocidade e o campo acústico dependentes do tempo, em um ponto do espaço, resultantes do movimento impulsivo do pistão. Esse modelo é baseado na integral de Rayleigh e é adaptável a qualquer geometria de transdutor (STEPANISHEN, 1971).

Em 1974, Robinson apresentou uma solução exata, utilizando o método de resposta impulsiva do campo acústico para qualquer ponto do espaço para transdutores circulares. É mostrado que a maior parte da energia está confinada dentro do feixe com o mesmo diâmetro do transdutor e diminui monotonicamente fora desta região (ROBINSON et al, 1974).

Em 1981, Harris apresentou um trabalho que foi uma revisão dos modelos matemáticos que descreviam o campo acústico gerado pelo movimento de um pistão plano circundado por um refletor rígido infinito. Nesse trabalho, foram descritas a integral de Rayleigh, a integral de King, a solução de Schoch e a integral da convolução (HARRIS, 1981).

Em 1989, Piwakowski e Delannoy descreveram o método da representação discreta para o cálculo do campo acústico para qualquer formato de pistão e velocidade de excitação. Dividindo a superfície do transdutor em pequenos elementos de área, a pressão total em um ponto do campo é calculada pela soma das contribuições individuais de cada elemento emissor do transdutor. A precisão do cálculo depende apenas do número de elementos de área utilizado (PIWAKOWSKI; DELANNOY, 1989).

Em 1992, Jensen apresentou um método para o cálculo do campo acústico gerado por transdutores de qualquer formato e apodizados, dividindo-se a superfície do transdutor em pequenos retângulos e somando suas respostas. Nesse método, pode-se controlar qualquer excitação do transdutor e a solução da onda contínua pode ser encontrada fazendo-se a transformada de Fourier (JENSEN; SVENDSEN, 1992).

1.4.3 Campo Acústico Diretivo

A diretividade de um campo acústico está relacionada com o comprimento de onda que será emitido e as dimensões do emissor. Quando o emissor possui um tamanho muito maior que o tamanho do comprimento de onda a ser emitido, é obtido um campo mais diretivo. Em 1856, Helmholtz introduz o conceito de geração de tons adicionais através da combinação de dois ou mais tons (HELMHOLTZ, 1856), mostrando que um par de tons gerados podem gerar um par extra de tons no ar, com frequências correspondentes à soma e à diferença das frequências dos tons iniciais.

Entre 1950 e 1960 os estudos das interações de frequências para formação de campos diretivos eram financiados pela Marinha dos Estados Unidos (BERKTAY, 1965; HAMILTON et al., 1985) e pela Marinha da extinta URSS (BAKHVALOV et al., 1978; BAKHVALOV et al., 1987), que buscavam desenvolver teorias e formalismos matemáticos relacionados com a propagação de ondas acústicas a longas distâncias, tendo como principal objeto o aprimoramento dos sonares. Em 1957, Peter J. Westervelt propôs uma equação que calculava os valores de pressão produzidos pelo campo formado da interação de duas frequências com bastante precisão (WESTERVELT, 1957).

Em 1962, Bellin e Beyer realizaram verificações experimentais validando as equações Westervelt e demonstrando a possibilidade de gerar campos acústicos diretivos com frequências que eram menores que as frequências usadas, tendo o ar como meio de propagação (BELLIN et al., 1962).

Em 1975, Bennett e Blackstock realizaram um estudo rigoroso para confirmar a presença desse efeito no ar. Eles não tinham a intenção de reproduzir som audível para uso em aplicações, eles usavam frequências de 18,6 kHz e 23,6 kHz, que não eram agradáveis a ninguém que estivesse próximo desses sinais, mas mesmo assim foram capazes de mostrar que os efeitos esperados, de fato, existiam no ar, e era possível formar uma frequência menor que as outras duas usadas inicialmente (BENNETT et al., 1975).

Entre 1989 e 1950 os pesquisadores (YONEYAMA et al., 1983; KAMAKURA; IKEGAYA, 1984; AOKI et al., 1994; BLACKSTOCK, 1997) utilizando dessa nova tecnologia, dedicaram a tentar reproduzir som em todas as frequências

audíveis. Surgia um novo tipo de alto-falante, que produziria frequências audíveis, diretivas. Entretanto havia problemas como a distorção sonora, exposição por longo período das pessoas ao ultrassom além da necessidade das perdas por aquecimento.

Na década de 90 e seguintes, Pompei (POMPEI, 1998; POMPEI, 2002) e Wygant (WYGANT, 2008; WYGANT, 2009) conseguiram construir protótipos, que geram som audível e bastante diretivo sem os problemas anteriores. Esses protótipos utilizam pouca energia e produzem um som com baixa distorção, estando nos mesmos níveis de eficiência de um alto-falante convencional.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Modelagem Mecânica e Elétrica

Foi utilizado para as simulações mecânicas e elétricas o método dos elementos finitos (MEF) por meio do software ANSYS. O MEF é um procedimento numérico que permite obter uma solução aproximada de problemas envolvendo geometrias complexas. O MEF se utiliza da divisão da estrutura em áreas discretas de menor complexidade, chamadas de elementos. Os elementos são compostos por nós, que conectam elementos vizinhos formando uma malha de elementos. Para cada elemento é realizado o balanço de forças onde é possível determinar um conjunto de equações. As equações de cada elemento são unidas formando um sistema global de equações. A solução dessas equações para a variável de interesse é determinada nos nós, sendo que valores que não estão nos nós terão que ser interpolados por equações lineares ou não-lineares a depender dos elementos escolhidos (BATHE, 1982).

Os fenômenos físicos que descrevem o funcionamento do transdutor capacitivo são representados pelas equações diferenciais 2.1 (equações mecânicas) e 2.2 (equações elétricas). Os fenômenos mecânicos e elétricos estão acoplados pela força eletrostática conforme a formulação matricial 2.3a e b que são encontradas ao aplicar o princípio variacional às equações 2.1 e 2.2. Não se consegue representar o princípio de funcionamento do transdutor capacitivo com uma única equação, sendo necessário realizar a simulação por etapas (BUIOCHI, 1998).

$$\rho_m \frac{\partial^2 \{U\}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \{\tau\} \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot ([c_d] \nabla \Phi) = -\rho_c \quad (2.2)$$

$$[K_d]\{\Phi\} = \{Q\} \quad (2.3a)$$

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} \quad (2.3b)$$

onde ρ_m é a densidade do meio, ρ_c é a densidade de carga elétrica, $\{\tau\}$ é o vetor tensão mecânica, $[c_d]$ é a matriz de coeficiente dielétricos, $\nabla \Phi$ é o gradiente do potencial

elétrico, ρ_c é a densidade de carga elétrica, $[K_d]$ é a matriz de rigidez dielétrica, $\{\Phi\}$ é o vetor potencial elétrico dos nós, $\{Q\}$ é o vetor carga elétrica dos nós, $[M]$ é a matriz de massa, $\{\ddot{U}\}$ é o vetor aceleração de cada nó, $[C]$ é a matriz de amortecimento, $\{\dot{U}\}$ é o vetor velocidade de cada nó, $[K]$ é a matriz de rigidez, $\{U\}$ é o vetor de deslocamentos de cada nó e $\{F\}$ é o vetor das forças nodais externa ao sistema.

Inicialmente é feita a análise elétrica determinando a distribuição da força eletrostática. Essa distribuição será usada nas análises mecânicas: estática, modal e harmônica. Nas análises mecânicas o MEF resolve a equação matricial representada por 2.3b. Nas análises elétricas é utilizada uma analogia com a análise térmica devido à similaridade entre as equações diferenciais dos fenômenos elétricos e térmicos. O estudo térmico é bastante conhecido, utilizando elementos que permitem encontrar os valores que não estão nos nós por interpolações lineares. Assim, a partir das equações diferenciais da lei de Gauss para fluxo do campo elétrico, equação 2.4 e da lei de geração interna de calor definida pela termodinâmica, equação 2.5 é possível identificar a analogia existente entre os dois fenômenos, elétrico e térmico.

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \Phi) = \rho_c \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot (K \nabla T) = \ddot{q} \quad (2.5)$$

onde ϵ é a permissividade elétrica, $\nabla \Phi$ é o gradiente do potencial elétrico, ρ_c é a densidade de carga, K é a condutividade térmica, ∇T é o gradiente de temperatura e $\ddot{q}$ é a taxa de geração térmica. Além disso, há uma relação de semelhança entre o deslocamento elétrico $\vec{D}$, que atua na membrana, e o vetor fluxo de calor $\vec{q}$, definidos, respectivamente, pelas equações 2.6 e 2.7.

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (2.6)$$

$$\vec{q} = -K \nabla T \quad (2.7)$$

onde $\vec{E} = \nabla \Phi$ é a definição de campo elétrico e a equação 2.7 a forma diferencial da lei de Fourier.

Assim, o sistema de equações resolvido pelo MEF para se determinar as variáveis térmicas é descrito na equação 2.8 em notação matricial, representado pelo fenômeno térmico, conforme mostrado no manual do Ansys (ANSYS, 1994).

$$[C^t]\{\dot{T}\} + [K^{tm}]\{T\} = \{Q^f\} \quad (2.8)$$

onde $[C^t]$ é a matriz de amortecimento térmico, $\{\dot{T}\} = \left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\}$ é o vetor derivada da função temperatura $T = T(x, y, z, t)$, $[K^{tm}]$ é a matriz de condutividade por condução, $\{T\}$ é o vetor temperatura e $\{Q^f\} = \vec{q}$ que é o vetor fluxo térmico.

Assim, a partir dos valores obtidos com as equações térmicas, são calculados os valores elétricos de interesse. Sendo o vetor campo elétrico definido por $\vec{E} \equiv -\nabla T$ e deslocamento elétrico $\vec{D} \equiv \vec{q}$, cujos resultados permitem determinar o vetor força elétrica $\vec{F}_{ele}$ atuando na membrana, como mostra a equação 2.9.

$$\vec{F}_{ele} = D_y S_m \vec{E} \quad (2.9)$$

onde D_y é a componente do vetor deslocamento elétrico na direção y (perpendicular à membrana) e S_m é a área da membrana. A força elétrica é calcula em cada nó da discretização da superfície superior da membrana no modelo usado no MEF.

2.2 Modelagem do Campo Acústico

O campo acústico é o campo de pressão formado devido à movimentação oscilante das partículas presentes no meio de propagação. Neste trabalho a determinação do campo baseia-se na integral de Rayleigh. Nessa modelagem considera-se que cada elemento de emissão da superfície superior do transdutor possuirá deslocamentos definidos pelas características eletromecânicas entre a membrana e as ranhuras dos transdutores. Esses deslocamentos são nulos nas bordas e maiores nos centros das ranhuras. Esse comportamento é diferente do comportamento de um pistão plano rígido, que pressupõe deslocamentos iguais na superfície emissora.

Assim, conforme a superfície superior da membrana do transdutor se movimenta, as partículas mais próximas à essa superfície irão se movimentar de forma oscilante, transmitindo movimento de avanço e deslocando as partículas vizinhas provocando uma variação de pressão na frente do transdutor. Para se determinar os valores de pressão do campo acústico é necessário solucionar a integral de Rayleigh. Existem dois métodos para isso: o método analítico e o numérico. O método analítico consiste em solucionar a integral utilizando técnicas matemáticas. Já o método numérico consiste na discretização do domínio formado pelos elementos de emissão, tornando o que era contínuo em discreto. Essa divisão da superfície emissora em pontos ou elementos é uma aproximação que ajuda na resolução de problemas. O método numérico implica que o conjunto do comportamento unitário de cada elemento de emissão determina completamente o comportamento de todo o domínio (PIWAKOWSKI; DELANNOY, 1989).

O modelo inicia-se por determinar equação da onda acústica. Na determinação dessa equação é considerado que o meio onde a onda acústica irá se propagar é homogêneo, está em repouso, é um gás ideal e que não exista transferência líquida de calor da região onde a onda está propagando e as regiões vizinhas. O meio deve obedecer a lei de tensão e deformação (Lei de Hooke). Não será considerado o efeito da força de viscosidade e da força externa. Sabe-se que a velocidade do som no ar é definida pela equação 2.10 (DOUGLAS, 1981).

A equação da onda acústica é determinada utilizando a equação da continuidade 2.11, a equação do momento 2.12 e a equação do estado 2.13.

$$c_o^2 = \frac{\gamma P_o}{\rho_o} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.11)$$

$$\rho_o \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \nabla p = 0 \quad (2.12)$$

$$\rho = \rho_o + \frac{1}{c_o^2} p \quad (2.13)$$

onde c_0 é a velocidade do som no ar, γ é taxa de calor específico, P_0 é a pressão ambiente sendo $P = P_0 + p$, ρ_0 é a densidade do ar, ρ é a densidade do meio de propagação sendo $\rho = \rho_0 + \Delta\rho$, $\Delta\rho$ é a variação da densidade, $\vec{u}$ é o vetor velocidade das partículas no meio, sendo $P = P_0 + p$.

Para encontrar a equação da onda acústica é necessário realizar algumas substituições entre as equações da continuidade, do momento e a equação de estado. Substituindo a equação 2.13 na equação 2.11, obtém-se a equação 2.14.

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 \nabla \vec{u} = 0 \quad (2.14)$$

Multiplicando pelo gradiente a equação 2.14 obtém-se a equação 2.15.

$$\frac{1}{c_0^2} \nabla \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right) + \rho_0 \nabla^2 \vec{u} = 0 \quad (2.15)$$

Derivando em relação ao tempo a equação 2.12 obtém-se a equação 2.16.

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} + \frac{\partial \nabla p}{\partial t} = 0 \quad (2.16)$$

Isolando $\nabla \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)$ em ambas as equações 2.15 e 2.16 e unindo ambas as equações obtém-se a equação da onda acústica 2.17, que é a forma clássica da equação da onda acústica.

$$\frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \vec{u} = 0 \quad (2.17)$$

O fato de a velocidade da partícula ser um vetor ($\vec{u}$), causa dificuldades da resolução das equações e na definição dos parâmetros acústicos. A velocidade $\vec{u}$ pode também ser representada como o gradiente do escalar velocidade potencial ϕ , sendo $\phi(x,y,z,t)$, conforme equação 2.18.

$$\vec{u} = \nabla\phi \quad (2.18)$$

Substituindo o valor da equação 2.18 na equação 2.17 obtém-se a equação 2.19. que é a equação da onda acústica escrita em função do gradiente do escalar da velocidade potencial ϕ .

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - c_o^2 \nabla^2 \phi = 0 \quad (2.19)$$

Substituindo $\vec{u} = \nabla\phi$ na equação do momento 2.12 e dividindo pelo gradiente, obtém-se a equação 2.20.

$$p = -\rho_o \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.20)$$

A forma utilizada da equação acústica vai depender do sistema de coordenadas utilizado: cartesiano, cilíndrico ou esférico. Será utilizado o sistema esférico neste trabalho, conforme figura 2-1.

Figura 2-1 - Sistema de coordenadas esférico.

Fonte: DOUGLAS, 1981

É considerado que $x=r\sin\theta\cos\psi$, $y=r\sin\theta\sin\psi$ e $z=r\cos\theta$. O laplaciano será representado pela equação 2.21.

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 \frac{\partial \phi(r, \theta, \psi, t)}{\partial r} \right\} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \sin \theta \frac{\partial \phi(r, \theta, \psi, t)}{\partial \theta} \right\} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \phi(r, \theta, \psi, t)}{\partial \psi^2} \quad (2.21)$$

O gradiente será representado pela equação 2.22.

$$\nabla \phi = \frac{\partial \phi(r, \theta, \psi, t)}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi(r, \theta, \psi, t)}{\partial \theta} \vec{e}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \phi(r, \theta, \psi, t)}{\partial \psi} \vec{e}_\psi \quad (2.22)$$

Portanto, as componentes da velocidade da partícula serão representadas pelas equações 2.23, 2.24 e 2.25.

$$u_r = \frac{\partial \phi(r, \theta, \psi, t)}{\partial r} \quad (2.23)$$

$$u_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi(r, \theta, \psi, t)}{\partial \theta} \quad (2.24)$$

$$u_\psi = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \phi(r, \theta, \psi, t)}{\partial \psi} \quad (2.25)$$

A equação da onda acústica será expressa no sistema de coordenadas esféricas dado pela equação 2.26.

$$\frac{\partial^2 \phi(r, \theta, \psi, t)}{\partial t^2} - c_0^2 \left\{ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 \frac{\partial \phi(r, \theta, \psi, t)}{\partial r} \right\} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \sin \theta \frac{\partial \phi(r, \theta, \psi, t)}{\partial \theta} \right\} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \phi(r, \theta, \psi, t)}{\partial \psi^2} \right\} = 0 \quad (2.26)$$

É utilizada a equação da onda no sistema de coordenadas esférico, por ser mais simples de encontrar a solução da equação da onda acústica. A primeira solução será considerar apenas o parâmetro radial r (distância do centro da esfera até um ponto P) e o tempo t , e será independente dos ângulos θ e ψ . Essa é a forma mais simples de solução, dessa forma a equação 2.26 se torna a equação 2.27.

$$\frac{\partial^2 \phi(r, t)}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 \frac{\partial \phi(r, t)}{\partial r} \right\} = 0 \quad (2.27)$$

Se o movimento é harmônico, pode-se considerar a relação representada pela equação 2.28.

$$\phi(r, t) = \phi(r)e^{j\omega t} \quad (2.28)$$

Substituindo a equação 2.28 na equação 2.27 obtém-se a equação 2.29.

$$\frac{\partial^2 \{r \phi(r)e^{j\omega t}\}}{\partial r^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \{r \phi(r)e^{j\omega t}\}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.29)$$

Rearranjando a equação 2.29 obtém-se a equação 2.30.

$$\frac{\partial^2 \{r \phi(r)\}}{\partial r^2} + k^2 \{r \phi(r)\} = 0 \quad (2.30)$$

onde k é o número igual a: $\frac{\omega}{c_0}$

A solução da equação 2.30 é a equação 2.31.

$$\phi(r, t) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} + \frac{B}{r} e^{j(\omega t + kr)} \quad (2.31)$$

onde:

$e^{j(\omega t - kr)}$: representa a onda que sai da fonte pontual acústica.

$e^{j(\omega t + kr)}$: representa a onda que chega na fonte pontual acústica.

Para este trabalho será considerada apenas a onda que sai da fonte acústica. Portanto, a equação 2.31 será transformada na equação 2.32.

$$\phi(r, t) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (2.32)$$

O parâmetro A é determinada pelas condições de contorno. Adota-se que a velocidade de qualquer ponto emissor é normal a superfície da esfera, ou seja,

está na direção de r , sendo definida como $u_{ra} = u_a e^{j\omega t}$, onde $u_a \ll c_0$, e u_a é a velocidade na superfície, t é o tempo, c_0 é a velocidade de propagação acústica no meio e a é o raio da esfera, conforme figura 2-2.

Figura 2-2 - Esfera com as condições de contorno.

Fonte: DOUGLAS, 1981

O valor de u_{ra} é encontrado considerando a equação 2.33.

$$u_{ra} = \frac{\partial \phi(r,t)}{\partial r} = u_a e^{j\omega t} \quad (2.33)$$

Substituindo a equação 2.30 na equação 2.33 obtém-se a equação 2.34.

$$\frac{\partial \left\{ \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \right\}}{\partial r} = u_a e^{j\omega t} \quad (2.34)$$

Calculando a derivada da equação 2.34 e fazendo $r=a$, obtém-se a equação 2.35.

$$A = -u_a \left(\frac{a^2}{1 + jka} \right) e^{jka} \quad (2.35)$$

Com o valor de A , a equação 2.32 pode ser reescrita na equação 2.36.

$$\phi(r, t) = -u_a \left(\frac{a^2}{1+jka} \right) \frac{1}{r} e^{j\{\omega t - k(r-a)\}} \quad (2.36)$$

A fonte de força $Q(t)$, de emissão é definida como a área da superfície da esfera multiplicada pela velocidade da superfície conforme equação 2.37.

$$Q(t) = 4\pi a^2 u_a e^{j\omega t} \quad (2.37)$$

Portanto, a equação 2.36 pode ser escrita em função da potência da fonte, utilizando a equação 2.37, obtendo a equação 2.38.

$$\phi(r, t) = -\frac{Q(t)}{4\pi} \left(\frac{1}{1+jka} \right) \frac{1}{r} e^{-jk(r-a)} \quad (2.38)$$

Substituindo a equação 2.38 nas equações 2.20 e 2.23 e derivando, obtém-se, respectivamente, as equações 2.39 e 2.40.

$$p(r, t) = -jkz_o \phi(r, t) \quad (2.39)$$

$$u(r, t) = -\frac{1+jkr}{r} \phi(r, t) \quad (2.40)$$

onde $z_o = \rho_o c_o$ é chamado de impedância acústica característica do meio, substituindo a equação 2.38 na equação 2.39 e 2.40, e considerando $a=0$ (fonte pontual), obtém-se as equações 2.41 e 2.42 que são o valores de pressão e velocidade considerando uma fonte pontual.

$$p(r, t) = jkz_o \frac{Q(t)}{4\pi} \frac{1}{r} e^{-jkr} \quad (2.41)$$

$$u(r, t) = (1 + jkr) \frac{Q(t)}{4\pi} \frac{1}{r^2} e^{-jkr} \quad (2.42)$$

2.2.1 Interação entre Duas Fontes de Emissão Acústica

Considerando a interação de duas fontes pontuais conforme figura 2-3, é possível determinar como será feita a soma da participação de cada fonte acústica no espaço.

Figura 2-3 - Interação entre duas fontes acústicas.

Fonte: DOUGLAS, 1981

Considerando duas fontes pontuais separadas de uma distância de h , do eixo acústico de simetria. O valor do potencial de velocidade total, $\phi(r, t)_T$ no ponto P será a soma dos potenciais de velocidades representado pela equação 2.43

$$\phi(r, t)_T = \phi(r_1, t)_1 + \phi(r_2, t)_2 \quad (2.43)$$

Considerando a lei dos cossenos aplicado na figura 2-3 tem-se que $r_1 = (r^2 + h^2 - 2hr \cos\theta)^{1/2}$ e $r_2 = (r^2 + h^2 + 2hr \cos\theta)^{1/2}$ e considerando que a interferência ocorre no campo distante onde $r \gg h$, obtém $r_1 = r - h \cos\theta$ e $r_2 = r + h \cos\theta$. Substituindo r_1 e r_2 e a equação 2.38 na equação 2.43, com $a = 0$, obtém-se a equação 2.44.

$$\phi(r, t)_T = -\frac{Q(t)_1}{4\pi r_1} e^{-jkr_1} - \frac{Q(t)_2}{4\pi r_2} e^{-jkr_2} \quad (2.44)$$

Além disso, como r_1 , r_2 e r são valores muito grande, pode-se supor que $r_1=r_2=r$, alterando os denominadores da equação. Passando para forma exponencial complexa a equação 2.44, obtém-se equação 2.45.

$$\phi(r, t)_T = -\frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \{Q(t)_1 e^{jkh\cos\theta} + Q(t)_2 e^{-jkh\cos\theta}\} \quad (2.45)$$

Como as fontes de emissão são pontos pode-se representar seus valores de potência acústica como sendo $Q(t)_1 = Q_1 e^{j(\omega t + \beta/2)}$ e $Q(t)_2 = Q_2 e^{j(\omega t - \beta/2)}$, sendo β o ângulo de fase que é a diferença, expressa em radianos, entre dois sinais que são observados na mesma referência e no mesmo instante no tempo.

Substituindo os valores de potência acústica na equação 2.45 e considerando a relação 2.46, obtém-se a equação 2.47.

$$Q_0 = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (2.46)$$

$$\phi(r, t)_T = -\frac{Q_1 e^{j(\omega t - kr)}}{4\pi r} \{e^{j(kh\cos\theta + \beta/2)} + Q_0 e^{-j(kh\cos\theta + \beta/2)}\} \quad (2.47)$$

Considerando a relação 2.48 na equação 2.47 tem-se a equação 2.49.

$$e^{\pm j(kh\cos\theta + \beta/2)} = \cos(kh\cos\theta + \beta/2) \pm j\sin(kh\cos\theta + \beta/2) \quad (2.48)$$

$$\phi(r, t)_T = -\frac{Q_1 e^{j(\omega t - kr)}}{4\pi r} \{(1 + Q_0) \cos(kh\cos\theta + \beta/2) + j(1 - Q_0) \sin(kh\cos\theta + \beta/2)\} \quad (2.49)$$

No caso do modelo adotado neste trabalho os elementos estão emitindo em fase, portanto, $\beta=0$ e ao mesmo tempo. As fontes emissoras são pequenos elementos de área dS , podendo considerar que a distância entre eles $h=0$, e que todas as fontes de emissão possuem a mesma potência acústica $Q_0=1$. Substituindo essas condições na equação 2.49 e considerando o elemento diferencial dS como emissor, é possível encontrar o incremento de potencial de velocidade $d\phi(r', t)$, representado

pela equação 2.50; que é a participação que cada elemento dS contribui em um ponto P , localizado a uma distância r' , conforme figura 2-4.

$$d\phi(r', t) = -\frac{dQ e^{j(\omega t - kr')}}{2\pi r'} \quad (2.50)$$

O incremento que cada elemento contribui é dado pela equação 2.51.

$$dQ = \vec{u}_{0,i} \cdot d\vec{S} \quad (2.51)$$

Figura 2-4 - Geometria utilizada na equação de determinação da pressão acústica.

Fonte: Adaptado de DOUGLAS, 1981

Na equação 2.51 tem-se que $u_{0,i}$ é o valor do módulo do vetor velocidade normal ao elemento de área dS . Substituindo a equação 2.51, que também pode ser escrita como $dQ = u_{0,i} dS$, na equação 2.50, obtém a equação 2.52.

$$d\phi(r', t) = - \frac{u_{0,i} dS e^{j(\omega t - kr')}}{2\pi r'} \quad (2.52)$$

Substituindo a equação 2.52 na equação 2.39 encontra-se o incremento de pressão em cada ponto do meio, conforme equação 2.53.

$$dp(r', t) = j \frac{kz_0 u_{0,i} dS}{2\pi r'} e^{j(\omega t - kr')} \quad (2.53)$$

Para encontrar o valor de pressão em um P localizado a uma distância r é necessário realizar o somatório ao longo de toda a superfície S das contribuições de pressão $dp(r', t)$ no ponto P localizado a distância r', conforme equação 2.54. Essa equação é conhecida como a integral de Rayleigh.

$$p(r, t) = j \frac{kz_0 e^{j\omega t}}{2\pi} \int_S \frac{u_{0,i} e^{-jkr'}}{r'} dS \quad (2.54)$$

A posição de um elemento dS localizado na superfície do transdutor é dado pela equação 2.55 e sua velocidade por sua derivada, dada pela equação 2.56.

$$S(\omega, t) = d_i \sin(\omega t) \quad (2.55)$$

$$u_{o,i} = \frac{\partial S(\omega, t)}{\partial t} = \omega d_i \cos(\omega t) \quad (2.56)$$

A solução da equação 2.54, pode ser encontrada de forma analítica utilizando formalismos matemáticos ou de forma numérica utilizando aproximações. A solução analítica será apresentada apenas para valores de pressão localizados no eixo z (eixo acústico) e a solução numérica irá permitir determinar os valores de pressão para qualquer ponto no espaço à frente do transdutor da figura 2.4.

2.2.2 Solução Analítica da Integral de Rayleigh

A solução analítica da equação 2.54, é encontrada usando a relação $c^2 = r'^2 - b^2$ e a lei dos cossenos, considerando a figura 2-4, o qual é possível obter a equação 2.57.

$$c^2 = \sigma^2 + d^2 - 2\sigma d \cos\psi \quad (2.57)$$

Eliminando c da equação 2.57 por substituição e dado as relações $b=r\cos\theta$ e $d=r\sin\theta$, encontra-se a equação 2.58.

$$r' = (r^2 + \sigma^2 - 2\sigma r \sin\theta \cos\psi)^{1/2} \quad (2.58)$$

O valor incremental da área da superfície é dado por dS . Sendo que o valor do arco da circunferência é determinado conforme equação 2.59.

$$dS = \sigma d\sigma d\psi \quad (2.59)$$

Sendo σ igual a distância do centro de emissão ao elemento dS e substituindo a equação 2.58 e 2.59 na equação 2.54, obtém-se a equação analítica para o cálculo de pressão, equação 2.60.

$$p(r, t) = j \frac{kz_0 u_{0,i} e^{j\omega t}}{2\pi} \int_0^a \int_0^{2\pi} \frac{\sigma e^{-jk(r^2 + \sigma^2 - 2\sigma r \sin\theta \cos\psi)^{1/2}}}{(r^2 + \sigma^2 - 2\sigma r \sin\theta \cos\psi)^{1/2}} d\psi d\sigma \quad (2.60)$$

Considerando apenas pontos localizados no eixo z (eixo acústico), portanto $\theta=0$, a equação 2.60, pode ser reescrita conforme equação 2.61.

$$p(r, t) = j \frac{kz_0 u_{0,i} e^{j\omega t}}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^a \frac{e^{-jk(r^2 + \sigma^2)^{1/2}}}{(r^2 + \sigma^2)^{1/2}} \sigma d\sigma d\psi \quad (2.61)$$

Nesta nova equação, a determinação dos valores de pressão também não é mais dependente de ψ , podendo ser reescrita conforme equação 2.62.

$$p(r, t) = j k z_0 u_{0,i} e^{j\omega t} \int_0^a \frac{e^{-jk(r^2 + \sigma^2)^{1/2}}}{(r^2 + \sigma^2)^{1/2}} \sigma d\sigma \quad (2.62)$$

Sendo $r' = (r^2 + \sigma^2)^{1/2}$ e $\sigma d\sigma = r' dr'$, e substituindo na equação 2.62, obtém-se a equação 2.63.

$$p(r, t) = jkz_0 u_{0,i} e^{j\omega t} \int_r^{r_1} e^{-jkr'} dr' \quad (2.63)$$

Aplicando os limites r e r_1 , sendo $r_1 = (r^2 + a^2)^{1/2}$ na equação 2.63 encontra-se a solução analítica no eixo acústico (eixo z), equação 2.64. Sendo $P_o = z_0 u_{0,i}$.

$$p(r, t) = P_o \{e^{j(\omega t - kr)} - e^{j(\omega t - kr_1)}\} \quad (2.64)$$

2.2.3 Solução Numérica da Integral de Rayleigh

Solução numérica da equação 2.54, que determina os valores pressão para todo o campo consiste em transformar a integral da equação 2.54 em um somatório, conforme equações 2.65. Sendo $z_0 = \rho_0 c_0$, $k = \omega / c_0$, $\omega = 2\pi f$, $u_{0,i} = \omega d_i \cos(\omega t)$.

$$p(r, t) = \sum_{i=1}^n j \frac{k z_0 u_{0,i} e^{j\omega t}}{2\pi} \frac{e^{-jkr'_i}}{r'_i} dS \quad (2.65)$$

Rearranjando, encontra-se

$$p(r) = \sum_{i=1}^n \frac{j 2\pi f^2 \rho_0 d_i e^{-jkr'_i}}{r'_i} dS \quad (2.66)$$

Na equação 2.66 tem-se que r'_i é a distância do elemento de área dS até um ponto P no espaço; $t=0$ para se obter os valores de pressão no domínio da frequência; r é a distância do centro do transdutor até P ; dS é o elemento de área em cada uma da superfície emissora de área S ; n quantidade de elementos na superfície S ; ρ_0 é a densidade do ar; c_0 é a velocidade do som e d_i é o valor de deslocamento em cada ponto da superfície representada pelo centro de um elemento de área dS

2.2.4 Regiões de Interesse para Determinação dos Valores de Pressão Acústica

Existem duas regiões de interesse em relação a determinação dos valores de pressão acústica do campo acústico. A primeira região é a de campo próximo, representada por distâncias menores que a relação $z < a_f^2/\lambda$ e a segunda região é a de campo distante representada por distâncias maiores que $z > a_f^2/\lambda$, sendo λ o comprimento da onda do sinal que se propaga e a_f é o raio do transdutor, conforme figura 2-5.

Figura 2-5 - Região de campo próximo e campo distante.

As equações 2.67 e 2.68 representam a pressão e a velocidade de uma partícula no campo próximo respectivamente. No campo próximo tem que $kr \ll 1$. Substituindo a equação 2.38 nas equações 2.39 e 2.40 obtém-se a equação 2.67 e 2.68.

$$p(r, t) = \frac{Q(t)}{4\pi} \left(\frac{jkz_0}{1+jka} \right) \frac{1}{r} e^{-jk(r-a)} \quad (2.67)$$

$$u(r, t) = \frac{Q(t)}{4\pi} \frac{1}{1+jka} \frac{1}{r^2} e^{-jk(r-a)} \quad (2.68)$$

Uma comparação das equações 2.67, 2.68 mostram que no campo próximo a pressão e a velocidade estão defasadas, pois a velocidade da partícula diminui do fator de $1/r^2$ no campo próximo acústico enquanto a pressão acústica

diminui por um fator de $1 / r$, sendo r a distância do centro de emissão e um ponto considerado.

Na região de campo próximo ocorre superposição entre as ondas geradas na borda do transdutor e as ondas geradas por toda a face do transdutor (ondas diretas ou “planas”) e não há divergência do feixe ultrassônico. Estas ondas podem interagir construtivamente ou destrutivamente, por apresentar amplitude e fase diferentes. Esta região é altamente reativa. Isto implica dificuldades na medição dos valores de pressão no campo próximo (DOUGLAS, 1981).

As equações 2.69 e 2.70 representam a pressão e a velocidade de uma partícula no campo distante, respectivamente. No campo distante tem que $kr \gg 1$. Substituindo a equação 2.38 nas equações 2.39 e 2.40 obtém-se a equação 2.69 e 2.70.

$$p(r, t) = \frac{Q(t)}{4\pi} \left(\frac{jkz_0}{1+jka} \right) \frac{1}{r} e^{-jk(r-a)} \quad (2.69)$$

$$u(r, t) = \frac{Q(t)}{4\pi} \frac{jk}{1+jka} \frac{1}{r} e^{-jk(r-a)} \quad (2.70)$$

No campo distante, a pressão acústica e a velocidade das partículas estão em fase, ambas diminuem por um fator de $1 / r$. Na região de campo distante o campo é divergente e a diferença de fase entre as ondas de borda e direta é menos preponderante permitindo que se forme uma frente de onda quase plana. Esta região é altamente resistiva. Isso possibilita medições dos valores de pressão no campo distante mais precisas (DOUGLAS, 1981).

2.2.5 Diretividade de campo acústico

A variação dos valores de pressão acústica a uma distância r no campo distante em função do ângulo theta (θ) é chamada de função de diretividade, também conhecido como padrão de radiação. As regiões com alta intensidade delimitadas por valores nulos são chamadas de lóbulos. O lóbulo maior na direção de interesse com θ igual a zero é chamado lóbulo principal, os de menor amplitude são os lóbulos laterais, conforme figura 2-6.

Figura 2-6 - Padrão de radiação de um pistão plano.

Fonte: KINSLER, 1982

O campo acústico emitido possui um lóbulo central (lóbulo principal), maior, e de vários lóbulos laterais, menores; devido ao formato circular do pistão, ocorre uma simetria em torno de seu eixo. Quando o raio do transdutor é grande em relação ao comprimento de onda do ultrassom, ou seja, $ka \gg 1$, (a é o raio do transdutor e k o número de onda definido por $2\pi/\lambda$) o padrão de emissão tem mais lóbulos laterais, e a abertura angular do lóbulo principal é menor, significando maior diretividade. Se, do contrário, o comprimento de onda é muito maior que o raio, com $ka \ll 1$, os lóbulos laterais desaparecem e o principal se alarga, o padrão se aproxima do de uma onda semiesférica (KINSLER, 1982).

A diretividade de um pistão plano pode ser calculada através da equação 2.71 (DOUGLAS, 1981). O modelo apresentado na equação 2.66 é diferente do modelo do pistão plano que considera todos os deslocamentos da superfície emissão do transdutor iguais. Contudo a função diretividade no campo distante será igual a função diretividade do pistão plano quando simulados valores normalizados de pressão acústica.

$$D(\theta) = 10 \log_{10} \left\{ \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right\}^2 \quad (2.71)$$

2.3 Modulação em amplitude - AM

Modulação em amplitude ou AM é a técnica na qual a amplitude de um sinal periódico, chamado onda portadora definida como $p(t) = A_p \text{sen}(\omega_c t)$ varia em função do sinal de interesse, que é a onda modulante definida como $m(t) = A_m \cos(\omega_m t)$, essa interação forma a onda modulada definida pela equação 2.72 e conforme a figura 2-7. A frequência e a fase da portadora são mantidas constantes (STREMLER, 1992).

$$S(t) = A_p \cos(\omega_m t) \text{sen}(\omega_c t) \quad (2.72)$$

onde A_p é amplitude da portadora, $\omega_c = 2\pi f_c$ é velocidade angular da portadora, $\omega_m = 2\pi f_m$ é a velocidade angular da modulante.

Figura 2-7 - Formação da onda modulada através da interação de frequências.

Fonte: Adaptado de STREMLER, 1992.

Aplicando a transformada de Fourier a equação 2.72, $F[s(t)] = S(\omega) = F[A_p \cos(\omega_m t) \text{sen}(\omega_c t)]$. Obtém-se o espectro de frequência do sinal modulado equação 2.73, figura 2-8

$$S[\omega] = \frac{1}{2} [F(\omega - \omega_c) + F(\omega + \omega_c)] \quad (2.73)$$

Figura 2-8 - Espectro de frequência de um sinal modulado.

Fonte: Adaptado de STREMLER, 1992.

CAPÍTULO 3: SIMULAÇÕES

3.1 Simulações Mecânicas e Elétricas

Nas simulações mecânicas e elétricas do transdutor é utilizado o método dos elementos finitos (MEF), sendo empregada a linguagem APDL (“ANSYS Parametric Design Language”), presente no software Ansys; é usado também o software Matlab, para a criação de rotinas de cálculos de alguns resultados, bem como para se realizar a interface dos dados entre uma análise e outra, permitindo executá-las de forma automática. Nas análises que se seguem, eletrostática, estática, modal e harmônica, a geometria do modelo é definida pela membrana e metade da largura da cavidade de uma única ranhura localizada a 10 mm do centro do disco, conforme figura 3-1. As propriedades dielétricas e mecânicas dos materiais usados na modelagem foram retiradas de catálogos e da literatura (BRADY, et al., 1986; WEAST, et al., 1985), sendo apresentadas na tabela 3-1.

Figura 3-1 - Modelo da metade de uma cavidade de ranhura triangular.

Tabela 3-1 - Propriedades dielétricas e mecânicas dos materiais usados.

Membrana de Poliéster	12 μm	20 μm
Módulo de elasticidade (N/m^2)	$2,3 \times 10^9$	3×10^9
Densidade (Kg/m^3)	1418	1637
Coeficiente de Poisson	0,4	0,4
Permissividade elétrica da membrana (F/m)	$33,2 \times 10^{-12}$	$33,2 \times 10^{-12}$
Ar		
Módulo de bulk do ar (N/m^2)	$1,42 \times 10^5$	
Densidade do ar (Kg/m^3)	1,3	
Permissividade elétrica do ar (F/m)	$8,859 \times 10^{-12}$	

Como o transdutor capacitivo é cilíndrico e as ranhuras são concêntricas, são utilizados elementos axissimétricos em relação ao eixo central do disco de diâmetro 37 mm. As dimensões utilizadas no modelo foram: profundidade ($H = 0,375$ mm), largura da ranhura ($L_1=0,75$; $L_2=1$; $L_3=1,35$; $L_4=1,50$; $L_5=1,75$ e $L_6=2$ mm) e espessura da membrana ($E=12$ e $20 \mu\text{m}$). Cada medida de largura foi analisada nas duas diferentes espessuras, mantendo a profundidade de $0,375$ mm.

Inicialmente é feita uma análise eletrostática, determinando a distribuição da força elétrica ao longo da membrana, para uma tensão elétrica de polarização de 200 VDC. Essa distribuição é utilizada em seguida como carregamento na análise estática, modal e harmônica, o que permite avaliar os deslocamentos ao longo da membrana, respectivamente, para uma condição estática e para qualquer frequência de excitação. Na análise modal são obtidas as frequências de ressonância e os modos de vibrar da membrana. As frequências de ressonâncias foram utilizadas como referência na análise harmônica. Na análise harmônica, foi determinada a resposta em frequência do transdutor, ou seja, o comportamento dinâmico da membrana para uma faixa de frequência. A varredura de frequência é feita ao redor da frequência de ressonância do primeiro modo de vibrar obtido na análise modal.

Nas análises mecânicas (estática, modal e harmônica) foi aplicada uma pré-tensão de $7,13 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ e $4,3 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$, respectivamente, nas membranas de $12\mu\text{m}$ e $20\mu\text{m}$, mantendo a força que causa o alongamento da membrana constante nas duas espessuras.

Sendo o modelo linear, é de se esperar que o deslocamento final de um nó localizado na superfície superior da membrana possa ser obtido somando-se os

resultados do deslocamento da análise estática com os da análise harmônica. Isso ocorre devido à aplicação de duas tensões elétricas atuantes no transdutor, uma tensão contínua DC, que faz a membrana se deslocar de um valor D_e (deslocamento estático) e permanecer deformada dentro da cavidade; e uma tensão alternada AC, que excita harmonicamente a membrana, fazendo ela deslocar de um valor d_i (deslocamento dinâmico) em relação a posição de equilíbrio do deslocamento provocado pela tensão DC, conforme mostram as figuras 3-2a) e b).

Figura 3-2 - a) Tensões atuantes no transdutor b) Deslocamentos da membrana causados pela tensão DC e AC.

(a)

(b)

Um exemplo da geometria do modelo com o detalhe da malha pode ser visto na figura 3-3. A geometria é definida pela membrana (região A) e metade da cavidade (região B) de uma única ranhura concêntrica devido à sua simetria. Os materiais empregados nas regiões A e B foram, respectivamente, poliéster e ar.

Figura 3-3 – Malha e geometria com seus elementos e respectivos nós. Região A (membrana) e região B (cavidade). Para $L_1/2=0,375\text{mm}$.

3.2 Geração da malha (tipo e quantidade de elementos)

A formulação do MEF foi desenvolvida considerando que os elementos da malha fossem figuras geométricas regulares, pois distorções na sua forma, devido à complexidade geométrica na qual ele será aplicado causam erros. Para que os elementos usados na malha sejam regulares é preciso que todos os lados de cada elemento tenham medidas iguais entre suas arestas. Quando isso ocorre, os erros são diminuídos na resolução das equações do MEF. Para conseguir essa regularidade dos elementos da malha, deve-se testar algumas dimensões de elementos para se ter a melhor divisão da malha.

Um fator que confirma a regularidade da malha é a razão de aspecto (*Aspect Ratio*). A razão de aspecto mede o quanto uma das dimensões do elemento é diferente das outras. A melhor razão de aspecto possível é 1, no caso de um quadrado (ANSYS, 1994).

Esse valor foi calculado para as duas regiões da malha (A e B), considerando metade das seis larguras de ranhura ($L_1=0,75$; $L_2=1$; $L_3=1,35$; $L_4=1,50$;

$L_5=1,75$ e $L_6=2$ mm). Além disso, para cada largura de ranhura, são testadas duas diferentes espessuras de membranas.

As diferentes quantidades de elementos analisadas no modelo foram C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 e C_6 , para cada largura L_1 , L_2 , L_3 , L_4 , L_5 e L_6 , respectivamente ; esses valores encontram-se na tabela 3-2. Em relação ao fator razão de aspecto para a região A (membrana) e região B (cavidade), os valores mais próximos de 1 foram obtidos utilizando a maior quantidade de elementos. Esses valores são apresentados na tabela 3-3, para as espessuras de membrana de $12\mu\text{m}$ e $20\mu\text{m}$.

Observando os valores da razão de aspecto encontrados, verificou-se que na região A (membrana), os elementos não sofrem distorção, mantendo-se todos como quadrados perfeitos, entretanto, na região B (cavidade), devido à sua forma triangular, os elementos apresentaram uma pequena deformação, principalmente, nas bordas, sendo o valor máximo de distorção em relação à situação de quadrado perfeito encontrada ser de 2%, para a dimensão L_1 utilizando a maior quantidade C_6 .

No presente trabalho, são usados os elementos axissimétricos de quatro nós PLANE42 para a análise eletrostática (membrana e ar). Para as análises mecânicas é usado o PLANE55 (membrana) e FLUID79 (ar); todos presentes na biblioteca do ANSYS.

Tabela 3-2 - Quantidade de elementos utilizados nas diversas geometrias.

		Quantidade de Elementos					
Larguras (mm)	Esp. (μm)	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
$L_1=0,75$	12	336	28495	61200	123335	266375	552240
	20	336	30791	66480	132855	287375	596880
$L_2=1,00$	12	495	50215	105600	211423	461087	952320
	20	495	53295	112640	224079	489143	1011840
$L_3=1,35$	12	903	88652	187920	378063	816975	1693872
	20	903	92796	197424	395199	854775	1774224
$L_4=1,50$	12	1152	107420	230400	463420	1001500	2076480
	20	1152	112012	240960	482460	1043500	2165760
$L_5=1,75$	12	1431	146688	310800	622908	1353712	2800560

	20	1431	152064	323120	645084	1402768	2904720
L6=2,00	12	1740	191180	403200	805916	1758844	3632640
	20	1740	197340	417280	831228	1814956	3751680

Tabela 3-3 - Valores encontrados da razão de aspecto para as espessuras de 12 µm e 20 µm, utilizando a maior quantidade de elementos C6.

		Valores encontrados					
12µm	Teste	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆
Região A	Aspect Ratio	1	1	1	1	1	1
Região B	Aspect Ratio	1,021	1,012	1,008	1,007	1,006	1,004
		Valores encontrados					
20µm	Teste	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆
Região A	Aspect Ratio	1	1	1	1	1	1
Região B	Aspect Ratio	1,020	1,011	1,008	1,006	1,005	1,003

3.3 Análise Eletrostática

A análise eletrostática foi feita através de uma analogia com uma análise térmica, utilizando o elemento quadrado PLANE55 disponível no software ANSYS. Esse elemento é utilizado em análise térmica e permite simular modelos axissimétricos, possuindo quatro nós com um grau de liberdade (temperatura) em cada um e funções de forma para interpolações lineares, essas funções definem o comportamento linear das variáveis dentro de cada elemento. Essas características permitiram a estruturação do modelo do transdutor capacitivo.

Com relação às condições de contorno usadas, é fixado nos nós da parte superior da membrana o valor de temperatura (analogia com potencial) de 200 e nos nós da parte inferior da ranhura (disco de alumínio) o valor de temperatura (analogia com potencial) de 0. Essa situação corresponderá somente à tensão elétrica de polarização DC de 200 V.

O programa determina os valores da força elétrica (FY) em N/m², gerando arquivos dos resultados para a metade das larguras de ranhura (L₁=0,75; L₂=1; L₃=1,35; L₄=1,50; L₅=1,75 e L₆=2 mm).

3.3.1 Convergência da Força Eletrostática

Para a análise da convergência da força elétrica, foram escolhidos dois nós de interesse: um na “borda” e outro no “centro” da membrana, conforme figura 3-4. A convergência foi feita somente com a componente da força elétrica na direção Y, sendo a componente na direção X possuir valor muito próximo à zero. Foi testada a convergência em cada largura de ranhuras (L_1 , L_2 , L_3 , L_4 , L_5 e L_6) e para as duas diferentes espessuras de membranas.

Em cada teste realizado para cada largura de ranhura, foi variado seis vezes a quantidade de elementos. A quantidade de elementos (C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 e C_6) usada foi a mesma definida quando da criação da malha, ver tabela 3-2. Após a terceira variação na quantidade de elementos C_3 a força elétrica começa a ter convergência com uma variação em torno de 2%. A figura 3-5, mostra um exemplo da convergência da força elétrica na borda e no centro para metade da largura de ranhura de $L_1=0,75\text{mm}$. O sinal negativo que acompanha o valor da força apenas indica que o sentido da força é para o interior da cavidade, sendo contrário ao eixo de referência. A figura 3-6 mostra os valores da força elétrica atuando ao longo da membrana para a mesma ranhura utilizada na figura 3-5.

Figura 3-4 - Malha e nós usados na análise de convergência da força eletrostática atuante no centro e na borda da membrana, para $H=0,375\text{mm}$ e $L_1/2=0,375\text{mm}$.

Figura 3-5 - Convergência da força eletrostática (FY) na borda e no centro da membrana para $H=0,375\text{mm}$ e largura: $L_1/2=0,375\text{mm}$.

Figura 3-6 - Valores da força elétrica (FY), que atuam ao longo da membrana, para $H=0,375\text{mm}$ e $L_1/2=0,375\text{mm}$.

3.4 Análise Estática

Na análise estática é determinado o deslocamento da membrana devido à aplicação da força elétrica, calculada na análise eletrostática, resultante da tensão de polarização DC. Como os valores da força elétrica (FY) possuem unidade em N/m^2 (Newton por metro quadrado), é necessário realizar uma integração ao longo da face de cada elemento, que define a superfície superior da membrana, para obter o valor da força elétrica em N (Newton), que será aplicada em cada nó na análise estática.

Os elementos axissimétricos PLANE42 e FLUID79 foram utilizados na análise estática para representar a membrana e o ar, respectivamente. O elemento PLANE42 é usado para modelar estruturas sólidas bidimensionais, sendo definido por quatro nós, com dois graus de liberdade de deslocamentos UX e UY em cada nó. O elemento FLUID79 consiste de um elemento mecânico adaptado para modelar fluido contido (representando o ar contido na ranhura), também sendo definido por quatro nós, com dois graus de liberdade de deslocamentos UX e UY em cada nó.

Com relação às condições de contorno mecânicas, são impostas condições de simetria nas extremidades da membrana e na região central da ranhura, além da vinculação de todos os graus de liberdade (UX e UY iguais a zero) de deslocamento ao longo da base da geometria triangular da ranhura, conforme figura 3-7.

Figura 3-7 - Condições de contorno usadas na análise estática.

Na determinação dos deslocamentos foram realizadas três iterações para verificar a convergência desse deslocamento estático. A primeira iteração utiliza-se do primeiro conjunto de forças elétricas determinado na análise eletrostática. Essa primeira iteração considera a posição não deformada da membrana, conforme mostra a figura 3-8a).

Na segunda iteração, as forças elétricas são recalculadas, mas na posição deformada conforme mostra a figura 3-8b), provocada pelo carregamento do primeiro conjunto de força. Isso gera um segundo conjunto de forças elétricas e de novos deslocamentos, mas agora considerando uma posição mais próxima da base da cavidade triangular. Na terceira iteração, repete-se o procedimento da segunda iteração, determinando um terceiro conjunto de forças elétricas e de deslocamentos.

Com os deslocamentos encontrados na 1ª e 2ª iteração da análise estática, determina-se a posição deformada da membrana na 2ª e 3ª iteração, respectivamente. A posição deformada da membrana nas 2ª e 3ª iterações é conseguida com a aplicação em cada nó, localizado na superfície superior e inferior da membrana, dos deslocamentos encontrados nas 1ª e 2ª iterações, respectivamente.

Como esse procedimento desloca-se a posição original dos nós, deve-se remodelar a malha em cada interação para ser possível recalcular os novos valores das forças elétricas e de deslocamentos nas interações seguintes.

Figura 3-8 - a) Posição não-deformada da membrana b) Posição deformada da membrana.

(a)

(b)

As iterações realizadas na análise estática são necessárias para garantir a convergência do deslocamento da membrana devido à tensão de polarização DC. Pois com a aplicação da tensão DC a membrana se deforma para o interior da cavidade e essa deformação provoca mudança nos valores das forças elétricas e, conseqüentemente, mudança nos deslocamentos.

3.4.1 Resultados das análises estáticas

Na primeira iteração é determinado o deslocamento do nó central na superfície superior da membrana a partir da posição não deformada para as diversas larguras de ranhuras (L_1 , L_2 , L_3 , L_4 , L_5 e L_6). Em seguida, com a geometria da membrana deformada conforme figura 3-8b), determina-se novos valores de força elétrica e de deslocamentos do nó central.

Os resultados encontrados para a primeira, segunda e terceira iteração são apresentados na tabela 3-4 e 3-5, somente para a metade da largura de membrana de 0,75mm para um nó localizado no centro. Contudo é observado que há uma convergência do valor de força elétrica e do deslocamento para todos os outros nós, conforme figura 3-9.

Os valores negativos dos deslocamentos apenas indicam que os deslocamentos foram contrários à referência utilizada, mostrando que a membrana se deforma em direção da cavidade.

Tabela 3-4 - Valores de convergência de força elétrica. Para $L_1/2=0,375\text{mm}$ $H=0,375\text{mm}$ e $E=12$ e $20\mu\text{m}$.

Posição do nó	Forças elétricas (N/m^2) Espessura ($12\mu\text{m}$)			Forças elétricas (N/m^2) Espessura ($20\mu\text{m}$)		
	1º iteração	2º iteração	3º iteração	1º iteração	2º iteração	3º iteração
Centro	-1,86	-1,90	-1,91	-1,84	-1,86	-1,87
Dif. 1º / 2º	2,1%			1,0%		
Dif. 2º / 3º	0,7%			0,3%		

Tabela 3-5 - Valores de convergência de deslocamento estático. Para $L_1/2=0,375\text{mm}$ $H=0,375\text{mm}$ e $E=12$ e $20\mu\text{m}$.

Posição do nó	Deslocamento estático nó central (m) Espessura $12\mu\text{m}$			Deslocamento estático nó central (m) Espessura $20\mu\text{m}$		
	1º iteração	2º iteração	3º iteração	1º iteração	2º iteração	3º análise
Centro	$-4,419 \cdot 10^{-6}$	$-5,472 \cdot 10^{-6}$	$-5,510 \cdot 10^{-6}$	$-2,008 \cdot 10^{-6}$	$-2,116 \cdot 10^{-6}$	$-2,125 \cdot 10^{-6}$
Dif. 1º / 2º	23,823%			5,394%		
Dif. 2º / 3º	0,701%			0,402%		

Os dados que constam nas tabelas 3-4 e 3-5, foram encontrados para todos os valores de largura das ranhuras. Sendo verificado a convergência para os valores do nó central, conforme figura 3-10 e figura 3-11.

Figura 3-9 - Convergência do deslocamento estático para $L_1/2= 0,375\text{mm}$ e $E=12$ e $E=20\mu\text{m}$.

Figura 3-10 - Convergência do deslocamento estático 1º, 2º e 3º iterações para $E=12\mu\text{m}$.
Para L diversos.

Figura 3-11 - Convergência do deslocamento estático 1º, 2º e 3º iterações para $E=20\mu\text{m}$.
Para L diversos.

3.5 Análise Modal

O objetivo dessa análise é obter a primeira frequência de ressonância do transdutor e o modo de vibrar para as medidas da largura variando de 0,75mm a 2mm para as duas espessuras de membrana (12 e 20 μ m). O modelo e as condições de contorno são idênticas ao usado na análise estática. Contudo para obter a solução o ANSYS dispõe três procedimentos diferentes: o householder, subespaço reduzido e o subespaço completo. Foi utilizado nessa análise o procedimento de subespaço reduzido que consiste que somente os primeiros modos de um conjunto disponível de n graus de liberdade são calculados. Esses modos são determinados definindo graus mestres, em seguida esses valores são expandidos para os outros graus de liberdade (ANSYS, 1994). Foram escolhidos como graus mestres os nós pertencentes a membrana, que corresponde a região A representada na figura 3-3. Os resultados obtidos da primeira frequência de ressonância se encontram na tabela 3-6 e a figura 3-12 mostra um exemplo do primeiro modo de vibrar para a medida de $L_1=0,75$ mm.

Tabela 3-6 - Valores encontrados da primeira frequência de ressonância L diversos.

Espess (μ m)	Freq (Hz)	Largura das ranhuras (mm)					
		$L_1=0,75$	$L_2=1,00$	$L_3=1,35$	$L_4=1,50$	$L_5=1,75$	$L_6=2,00$
		Frequências Hz					
12	1º modo	66624	51137	41582	39273	36569	34703
20	1º modo	60160	45670	33469	30765	27787	25899

Figura 3-12 - Perfil do 1º modo para $H=0,375$ mm, $L_1/2=0,375$ mm e $E=12\mu$ m.

3.6 Análise Harmônica

A análise harmônica fornece a resposta em frequência do transdutor. O modelo e as condições de contorno são as mesmas que para a análise estática. Para obter a solução foi utilizado o procedimento de subespaço completo que tem a vantagem de não precisar que as matrizes envolvidas sejam simétricas e não precisar expandir os resultados, facilitando a análise. O amortecimento foi aproximado pela expressão Rayleigh (BATHE, 1982). Os valores das constantes α e β foram aproximados utilizando medidas experimentais de pressão apresentadas em trabalhos anteriores que utilizaram transdutores similares (MATTILA, 1995; ADAMOWSKI, 1994; BUIOCHI, 1998; SUZUKI, 1889; TSUZUKI, 1992; ZHANG, 2013; RAFIQ, 1991; HIETANEN, 1993).

No modelo, a superfície superior da membrana é submetida à distribuição de força elétrica encontrada na terceira iteração da análise estática, portanto a membrana inicia essa análise partindo da posição deformada. Em seguida é aplicado um carregamento de força elétrica variável no tempo na frequência do primeiro modo de ressonância encontrado na análise modal. Os valores dessas forças são os mesmo que o encontrado na terceira iteração da análise estática considerando uma tensão de 200 VDC. Isso foi feito para simular a tensão de excitação de 200 VAC

A tabela 3-7 mostra os valores de deslocamento do nó central determinados para as duas espessuras consideradas e para as diversas larguras de cavidade. Os deslocamentos dos nós localizados nas bordas da cavidade são zero. Na figura 3-13 temos um exemplo da resposta em frequência do transdutor onde é possível verificar a largura de banda para o $L_1=0,75$ mm e para a frequência 66,6 kHz com 12 μ m de espessura.

Tabela 3-7 - Valores do deslocamento dinâmico do nó central devido à excitação no 1º modo de ressonância.

Esp. (μ m)	Largura das ranhuras (mm)					
	$L_1=0,75$	$L_2=1,00$	$L_3=1,35$	$L_4=1,50$	$L_5=1,75$	$L_6=2,00$
	d_i - deslocamentos do Nó central (m)					
12	$2,113 \cdot 10^{-9}$	$2,894 \cdot 10^{-9}$	$4,861 \cdot 10^{-9}$	$6,997 \cdot 10^{-9}$	$9,886 \cdot 10^{-9}$	$1,335 \cdot 10^{-8}$
20	$1,871 \cdot 10^{-9}$	$2,620 \cdot 10^{-9}$	$4,580 \cdot 10^{-9}$	$6,655 \cdot 10^{-9}$	$9,559 \cdot 10^{-9}$	$1,301 \cdot 10^{-8}$

Figura 3-13 - Resposta em frequência e largura da banda para o $L_1/2=0,375$ mm $E=12$ μ m e frequência 66,6 kHz.

3.7 Simulação do Campo Acústico

A simulação do campo acústico foi realizada usando o software MATLAB, o programa utilizado encontra-se no apêndice A. A solução numérica da integral de Rayleigh, equação 2.66, foi utilizada para simular o campo acústico gerado por apenas um transdutor e da equação 3.1, foi utilizada para simular o campo acústico gerado por quatro e oito transdutores. Inicialmente deve-se realizar a discretização da superfície emissora, conforme figura 3-14, tornando o que é contínuo em discreto. Cada ponto da superfície representa o centro de um elemento de área dS .

Em seguida é atribuído para cada elemento na superfície emissora um valor de deslocamento obtidos na análise harmônica d_i . A posição do elemento e a posição do deslocamento podem coincidir, mas quando não coincidem é realizada uma interpolação com os valores de deslocamentos mais próximos da posição do elemento. Quanto maior for a discretização utilizada, ou seja, maior o número de elementos definidos mais exato é o cálculo do campo simulado.

Os transdutores são posicionados no plano XY. Os campos acústicos são simulados no plano XZ com $Y=0$. Para a combinação de dois transdutores são criadas malhas contendo 200 pontos na direção x e 500 pontos na direção z. Para as combinações de quatro e oito transdutores são criadas malhas de 400 pontos na direção x e de 500 pontos na direção z com $y=0$, os pontos estão espaçados de 1mm.

Figura 3-14 - Exemplo de elementos infinitesimais distribuídos na superfície superior da membrana. Para $L_1/2=0,375\text{mm}$ e $E=12\mu\text{m}$.

Para as simulações do campo acústico utilizando combinações de dois, quatro e oito transdutores, figuras 3-15b), c) e d) respectivamente, foram definidas posições, no plano XY, onde os transdutores ficariam sobrepostos ou espaçados. Os espaçamentos entre os transdutores na direção x e na direção y foram definidos nos seguintes intervalos, sendo na direção x ($\Delta x = [0 \text{ a } 300] \text{ mm}$) e na direção y ($\Delta y = [0 \text{ a } 100] \text{ mm}$). A variação Δx é definida como a distância entre dois centros de transdutores iniciando essa variação a partir do eixo de simetria y, e a variação Δy definida como a distância entre dois centros de transdutores iniciando essa variação a partir do eixo de simetria x.

Para cada configuração utilizada de transdutores no plano XY, é criada uma malha, sendo então calculado os valores de pressão do campo acústico no plano XZ com $Y=0$ e determinado o perfil de amplitude de pressão no eixo acústico ou no eixo de simetria.

As configurações para dois transdutores foram determinadas: primeiro considerado a mesma posição dos transdutores $\Delta x=0$, depois variando com passo de 0,5 mm para $\Delta x=0,5$ mm, esse procedimento é repetido até posição $\Delta x=300$ mm. Na análise modal realizada as frequência de ressonâncias encontradas variam de 66,6 kHz até 25,8 kHz, portanto considerando a velocidade do som à 343,4 m/s os comprimentos de ondas variam de 5,1mm à 13,2 mm, o passo de 0,5 mm possibilitaria a análise da interação dos campos acústicos na região de campo próximo.

Para quatro transdutores é feito inicialmente para a mesma posição dos transdutores $\Delta x_1=0$, $\Delta x_2=0$ mm, depois variando com passo 0,5 mm um par de transdutores $\Delta x_1=0,5$ mantendo Δx_2 fixo. Depois após uma variação de Δx_1 , varia Δx_2 com passo de 0,5 mm até posição $\Delta x_2=300$ mm, esse procedimento é repetido até $\Delta x_1=300$ mm e $\Delta x_2=300$ mm.

Para oito transdutores existe a variação de Δy , inicialmente é feito para a mesma posição dos transdutores $\Delta x_1=0$, $\Delta x_2=0$, e $\Delta y_1=0$, $\Delta y_2=0$ mm. É repetido o procedimento para a variação de Δx_1 e Δx_2 com quatro transdutores, com Δy_1 e Δy_2 fixo. Depois varia Δy_1 , depois Δy_2 e simultaneamente Δy_1 e Δy_2 ; repetindo o procedimento anterior até $\Delta x_1=300$ mm, $\Delta x_2=300$ mm, $\Delta y_1=100$ mm, $\Delta y_2=100$ mm.

Foi utilizada a equação 3.1, que é a solução numérica da integral Rayleigh, mas calculada utilizando o somatório do campo gerado por cada N transdutores ($Tdx=1, 2, \dots N$). Sendo $z_0=\rho_0 c_0$, $k=\omega/c_0$, $\omega=2\pi f$, ; $u_{0,i}^{Tdx} = \omega d_i \cos(\omega t)$.

$$p(r, t) = \sum_{Tdx=1}^N \sum_{i=1}^n \frac{jkz_0 u_{0,i}^{Tdx} e^{j\omega t}}{2\pi} \frac{e^{-jk_{Tdx} r_i^{Tdx}} dS^{Tdx}}{r_i^{Tdx}} \quad (3.1)$$

onde r_i^{Tdx} é a distância do elemento de área dS^{Tdx} até um ponto P no espaço; r é a distância do centro do transdutor até um ponto P no espaço; dS^{Tdx} é o elemento de área em cada uma da superfície emissora de área S; n é quantidade de elementos na superfície S; z_0 é a impedância específica do meio de propagação; $u_{0,i}^{Tdx}$ é o módulo do vetor velocidade em cada ponto da superfície representada pelo centro de um elemento de área dS .

Figura 3-15 - Configurações usadas no cálculo do campo acústico a) um transdutor (1Tdx) b) dois transdutores sobrepostos (2Tdx) c) Quatro transdutores (4Tdx) d) Oito transdutores (8Tdx).

3.7.1 Verificação de convergência dos valores de pressão

Foi verificada a convergência dos valores de pressão no eixo acústico z considerando três discretizações da malha emissora, conforme indicado na tabela 3-8, para o conjunto de elementos dS : C_1 , C_2 e C_3 . O tamanho dos elementos variaram de 0,03 a 0,14 mm.

Para as frequências de 66,6 kHz, (figura 3-16) e 60,1 kHz, (figura 3-17); foram simulados: o campo acústico normalizado no plano XZ com $Y=0$, a distribuição

de pressão acústica ao longo do eixo acústico (direção z) no instante $t=0$, a diretividade e a convergência da amplitude de pressão acústica para as posições no eixo acústico $z=0, 50, 100, 150, 200$ e 250 mm. Para as frequências 41, 33, 34 e 25 kHz, (figura 3-18) é mostrada apenas a verificação de convergência da amplitude de pressão, para as posições no eixo acústico $z=0, 50, 100, 150, 200$ e 250 mm.

Tabela 3-8 - Quantidade de elementos da malha acústica.

			Quantidade de elementos (n)		
Larguras (mm)	Freq. (kHz)	Esp. (μm)	C ₁	C ₂	C ₃
L ₁ =0,75	66	12	91300	316636	828276
	60	20	91300	316636	828276
Tamanho de um lado do incremento de área dS - (mm)			0,11	0,05	0,03
L ₂ =1,35	41	12	68328	300884	780600
	33	20	68328	300884	780600
Tamanho de um lado do incremento de área dS - (mm)			0,12	0,05	0,03
L ₃ =2,00	34	12	56401	275205	712780
	25	20	56401	275205	712780
Tamanho de um lado do incremento de área dS - (mm)			0,14	0,06	0,04

Figura 3-16 - a) Campo acústico normalizado no plano XZ b) Distribuição de pressão acústica ao longo do eixo acústico (direção z) c) Diretividade d) Convergência de pressão para 1 Tdx de 66,6 kHz.

Figura 3-17- a) Campo acústico normalizado no plano XZ b) Distribuição de pressão acústica ao longo do eixo acústico (direção z) c) Diretividade d) Convergência de pressão para 1Tdx de 60,1 kHz.

Figura 3-18 - Convergência de pressão para 1Tdx de a)41, b)33, c)34 e d)25 kHz.

Aumentando a quantidade de elementos em 2,5 vezes, de C₂ para C₃, os valores de amplitude de pressão acústica em cada ponto do eixo acústico na direção z, variaram em torno de 3%. Na tabela 3-9 é apresentada a variação de pressão em z=0, 50, 100, 150, 200 e 250 mm para as frequências de 66,6 e 60,1 kHz.

Tabela 3-9 - Convergência dos valores de pressão para os transdutores de frequência de 66,6 kHz e 60,1 kHz.

Posição em z (mm)	66,6 kHz			60,1 kHz		
	Pressão com C ₂ (Pa)	Pressão com C ₃ (Pa)	Variação (%)	Pressão com C ₂ (Pa)	Pressão com C ₃ (Pa)	Variação (%)
0	0,67	0,69	3,1%	5,66	5,82	3,00%
50	-0,47	-0,48	3,4%	-9,55	-9,85	3,14%
100	0,21	0,22	3,4%	-1,07	-1,10	2,81%
150	0,30	0,31	3,5%	8,66	8,92	3,00%
200	-0,30	-0,31	3,4%	-0,68	-0,72	2,81%
250	-0,08	-0,09	3,5%	-5,39	-5,56	3,10%

3.7.2 Simulações dos campos acústicos combinados

O objetivo dessas simulações é verificar se através da combinação de frequências ultrassônicas é possível obter frequências na faixa audível e se os campos formados são diretivos. Todos os valores foram normalizados pelo maior valor de pressão absoluta encontrado no plano XZ de cada campo.

Inicialmente são apresentadas algumas simulações para combinação de dois transdutores. Os primeiros pares são 66/66 kHz (pares iguais), sendo apresentadas as simulações considerando três configurações para as posições dos transdutores no plano XY ($\Delta x=0$ mm - na mesma posição, $\Delta x=50$ mm e $\Delta x=100$ mm), figura 3-19.

As mesmas configurações são apresentadas para os pares 66/60 kHz, figura 3-20. Para os pares de frequências (41/33, 34/25 e 66/34 kHz) são apresentadas as simulações dos campos acústicos apenas na configuração $\Delta x=50$ mm, figura 3-21.

Figura 3-19 - Campos acústicos simulados e distribuição de pressão acústica para 66/66 kHz a) e b) na mesma posição c) e d) $\Delta x=50$ mm e) e f) $\Delta x=100$ mm.

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 3-20 - Campos acústicos simulados e distribuição de pressão acústica para 66/60 kHz a) e b) na mesma posição c) e d) $\Delta x=50\text{mm}$ e) e f) $\Delta x=100\text{mm}$.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 3-21 - Campos acústicos simulados e distribuição de pressão acústica para os pares a) e b) 41/33 c) e d) 34/25 e) e f) 66/34 com $\Delta x=50\text{mm}$.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Em seguida são apresentadas as simulações de campo acústico e de distribuições de pressão acústica no eixo de simetria de quatro transdutores com a configuração $\Delta x_1=50\text{mm}$, $\Delta x_2=75\text{mm}$ figuras 3-22a) e b) e para $\Delta x_1=100\text{mm}$, $\Delta x_2=300\text{mm}$ figuras 3-22c) e d). Os pares simulados foram 66/60/66/60 kHz.

Figura 3-22 - Campos acústicos simulados e distribuição de pressão acústica para 66/60/66/60 kHz a) e b) com $\Delta x_1=50\text{mm}$, $\Delta x_2=75\text{mm}$ c) e d) $\Delta x_1=100\text{mm}$, $\Delta x_2=300\text{mm}$.

Em seguida são apresentadas as simulações de campo acústico e de distribuições de pressão acústica no eixo de simetria de oito transdutores com a configuração $\Delta x_1=50\text{mm}$, $\Delta x_2=75\text{mm}$, $\Delta y_1=100\text{mm}$, $\Delta y_2=100\text{mm}$ figuras 3-23a) e b) e para $\Delta x_1=100\text{mm}$, $\Delta x_2=300\text{mm}$, $\Delta y_1=100\text{mm}$, $\Delta y_2=100\text{mm}$ figuras 3-23c) e d) . Os pares simulados foram 66/60/66/60/66/60/66/60.

Figura 3-23 - Campos acústicos simulados e distribuição de pressão acústica para 66/60/66/60/66/60/66/60 kHz a) e b) $\Delta x = \Delta y = 50\text{mm}$ c) e d) $\Delta x = \Delta y = 100\text{mm}$.

3.7.3 Simulações dos campos acústicos considerando a fase e o tempo

As simulações das figuras 3-20, 3-22 e 3-23 mostram que os pares de frequências 66,6 e 60,1 kHz, quando emitidos juntos, irão formar uma frequência menor em um campo diretivo. Isso foi observado devido ao perfil modulado da distribuição das amplitudes de pressão igual à uma modulação AM (Amplitude Modulada), indicando a existência de uma modulante de frequência menor.

A diretividade depende da razão entre o raio do transdutor e o comprimento da onda emitida, sendo maior quanto maior essa razão (DEAN, 1962). As simulações do campo acústico da figura 3-20 quando comparadas com as da figura 3-21 se mostraram mais diretivas.

Para confirmar a existência dessa frequência menor foi simulado qual o perfil de pressão que uma pessoa afastada de uma distância da superfície emissora, ouviria. Assim foram feitas simulações considerando a propagação da combinação de duas ondas de frequências 66,6 kHz e 60,1 kHz e determinado os valores de amplitude de pressão considerando diferentes tempo e fase entre as ondas emitidas. Foi utilizada a equação 3.2

$$p(r, t) = \text{real} \left\{ \sum_{Tdx=1}^2 \sum_{i=1}^n \frac{j k z_0 u_{0,i}^{Tdx} e^{j \beta_{Tdx}}}{2\pi} \frac{e^{-j k_{Tdx} r_i^{Tdx}}}{r_i^{Tdx}} dS_i^{Tdx} \right\} \quad (3.2)$$

onde $\beta_{Tdx} = \omega_{Tdx} \cdot t = 2\pi \cdot f_{Tdx} \cdot t$. O tempo considerado na análise foi de um período da onda de 6,6 kHz, com uma discretização de 101 pontos. Assim considerou-se um intervalo de 0 a 150 μ s, variando com um intervalo de $\Delta t = 1,5 \mu$ s. Na tabela 3-9 são apresentados apenas 9 tempos desta análise com os respectivos valores de $\beta_1 = \omega_1 t$ e $\beta_2 = \omega_2 t$.

Para uma pessoa ouvir é necessário que se cumpram alguns requisitos em conjunto: as frequências das ondas emitidas estejam entre 20 Hz e 20 kHz, isto é, o período $T = 1/f$ esteja entre 50ms e 50 μ s respectivamente, que a variação da amplitude da pressão acústica seja de no mínimo de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (pressão mínima detectável pelo sistema auditivo, conhecida como limiar da audição) e que essa variação de amplitude de pressão acústica seja periódica, se repetindo ao longo do tempo.

Quando duas ondas de frequências próximas são emitidas forma-se uma frequência menor e uma frequência maior (KINSLER, 1982). Dessa forma como está se utilizando os pares 66,6 kHz e 60,1 kHz, a frequência menor que se formaria seria 6,6 kHz. Assim o indivíduo posicionado no eixo $z = 388$ mm estaria submetido a uma variação de pressão equivalente ao de uma onda de 6,6 kHz. Uma onda de 6,6 kHz completa um ciclo completo de 2π radianos em 151,5 μ s.

Dessa forma quando da formação da onda de 6,6 kHz, as ondas de 66,6 kHz e 60,1 kHz que partem da superfície do transdutor no mesmo instante $t = 0$, na mesma fase e com a mesma velocidade, irão alcançar a posição $z = 388$ mm com fases diferentes, conforme a figura 3-24.

Figura 3-24 - Ondas de 66,6kHz e 60,1kHz iniciando sua emissão no mesmo instante de tempo e na mesma fase ($\beta_1=0$ e $\beta_2=0$).

Assim, para calcular o valor real da resultante de pressão naquele instante e naquela posição é necessário levar em consideração a diferença de fase das ondas quando chegam na posição desejada. Por exemplo, no instante 19 μ s as ondas de 66,6 kHz e 60,1 kHz terão avançado 7,9 rad e 7,1 rad, respectivamente. Utilizando a equação 3.2 e substituindo os valores de radianos encontrados, são obtidos os valores da pressão resultante nas posições do eixo acústico z. A figura 3-25 mostra os valores da pressão no eixo acústico para os instantes indicados na tabela 3-10.

Tabela 3-10 - valores de β usados (defasagem de uma onda para a próxima).

	Divisão	β_1 (rad) Tdx 66,6kHz	β_2 (rad) Tdx 60,1kHz	Tempo da onda de 6.6 kHz completar 2π (μ s)
t_1	0	0	0	0
t_2	$\pi/4$	7,925	7,140	19,7
t_3	$\pi/2$	15,851	14,280	37,9
t_4	$3\pi/4$	23,776	21,420	57,6
t_5	π	31,702	28,560	77,3
t_6	$5\pi/4$	39,627	35,700	93,9
t_7	$3\pi/2$	47,552	42,840	110,6
t_8	$7\pi/4$	55,478	49,980	128,8
t_9	2π	63,403	57,120	151,5

Figura 3-25 - Variação da fase para 2Tdx 66,6kHz e 60,1 kHz - na mesma posição.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

(h)

(i)

Para os nove tempos apresentados observa-se que o indivíduo posicionado em $z=388$ mm será submetido a uma variação de pressão em $151 \mu\text{s}$, que corresponde a período da onda $6,6 \text{ kHz}$. Para uma pessoa ouvir é necessário que essa variação ocorra em valores superiores a $50 \mu\text{s}$ ($T=1/20000 \text{ s}$) e inferiores a 50 ms ($T=1/20 \text{ s}$), variações de pressões que não ocorram nesse intervalo não serão ouvidas.

Nas simulações realizadas foi verificado que devido à proximidade entre as duas frequências ($f_1=66,6 \text{ kHz}$ e $f_2=60,1 \text{ kHz}$) que interagem de maneira construtivas e destrutivas ao longo do percurso, e devido a diferença de fase entre elas, forma-se uma frequência resultante caracterizada como $F_{\text{res}}=(f_1+f_2)/2$ com período $T=1/F_{\text{res}}$ de $15,7 \mu\text{s}$, que não será audível devido ao limite da percepção audível. O indivíduo irá ouvir a frequência menor formada de $6,6 \text{ kHz}$, conforme figura 3-26.

Figura 3-26 - Frequência da resultante.

A distribuição das amplitudes de pressão se assemelha também ao fenômeno de batimento. Contudo o batimento apesar de também ocorre através da superposição de duas ondas de frequências próximas está associado as características da percepção do ouvido humano. O indivíduo acaba tendo a sensação da presença de um frequência menor, devido à redução no volume do som da frequência resultante $F_{res}=(f_1+f_2)/2$ que ocorre de maneira periódica, isto é na frequência de batimento definida como f_2-f_1 , sugerindo que existe uma outra frequência menor ocorrendo.

Alguns autores, como Kinsler e Ramalho (KINSLER, 1982; RAMALHO, 2002), definem o fenômeno do batimento como a superposição entre ondas de frequências próximas e que devido à não-linearidade da percepção auditiva, ocorre a sensação de ouvir uma segunda frequência. Contudo é consenso que há um limite para o ouvido humano sentir o fenômeno de batimento, que é até uma frequência de 10 Hz.

Assim o que se pode afirmar após as considerações sobre o batimento e justificando o projeto de protótipos, que a onda de 6,6 kHz que aparece nas simulações será ouvida pelo indivíduo posicionado em $z= 388$ mm sendo formada devido a uma modulação das frequências ultrassônicas. O indivíduo não irá ouvir a frequência resultante, pois seu período é de $15,7 \mu s$, mas ele ouvirá a frequência de 6,6 kHz.

CAPÍTULO 4: VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

4.1 Procedimentos

A verificação experimental consistiu em três etapas. Na primeira etapa são construídos os protótipos dos transdutores e do circuito elétrico necessário para o funcionamento dos mesmos, baseados nos valores encontrados nas simulações. Na segunda etapa é feita a determinação das frequências de ressonância e dos deslocamentos da superfície superior da membrana. Na terceira etapa são realizadas as medições dos valores de pressão acústica gerado pelos transdutores e a geração de uma frequência audível.

4.1.1 Desenvolvimento dos Protótipos

Foram construídos oito transdutores capacitivos e usinadas 8 placas de alumínio com ranhuras triangulares concêntricas de largura $L_1=0,75\text{m}$ conforme figura 4-1. Essa medida se mostrou viável nas simulações para se conseguir gerar o som audível através da combinação dos sinais de 66,6 kHz e 60,1 kHz. A membrana foi tensionada pelo mecanismo de parafuso-mola destacado na figura 4-1.

Figura 4-1 - Transdutor capacitivo construído.

As pré-tensões mecânicas utilizadas na simulação foram $7,13 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ e $4,31 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, respectivamente, para $12 \text{ }\mu\text{m}$ e $20 \text{ }\mu\text{m}$. Na verificação experimental é conhecido a constante da mola $K=4500 \text{ N/m}$, ao se utilizar do mecanismo com parafuso e mola, foi possível deslocar a mola e obter a força, F_m , necessária para tensionar a membrana com os valores de tensão mecânica utilizados na simulação.

O cálculo da força F_m e da pré-tensão T , que atuam na membrana durante a verificação experimental, é feito por meio das equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4. As figuras 4-2a) e b), mostram a geometria e as variáveis usadas no cálculo dessa pré-tensão mecânica.

Figura 4-2 - a) Desenho esquemático do transdutor sem tensão aplicada na membrana b) Com tensão aplicada na membrana.

$$F_m = Kh \quad (4.1) \quad T = \frac{R_a}{2\pi RE} \quad (4.2) \quad R_a = \frac{F_m}{\text{seno } \theta} \quad (4.3) \quad \text{sen } \theta = \frac{h}{z} \quad (4.4)$$

onde F_m é a força da mola, T é a tensão da membrana, R é o raio do transdutor, E é a espessura da membrana, R_a é a resultante das forças na direção radial da membrana e θ é o ângulo formado devido à deformação da membrana, h é o deslocamento da mola e z é a diferença entre o diâmetro do disco com ranhuras e do diâmetro interno do anel fixador da membrana.

4.1.2 Desenvolvimento do Circuito Elétrico

O circuito elétrico desenvolvido neste trabalho permite excitar o transdutor com uma tensão de polarização de até 250 VDC e uma tensão de excitação de até 250 VAC. A tensão de excitação é aplicada em frequências iguais às frequências de ressonâncias determinadas na análise modal. Os transdutores construídos neste trabalho possuem as características elétricas experimentais (capacitância, impedância e resistência) mostradas na tabela 4-1.

O transdutor pode ser descrito com elementos mecânicos e elétricos. Os elementos mecânicos são a membrana, ar na cavidade e as resistências para emissão no ar. Esses elementos mecânicos podem ser representados juntos com os elementos elétricos no circuito equivalente da figura 4-3. O valor de pressão emitido em uma posição r , depende do valor de corrente elétrica obtido no transdutor, conforme equação 4.5 (MATTILA, 1995).

Figura 4-3 - Circuito equivalente.

Fonte: Adaptado de MATTILA, 1995

$$p(r) = \frac{j\rho_0 f S}{r} \cdot \emptyset \cdot i \quad (4.5)$$

onde j é $\sqrt{-1}$, f é a frequência de ressonância do transdutor, S é área de emissão do transdutor, ρ_0 é a densidade do ar, r é a distância para qual se quer calcular a pressão, i a corrente elétrica, $\emptyset$ é o fator de transformação entre as variáveis elétricas e

acústicas que pode ser calculado por $\phi = \frac{C_o U_{dc}}{x_o}$, sendo C_o a capacitância do transdutor, U_{dc} a tensão de polarização R_{dc} a resistência da fonte DC, x_o a distância equivalente de ar, L a indutância equivalente e C a capacitância equivalente, R a resistência equivalente formada por $R=(R_t+R_r+R_d)/\phi^2$; sendo R_t a resistência do transdutor, R_r a resistência de emissão do transdutor, R_d a resistência dissipativas do transdutor, U_{ac} a tensão de excitação alternada, R_{ac} a resistência interna do gerador e C_{pr} o capacitor de proteção da corrente DC ; conforme descrito em (MATTILA, 1995).

Tabela 4-1 - Características elétricas dos transdutores de 66,6 kHz e 60,1 kHz.

Descrição Tdx Freq. Ressonância(kHz)	Capacitância C_o (pF)	Impedância (k Ω)	Resistência R_t (k Ω)
66	267	Z1=9	R1=8,8
60	319	Z2=8	R2=7,7

Para se conseguir as tensões de excitação e de polarização de até 250 VDC foi desenvolvido um circuito amplificador em laboratório conforme procedimentos descritos por Allen (ALLEN, 2005). Esse circuito é ligado a um gerador de funções programáveis de dois canais (modelo Tektronix PG 5110). O circuito de tensão alternada é composto pelo circuito LM3886 (amplificador operacional), transformadores de ferrites para a amplificação e uma fonte de corrente contínua. O circuito de tensão contínua é composto pelo circuito TL494 (gerador e controlador de sinais PWM), pelo transistor bipolar de junção (TIP50-npn), trafos de ferrite e diodo 1N4937. A figura 4-4a) e b) mostram os conjuntos principais do amplificador, que são duas entradas para sinais de frequências diferentes e duas saídas com esses sinais amplificados. No anexo A são mostrados todos os componentes utilizados.

Cada entrada do circuito é alimentada por um canal do gerador de função. O circuito amplifica esses sinais e excita um transdutor, dois, quatro ou oito transdutores. Esse circuito consegue tensões de saída em cada canal de até 250 VAC e 250 VDC antes que ocorra a saturação do sinal e deforme a senoide. A corrente elétrica medida em cada transdutor foi de 105 mA e 130 mA, respectivamente, para 66,6 kHz e 60,1 kHz.

Figura 4-4 - a) Desenho esquemático do circuito construído. **b)** circuito construído para amplificação do sinal.

(a)

(b)

4.1.3 Determinação das Frequências de Ressonâncias e dos Deslocamentos

As medições das frequências de ressonâncias foram feitas utilizando o vibrômetro a laser (modelo Polytec com controlador modular OFV-5000 e cabeça óptica OFV-534) ligado ao osciloscópio digital (modelo HP 54112D), figura 4-5.

Para se determinar a frequência de ressonância, deve-se buscar a máxima amplitude do deslocamento no osciloscópio, variando a frequência no gerador de funções (modelo Tektronix PG 5110), usado na excitação do transdutor. A ponta do laser foi direcionada em três posições diferente ao longo do raio do transdutor $x=0$, 10 e 18 mm, conforme figura 4-5, sendo a posição 0mm o centro do transdutor.

Para as medições dos deslocamentos foi utilizado o microfone B&K 4138-A-015 (diâmetro 1/8") nas posições do eixo acústico $z= 67, 100, 150$ mm para o transdutor de 66,6 kHz e $z= 60, 100, 150$ mm, para o transdutor de 60,1 kHz. As medições de pressão obtidas pelo microfone foram substituídas na equação 2.66 e calculado o valor de deslocamento. A tabela 4-2 mostra as frequências de ressonâncias e os deslocamentos obtidos comparando com os valores simulados.

Figura 4-5 - Bancada para verificação das frequências de ressonância e dos deslocamentos da superfície superior da membrana.

Tabela 4-2 - a) Valores de frequência de ressonância b) Valores de deslocamentos encontrados experimentalmente, considerando uma ranhura $L_1=0,75\text{mm}$ localizada em 3 posições ao longo do raio do transdutor.

Esp. (μm)	Valores experimentais de frequência (kHz)			Valores simulados de frequência (kHz)		
	0mm	10mm	18mm	0mm	10mm	18mm
12	66,2	65,9	63,1	66,6	66,6	66,6
20	59,3	59,8	57,4	60,1	60,1	60,1

(a)

Esp. (μm)	Valores experimentais de deslocamentos calculado através dos valores de pressão (10^{-9} m)	Valores simulados de deslocamentos (10^{-9} m) no nó central
12	1,95	2,11
20	1,76	1,87

(b)

Foi feita outra verificação experimental utilizando o interferômetro para os transdutores de frequência de ressonância de 66,6 kHz (membrana de espessura de 12 μm) e de 60,1 kHz (membrana de espessura de 20 μm). Foi testada a influência da tensão contínua VDC nos valores de frequência de ressonância, figura 4-6. O laser foi posicionado na ranhura de $L_1=0,75\text{mm}$ localizada a 10mm do centro do transdutor. Os transdutores foram submetidos a tensões de polarização de 100, 150 e 200 VDC com uma tensão de excitação de 180 VAC.

Figura 4-6 - Influência da tensão VDC nas frequências de ressonâncias.

4.1.4 Determinação dos Valores de Pressão Acústica

A determinação do campo de pressão acústica foi realizada utilizando um sistema de varredura automatizado de campo acústico, equipamento disponível no Laboratório de Ultrassom da USP, e microfones calibrados. No sistema de varredura é utilizado a placa de aquisição de sinais da National Instruments PCI 5112, com taxa de amostragem de 3 MHz. Os dois tipos de microfone calibrados utilizados foram: o B&K 4138-A-015 (diâmetro 1/8") - melhor resposta para frequências acima de 20 kHz e o B&K 4939-A-011 (diâmetro 1/4") - melhor resposta abaixo de 20 kHz.

A primeira verificação experimental tratou-se de caracterizar individualmente os transdutores de frequências de ressonâncias de 66,6 kHz e 60,1 kHz, figura 4-7a) e b). Cada transdutor foi excitado com um sinal contínuo ou por uma salva de sinais senoidais nas respectivas frequências de ressonâncias. Foram determinados assim, os valores de pressão acústica no eixo acústico z e feita a varredura do campo acústico no plano XZ com Y=0, dos valores de pressão acústica. Foi utilizado o microfone B&K 4138-A-015 (diâmetro 1/8") ligado ao amplificador de sinais Nexus (modelo 2690-A-OS2). Os valores eram armazenados pela placa de aquisição de sinais.

A malha de pontos usada para realizar a varredura de cada campo acústico dos transdutores de 66,6 e 60,1 kHz, foi de 100 pontos na direção x e 250 pontos na direção z (Em x: 50 a -50mm, Em z: 0 mm a 250mm), sendo o passo de cada aquisição de pressão acústica ocorrer a cada 1mm.

4.1.5 Determinação da Formação de uma Frequência Audível

Para as verificações da formação de uma frequência audível, o local para aquisição foi protegido com material de absorção acústica do fabricante Sonex (modelo illtec pyramid) com 50mm de espessura, conforme figura 4-7c) e d). Foram utilizados dois métodos para a geração das frequências audíveis.

O primeiro método consistiu na utilização de oito transdutores. Os transdutores são excitados por um sinal contínuo ou por uma salva de sinais senoidais com frequências iguais as frequências de ressonâncias dos transdutores. Foram utilizados 4 transdutores de frequências de ressonâncias de 66,6 kHz e 4 de 60,1 kHz

montados na configuração $\Delta x_1=100$, $\Delta x_2=300$, $\Delta y_1=100$, $\Delta x_2=100$ mm, conforme figura 3-15d.

A primeira verificação do primeiro método foi utilizando o microfone B&K 4939-A-011 (1/4") ligado ao amplificador Nexus (modelo 2690-A-OS2). O microfone foi posicionado no plano XZ com $Y=0$; em 90 posições sendo em $z= 5, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 388$ e 400 mm para cada valor de $x = 0, -5, -10, -25, -50, -75, -100, -125, -150$ mm. Com o sinal obtido pelo microfone em cada ponto foi realizada uma FFT. O objetivo dessa verificação experimental é encontrar uma frequência audível e determinar o maior valor de pressão presente no campo acústico.

A segunda verificação do primeiro método foi realizada a varredura no plano XZ com $Y=0$ para determinar os valores de pressão acústica. Nessa varredura foi utilizada uma malha com 40 pontos na direção x e 400 pontos na direção z , sendo o passo de cada aquisição de pressão acústica ocorrer a cada 1mm.

No segundo método consistiu na utilização de apenas um transdutor de frequência de ressonância de 60,1kHz. Sua excitação foi feita por um sinal contínuo com modulação AM ou por uma salva de sinais senoidais com modulação AM. A onda portadora tem frequência 60,1kHz e a onda modulante 6,6 kHz.

Na primeira verificação do segundo método foi utilizado o microfone B&K 4939-A-011 (1/4") ligado ao amplificador Nexus (modelo 2690-A-OS2). O microfone foi posicionado no plano XZ com $Y=0$; em 30 posições sendo em $z= 5, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 388$ e 400 mm para cada valor de $x = 0, -5, -10$ mm. Com o sinal obtido pelo microfone foi realizada uma FFT. O objetivo dessa verificação experimental é encontrar uma frequência audível e determinar o maior valor de pressão presente no campo acústico.

Na segunda verificação do segundo método foi realizada a varredura no plano XZ com $Y=0$ para determinar os valores de pressão acústica. Foi utilizada nesse método uma malha com 40 pontos na direção x e 400 pontos na direção z (Em x : 20 a -20 mm, Em z : 0 a 400mm), sendo o passo de cada aquisição de pressão acústica igual a 1mm.

Figura 4-7 - a) Máquina de varredura b) Detalhe de medição de um transdutor c) Detalhe para medição audível de oito transdutores e um transdutor d) Cabine isolada acusticamente.

(a)

(b)

(c)

(d)

CAPÍTULO 5: DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

5.1 Análises Elétricas e Mecânicas

Na análise eletrostática, o valor da força elétrica é maior nas bordas das ranhuras. Isso ocorreu devido à membrana estar em contato com o ápice da ranhura triangular. As forças elétricas diminuem com o aumento da espessura da membrana nas regiões da borda e do centro da cavidade. Os valores da força elétrica aumentam com o aumento da largura da ranhura, na região da borda, figura 5-1 e os valores diminuem na região do centro, figura 5-2. O valor negativo indica a direção contrária a referência adotada.

A figura 5-3 mostra os deslocamentos estáticos dos nós localizados da superfície superior da membrana resultante da terceira iteração da análise estática. Sendo que o aumento da largura da ranhura provoca o aumento do deslocamento dos nós devido ao maior valor da força eletrostática resultante na membrana. Se diminuir a espessura da membrana, mantendo constante a largura da ranhura, os deslocamentos também aumentam.

Figura 5-1 - Comportamento das forças FY na borda. Para L diversos.

Figura 5-2 - Comportamento das forças FY no centro. Para L diversos.

Figura 5-3 - Perfis de deslocamento estático para a membrana, para todas as medidas de ranhura e para os dois valores de espessura.

Na análise modal, foram obtidas as frequências de ressonância do primeiro modo de vibrar em função da largura de ranhura para as espessuras da membrana de 12 μm e 20 μm , conforme mostra a figura 5-4. Percebe-se uma redução no valor da primeira frequência de ressonância, conforme a largura é aumentada. Em relação ao aumento da espessura da membrana, há também uma redução na frequência de ressonância, pois ocorre aumento da massa da membrana e um pequeno aumento no afastamento do eletrodo da membrana em relação à cavidade triangular.

Figura 5-4 - Frequências de ressonância no 1º modo de vibrar.

Na análise harmônica, a figura 5-5 mostra as amplitudes de deslocamento do nó central, excitando o primeiro modo de ressonância de cada geometria. O deslocamento aumenta com o aumento da largura da cavidade, devido ao maior valor da força eletrostática resultante na membrana. Por outro lado, o deslocamento diminui com o aumento da espessura, já que ocorre um aumento da massa da membrana.

Figura 5-5 - Deslocamentos do nó central da membrana devido à excitação do 1º modo de ressonância.

Uma outra simulação realizada foi a verificação da influência da pré-tensão e da presença do ar nas cavidades triangulares dos transdutores considerando o comportamento estático. O aumento da pré-tensão e a retirada do ar das cavidades aumentam os deslocamentos estáticos da membrana conforme figura 5-6.

Figura 5-6 - Perfil dos deslocamentos estáticos, simulados da membrana para as condições com e sem pré-tensão com ar e sem ar na cavidade ($L_1/2 = 0,375\text{mm}$ e $E = 12\mu\text{m}$).

A tabela 5-1 mostra os valores de frequência de ressonância obtidos nas posições 0, 10 e 18 mm (0mm é o centro do transdutor) e a tabela 5-2 os valores de deslocamentos encontrados. Foi calculado os respectivos erros entre os valores simulados e os valores experimentais. Considerando a tensão de polarização de 200 VDC e a tensão de excitação de 180 VAC.

Tabela 5-1 - Medições experimentais e valores simulados das frequências de ressonância.

Esp. (μm)	Valores experimentais de frequência (kHz)			Valores simulados de frequência (kHz) posição: 0,10,18mm	Erro (%) 0mm	Erro (%) 10mm	Erro (%) 18mm
	0mm	10mm	18mm				
12	66,2	65,9	63,1	66,6	0,6	1,01	5,5
20	59,3	59,8	57,4	60,1	1,3	0,5	4,7

Tabela 5-2 - Medições experimentais e valores simulados dos deslocamentos.

Esp. (μm)	Valores experimentais de deslocamentos calculado através dos valores de pressão (10^{-9} m)	Valores simulados de deslocamentos (10^{-9} m) no nó central	Erro (%)
12	1,95	2,11	8,2%
20	1,76	1,87	6,2%

Os valores de frequências de ressonâncias apresentaram erros maiores nas bordas estando esse fato relacionado com a sensibilidade do modelo à variação da pré-tensão. Os deslocamentos calculados com ambas as espessuras foram menores que os valores simulados, durante a aquisição dos valores de pressão a temperatura foi controlada a 20 °C e foi utilizado material de isolamento acústico, mas essas variações de pressão estão relacionadas as condições de medição.

5.2 Análises Acústicas

5.2.1 Valores de Pressão Acústica

A figura 5-7 apresenta os valores de pressão acústica no eixo acústico z. Os valores estão normalizados pelo maior valor experimental de pressão absoluta encontrado no plano XZ na verificação do transdutor com frequência de ressonância de 66,6 kHz. São comparados os valores obtidos pelos métodos analítico, numérico e experimental. Percebe-se que na região considerada de campo distante, isto é, maior

que 67mm os resultados obtidos pelos três métodos estão similares. Entretanto, na região de campo próximo, menor que 67mm, esses valores divergiram.

Na figura 5-8 foram mostrados os perfis de pressão transversal nas posições 50, 67, 100 e 150 mm do eixo z. Novamente os valores teóricos e experimentais mostraram-se similares. Na figura 5-9a) encontra-se o campo acústico simulado e na figura 5-9b) o campo acústico experimental, ambos os resultados se mostram parecidos no campo distante.

Figura 5-7 - Comparação das pressões no eixo acústico obtidos pelos métodos analítico, numérico e experimental para frequência de 66,6 kHz.

Figura 5-8 - Comparação numérica e experimental do perfil de pressão na direção transversal para a frequência de 66,6 kHz a) posição 50mm b) posição 67mm c) posição 100mm d) posição 150mm.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 5-9 - Campos acústicos normalizados a) simulado e b) experimental obtidos para um transdutor de 66,6 kHz.

(a)

(b)

A figura 5-10 apresenta os valores de pressão acústica normalizados (analítico, numérico e experimental) no eixo acústico z gerado pelo transdutor de 60,1 kHz. Para a região de campo distante, isto é, maior que 60mm, os valores teóricos, numéricos e experimentais se mostram similares

Entretanto nas regiões de campo próximo, menor que 60mm, esses valores divergiram. Na figura 5-11, são mostrados os perfis de pressão transversal nas posições 50, 60, 100 e 150 mm, cujos resultados mostraram-se muito próximos. Na figura 5-12a) encontra-se o campo acústico simulado e na figura 5-12b), o campo acústico experimental, ambos os resultados se mostram parecidos no campo distante.

Figura 5-10 - Comparação dos resultados analítico, numérico e experimental da pressão no eixo acústico para um transdutor de frequência de 60,1 kHz.

Figura 5-11 - Comparação numérica e experimental do perfil de pressão na direção transversal para a frequência de 60,1 kHz as posições: a) 50mm b) 60mm c) 100mm e d) 150mm.

Figura 5-12 - Campos acústicos normalizados a) simulado e b) experimental obtidos para um transdutor de 60,1 kHz.

As diferenças encontradas entre os valores de pressão simulados e experimentais no campo próximo, figuras 5-7, 5-9, 5-10 e 5-12, estão relacionadas ao fato que na região de campo próximo existe muita energia e ocorre superposição entre as ondas geradas na borda do transdutor e as ondas geradas por toda a face do transdutor (ondas diretas ou “planas”). O microfone utilizado possui diâmetro de 1/8", 3,18 mm, e os comprimentos de onda dos sinais medidos são 5,1 mm para 66,6 kHz e 5,7 mm para 60,1 kHz esse fato prejudica as medições no campo próximo.

5.2.2 Formação de uma Frequência Audível

O primeiro método para a geração da frequência audível, considera oito transdutores (quatro de 66,6 kHz e quatro de 60,1 kHz), com a configuração $\Delta x_1=100$, $\Delta x_2=300$, $\Delta y_1=100$, $\Delta x_2=100$ mm, conforme mostrado na figura 3-15d. A figura 5-13 mostra a transformada de Fourier, de um sinal obtido na posição $x=0$ $z=388$ mm com os valores em decibel (db). Sendo o limiar da audição $2 \cdot 10^{-5}$ Pa e o valor calculado por $P = 20 \log \left(\frac{P_{exp.}}{2 \cdot 10^{-5}} \right)$, sendo P_{exp} os valores obtidos de pressão acústica na posição $x=0$ $z=388$ mm do eixo acústico (simetria).

Figura 5-13 – Espectro de frequência do sinal medido na posição $x=0$ e $z=388\text{mm}$ no eixo de simetria, para a configuração de oito transdutores.

Nas figuras 5-14, 5-15 e 5-16 são apresentados a variação no tempo da amplitude de pressão normalizada, em 12 posições no plano XZ com $Y=0$, conforme tabela 5-3. O objetivo é verificar o comportamento do perfil de amplitudes de pressão e a formação de uma frequência audível. O equipamento de varredura trabalha com uma frequência de amostragem de 3 MHz, nos gráficos são mostrados valores de pressão até 750 μs . Foram representados apenas as posições da metade do campo devido à simetria. A normalização da amplitude de pressão é feita utilizando a maior amplitude de pressão encontrada.

Tabela 5-3 - Posições (x,z) do campo acústico para oito transdutores.

Eixo z (mm)				
x (mm)	(x=0,z=50)	(x=0,z=150)	(x=0,z=250)	(x=0,z=388)
	(x=-5,z=50)	(x=-5,z=150)	(x=-5,z=250)	(x=-5,z=388)
	(x=-10,z=50)	(x=-10,z=150)	(x=-10,z=250)	(x=-10,z=388)

Figura 5-14 - Variação no tempo da amplitude de pressão normalizada para oito transdutores nas posições $x=0\text{mm}$ e a) $z=50$ b) 150 c) 250 e d) 388mm.

Figura 5-15 - Variação no tempo da amplitude de pressão normalizada para oito transdutores nas posições $x=-5\text{mm}$ e a) $z=50$ b) 150 c) 250 e d) 388mm .

Figura 5-16 - Variação no tempo da amplitude de pressão normalizada para oito transdutores nas posições $x=-10\text{mm}$ e a) $z=50$ b) 150 c) 250 e d) 388mm .

Em seguida foi realizada a varredura do campo acústico na malha de 40 pontos na direção x e 400 pontos na direção z no plano XZ com $Y=0$. Com o sinal obtido foi realizada uma FFT dos valores e observado o campo acústico na frequência de 6,6 kHz, conforme figura 5-17a). Foi possível ouvir durante as verificações experimentais a frequência audível de 6,6 kHz na distância $z=400$ mm.

Figura 5-17 - Campo de pressão acústica normalizados na frequência de 6,6 kHz, formado com 8 transdutores.

A figura 5-13 mostra os valores de pressão nas frequências de 6,6 kHz e 130 kHz indicando a formação da frequência audível. As figuras 5-14, 5-15 e 5-16 mostram que os maiores valores de pressão normalizados estão concentrados entre os valores de $x=-5$ a 5 mm do plano XZ com $Y=0$. Contudo no tempo $t=0$, o valor se mostrou diferente (amplitude e fase) do valor de pressão simulado da figura 3-23c) e d). Essa diferença ocorreu devido a difração. Quando uma onda acústica se propaga através do meio sua amplitude e fase variam, devido à difração (BUIOCHI 1994; RISTIC, 1983; KINSLER, 1982; BLITZ, 1967; McSKMIN, 1960; SEIKI, 1956).

Comparando o campo acústico de 6,6 kHz gerado com a utilização de frequências ultrassônicas, figura 5-17a) e o campo acústico gerado sem a utilização dessas frequências, figura 5-17b). O campo da figura 5-17a) mostrou-se mais diretivo.

Para o segundo método foi utilizando apenas um transdutor que foi excitado com um sinal com modulação AM, usando o gerador de funções, tendo como onda portadora 60,1 kHz e como onda modulante 6,6 kHz. A figura 5-18 mostra a transformada de Fourier, de um sinal obtido na posição $x=0$ e $z=388$ mm com os valores em decibel (db). Sendo o limiar da audição $2 \cdot 10^{-5}$ Pa e o valor calculado por $P = 20 \log \left(\frac{P_{exp.}}{2 \cdot 10^{-5}} \right)$, sendo P_{exp} os valores obtidos de pressão acústica na posição $x=0$ e $z=388$ mm do eixo acústico.

Figura 5-18 - Espectro de frequência do sinal medido na posição $x=0$ e $z=388$ mm do eixo acústico, para um transdutor com portadora 60 kHz e modulante 6,6 kHz.

Nas figuras 5-19, 5-20 e 5-21 são apresentados a variação no tempo do da amplitude pressão normalizado, em 12 posições no plano XZ com $Y=0$, conforme tabela 5-4. O objetivo é verificar o comportamento do perfil de amplitudes de pressão e a formação de uma frequência audível. O equipamento de varredura trabalha com uma frequência de amostragem de 3 MHz, nos gráficos são mostrados valores de pressão até 750 μs . Foram representados apenas as posições da metade do campo devido à simetria. A normalização da amplitude de pressão é feita utilizando a maior amplitude de pressão encontrada.

Tabela 5-4 - Posições (x,z) do campo acústico para um transdutor.

x (mm)	Eixo z (mm)			
	(x=0,z=50)	(x=0,z=150)	(x=0,z=250)	(x=0,z=388)
	(x=-5,z=50)	(x=-5,z=150)	(x=-5,z=250)	(x=-5,z=388)
	(x=-10,z=50)	(x=-10,z=150)	(x=-10,z=250)	(x=-10,z=388)

Figura 5-19 - Variação no tempo da amplitude de pressão normalizada para um transdutor com portadora de 60,1 kHz nas posições $x=0$ mm e a) $z=50$ b) 150 c) 250 e d) 388 mm.

Figura 5-20 - Variação no tempo da amplitude de pressão normalizada para um transdutor com portadora de 60,1 kHz nas posições $x=-5\text{mm}$ e a) $z=50$ b) 150 c) 250 e d) 388mm.

Figura 5-21 - Variação no tempo da amplitude de pressão normalizada para um transdutor com portadora de 60,1 kHz nas posições $x=-10\text{mm}$ e a) $z=50$ b) 150 c) 250 e d) 388mm .

Foi realizada novamente a varredura do campo acústico na malha de 40 pontos na direção x e 400 pontos na direção z no plano XZ com $Y=0$. Foi realizada uma FFT desses valores e observado na frequência de 6,6 kHz a característica do campo acústico formado (figura 5-22a). Foi possível ouvir durante as verificações experimentais a frequência audível de 6,6 kHz na distância $z=400\text{ mm}$.

Figura 5-22 - Campo de pressão acústica normalizado de 6,6 kHz formado pela modulação de um transdutor com portadora 60 kHz e onda modulante de 6,6 kHz.

A figura 5-18 mostra os valores de pressão nas frequências de 6,6 kHz e 130 KHz indicando a formação da frequência audível. As figuras 5-19, 5-20 e 5-21 indica que os maiores valores de pressão normalizados estão concentrados entre os valores de $x=-5$ a 5 mm do plano XZ com $Y=0$. Contudo no tempo $t=0$, o valor se mostrou diferente do valor de pressão simulado da figura 3-20a) e b). Isso é devido a difração que alteram a amplitude e fase.

Comparando o campo acústico de 6,6 kHz gerado com a utilização de frequência com modulação AM, figura 5-22a) e o campo acústico gerado sem a utilização dessas frequências, figura 5-22b). O campo da figura 5-22a) mostrou-se mais diretivo.

5.2.3 Comparação entre os campos acústicos

Os campos acústicos gerados com oito transdutores e com um transdutor com modulação AM, são mais diretivos quando comparado ao campo de 6,6 kHz que não utiliza frequências ultrassônicas. Ambos os campos possuem os maiores valores de pressão próximos à região do eixo de simetria (eixo acústico) conforme observado na tabela 5-5 e figura 5-23a) e b).

A diretividade dos campos acústicos de frequência menor formado, gerados nas posições $z=50, 150, 250$ e 388 é mostrada na tabela 5-6 e nas figuras 5-24a) e b). O campo formado utilizando oito transdutores é mais diretivo contudo, o

valor de pressão acústica encontrado é igual para ambos os métodos, conforme pode ser verificado nas figuras 5-13 e 5-18. Isso ocorre devido ao campo de oito transdutores ter os valores máximos de pressão não localizados no eixo de simetria (eixo acústico), diferente do que ocorre para a utilização de um transdutor com modulação AM.

Tabela 5-5 - Comparação dos valores de amplitude pressão nas posições $x=0, -5, -10$ mm com $z=50, 150, 250, 388$ mm.

em x (mm)	Pressão máxima			
	(z=50mm)	(z=150mm)	(z=250mm)	(z=388mm)
Para 8 transdutores				
0	0,09	0,04	0,025	0,018
-5	0,07	0,03	0,021	0,017
-10	0,04	0,025	0,012	0,015
Para a portadora de 60 kHz				
0	0,75	0,4	0,25	0,15
-5	0,55	0,2	0,07	0,05
-10	0,2	0,15	0,06	0,04

Figura 5-23 - Verificação dos valores de amplitude de pressão nos pontos (x,z). a) para oito transdutores e b) para um transdutor com portadora de 60,1 kHz.

Tabela 5-6 - Valores de pressão para os ângulos $0^\circ, 22,5^\circ$ e $44,5^\circ$.

Ângulo ($^\circ$)	Pressão máxima			
	(z=50mm)	(z=150mm)	(z=250mm)	(z=388mm)
Para 8 transdutores				
0	0,85	0,7	0,6	0,4
22,5	0,6	0,4	0,3	0,2
44,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Para a portadora de 60 kHz				

0	0,75	0,85	0,7	0,4
22,5	0,65	0,2	0,5	0,2
44,5	0,45	0,3	0,2	0,08

Figura 5-24 - Comparação de valores de pressão nos ângulos 0° , $22,5^\circ$ e $44,5^\circ$ a) oito transdutores b) portadora de 60,1 kHz.

(a)

(b)

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

A simulação numérica mostrou-se satisfatória para a determinação dos parâmetros de projeto (frequência de ressonância e deslocamento da membrana). Os erros das frequências de ressonâncias variaram em torno de 3% e dos deslocamentos em 8 % quando comparados aos valores simulados. Isso é atribuído a variação da pré-tensão mecânica causada pela fixação da membrana que ao longo do experimento acaba perdendo as características de tensão inicial.

Verificou-se que a frequência de ressonância diminui e o deslocamento aumenta com o aumento da largura das ranhuras triangulares. Já com a diminuição da espessura de membrana, que resulta em uma redução da massa de oscilação, observa-se o aumento dos seguintes parâmetros: frequência de ressonância e deslocamento. A frequência de ressonância também varia considerando a tensão de polarização. Quanto maior a tensão de polarização, maior a frequência de ressonância.

A geração desses campos audíveis e diretivos, utilizando combinações entre frequências ultrassônicas, mostrou-se viável, contudo, o valor da pressão acústica gerada foi muito pequeno.

Foi possível ouvir a frequência menor em ambos os métodos estudados, com oito e com um transdutor com modulação AM de portadora de 60,1 kHz e modulante de 6,6 kHz. Em ambos os métodos o campo acústico formado desse sinal de 6,6 kHz, mostrou-se mais diretivo que o sinal de 6,6 kHz gerado sem a utilização de frequências ultrassônicas.

Sendo, portanto, possível gerar esses campos diretivos de dois modos. A utilização de oito transdutores apresentou uma maior amplitude e o campo formado pela onda de 6,6 kHz mais diretivo, quando comparado com a utilização de apenas um transdutor com uma onda portadora de 60,1 kHz e modulante de 6,6 kHz. Entretanto quando observado os valores de pressão conseguidos, ambos os métodos apresentaram valores próximos para o campo de frequência audível formado. Assim a utilização de apenas um transdutor se mostrou mais viável e de menor custo para desenvolvimento.

Nas simulações foi observado que distâncias menores entre os transdutores, produzia maiores amplitudes dos sinais e continuava formando a onda de frequência menor. Portanto, é possível reduzir o tamanho do elemento emissor, aproximando os transdutores e continuar gerando uma frequência audível.

Outro ponto observado é que para conseguir gerar a frequência menor com pares de frequências próximas, existe um limite, que a diferença entre as frequências seja menor que 20 kHz, isso foi observado nas simulações. As diretividades, no entanto, estão relacionados com as frequências, sendo que quando maior os pares de frequências utilizados mais diretivo será o campo formado.

Entretanto, quanto maiores as frequências utilizadas nas combinações, mais energia é preciso para gerar o campo de frequência menor. Isso está relacionado com a largura da ranhura que quanto menor a largura da ranhura, considerando as mesmas tensões aplicadas, menores serão os deslocamentos e maiores serão as frequências de ressonância.

A frequência audível formada usando a combinação de frequências ultrassônicas está relacionado a modulação que ocorre devido a propagação dos sinais no meio. O fato de ouvir uma frequência de 6,6 kHz indica a formação de uma onda e não apenas uma sensação auditiva explicada pelo fenômeno do batimento, que tem limite da percepção de 10Hz. Os valores de pressão acústica determinados nas verificações experimentais e comparados com as simulações divergiram, tal fato está relacionado ao mecanismo de modulação e de como ele afeta a formação da frequência audível, além da difração não considerado no modelo numérico.

Em relação ao circuito elétrico construído, ele foi capaz de aplicar simultaneamente as tensões de polarização de 200 VDC e a tensão de excitação de 180 VAC, protegendo os equipamentos. Entretanto um longo período de uso desse circuito provoca aquecimento prejudicando a verificação experimental.

6.2 Trabalhos Futuros

Verificação de como o transdutor responde para outras frequências e quais são as dificuldades e necessidades para conseguir gerar campos diretivos com todas as frequências, sendo assim possível reproduzir uma música completa.

Verificar como a modulação e refração afetam a formação das frequências menores, qual o valor da amplitude da pressão emitida na qual começa aparecer as frequências audíveis. Esse fato pode sugerir uma mudança no modelo numérico utilizado nas simulações acústicas, pois pressupomos na criação do modelo que ocorreriam pequenos distúrbios no meio de propagação (pequenos valores de pressão acústica). A utilização de grandes distúrbios pode fazer surgir não-linearidades devido as altas pressões emitidas no ar.

Assim através dessas verificações aumentar os valores de pressão. Isso poderia ser alcançado reprojetoando as cavidades dos transdutores capacitivos reduzindo sua profundidade, pois os transdutores têm como princípio de funcionamento os capacitores.

Outras abordagens para aumentar as pressões emitidas seriam: retirar o ar nas cavidades, pois o ar cria resistência a oscilação da membrana, utilizar maiores valores de tensões VDC e VAC. Mudar a forma de fixação da membrana, para reduzir as dificuldades em manter a pré-tensão, que tem grande influência nesse modelo. Além disso, deve-se reduzir as distâncias entre os transdutores e o tamanho dos transdutores, quando utilizando combinações de transdutores.

Em relação ao circuito amplificador desenvolvido deve-se buscar soluções ao aquecimento do circuito, por exemplo, utilizar componentes de melhor qualidade e desenvolver um sistema com aletas vinculado a um pequeno ventilador.

Posterior comparação de desempenho (distância da percepção do som e potência emitida, “balanço energético”), na geração de uma música utilizando os transdutores capacitivos diretivos e alto-falantes convencionais. Verificar a fidelidade na reprodução de música e o nível de distorção gerados. Realizar uma verificação de como os sinais ultrassônicos afetam as pessoas quando expostos ao um longo período.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMOWSKI, J. C.; SILVA, E. C. N.; SIMON, C.; BUIOCHI, F.; HIGUTI, R. T. Finite element modeling of an ultrasonic capacitive transducer. **In: IEEE International Ultrasonics Symposium**, Cannes, France, 1994.

ALLEN, J. J. **Micro Electro Mechanical System Design**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005.

ANSYS **User's Manual for revision 5.1.1**. Houston, PA: Swanson Analysis Systems, 1994.

AOKI, K. et al. A Parametric Loudspeaker: applied examples. **In: Electronics and Communications in Japan**, v. 77, n.1, p. 64-73, 1994.

BAKHVALOV, N. S. et al. Focused high-amplitude sound beams. **Soviet Physical Acoustics**, v. 24, n.1, p. 10-15, Jan-Feb 1978.

BAKHVALOV, N. S. et al. **Nonlinear Theory of Sound Beams**. New York: American Institute of Physics, 1987.

BATHE, K.J. **Finite Element Procedures in Engineering Analysis**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, New Jersey, 1982.

BELLIN, J. L. S.; BEYER R. T. Experimental Investigation of an end-fire array. **In: Journal of the Acoustical Society of America**, v. 34, n. 8 p. 1051-1054, August 1962.

BENNETT, M. B.; BLACKSTOCK, D. T. Parametric array in air. **In: Journal of the Acoustical Society of America**, v. 57, p. 562-568, 1975.

BERKTAY, H. O. Possible exploitation of nonlinear acoustics in underwater transmitting applications. **In: Journal of Sound and Vibration**, v. 2, n. 4, p. 435-461, 1965.

BLACKSTOCK, D. T. Audio application of the parametric array. **In: Meeting Of The Acoustical Society Of America**, 134, San diego, 1997.

BLITZ, J. **Fundamentals of Ultrasonics**, 2 ed. Plenum Press, New York, 1967

BONVICK, J. **Loudspeaker and Headphone Handbook Butterworth and Co**, 1988

BOZKURT, A.; LADABAUM, I.; ATALAR, A.; KHURI-YAKUB, B.T. Theory and analysis of electrode size optimization for capacitive microfabricated ultrasonic transducers. **In: IEEE Transactions on Ultrasound, Ferroelectrics, and Frequency Control**, vol. 46, pp.1364-1374, 1999.

BRADY, G.S. et al. **Materials Handbook**. 16. ed. New York: McGraw-Hill, 1986.

BUIOCHI, F.; ADAMOWSKI, J. C. ; MATUDA, M. Y. . Aplicación del Método de los Elementos Finitos en el Modelaje de un Transductor Ultrasónico Capacitivo. **Información Tecnológica (Impresa)**, Chile, v. 9, n.4, p. 305-311, 1998.

BUIOCHI, F. **Análise dos métodos de medição de densidade de líquidos por ultrassom**. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1994.

CANTRELL, J. H.; HEYMAN, J. S. Broadband electrostatic acoustic transducer for ultrasonic measurements in liquid. **In: Review of Scientific Instruments**, v. 50, n. 1, p. 31-33, Jan. 1979.

CERVENKA, M.; BEDNARIK M. Non-paraxial model for a parametric acoustic array. **In: Journal of the Acoustical Society of America**, v. 134, n. 2, August 2013.

CRETU, W. Y., ROHLING, R. E. Analytical modeling of CMUTs in coupled electro-mechano-acoustic domains using plate vibration theory. **In: Sensors Journal**, v. 11, n. 9, p. 2159 – 2168, 2011.

DEAN, L. W. Interactions between sound waves. **In: Journal of the Acoustical Society of America**, v. 34, n.8 p. 1039-1044, 1962.

DOUGLAS D. R. **Engineering principles of acoustics Noise and vibration control**. Boston: Allyn and Bacon, 1981.

ELFES, A. **Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation**. Computer, v. 22, n. 6, p. 46-47, 1989.

FREEDMAN, A. Sound field of a rectangular piston. **In: Journal of the Acoustical Society of America**, v. 32, n. 2, p. 197–209, 1960.

FURUKAWA, C. M; ADAMOWSK, J. C.; MOSCATO, L. A. Navegação de um veículo autônomo por ultrassom em ambientes estruturados. **In: Revista de Ciências Mecânicas**, v.14, n. 3, p. 286-301, 1993.

GAN, W.S.; YANG J. et al. A Review of parametric acoustic array in air. **In: Applied Acoustics**, v. 73, p. 1211–1219, 2012.

GRANDIA, W.A.; FORTUNKO, C.M. NDE Applications of air-coupled ultrasonic transducers. **In: IEEE Ultrasonics Symposium**, Seattle, Washington, 1995.

HARRIS, G. R. Review of transient field theory for a baffled planar piston. **In: Journal of the Acoustical Society of America**, v. 70, n. 1, p. 10–20, 1981.

HALLER, M. I.; KHURI-YAKUB, B. T. A surface micromachined electrostatic ultrasonic air transducer. **In: IEEE Ultrasonics Symposium**, Cannes Frances, 1994.

HAMILTON, M. F. et al. Nonlinear effects in the farfield of a directive sound source. **In: Journal of the Acoustical Society of America**, v. 78, n.1, p. 202-216, July 1985.

HAYWARD, G. Air Coupled NDE - Constraints and Solutions for Industrial Implementation. **In: IEEE Ultrasonics Symposium**, Ottawa, Canada, 1997.

HELMHOLTZ, H. L. F. **Combination_tones_in_violins**. Ann. Phys. Chem., 99, p. 497-540, 1856.

HIETANEN, J.; STOR-PELLINEN, J.; LUUKKALA, M. A Model for an electrostatic ultrasonic transducer with a grooved backplate. **In: Measurement Science and Technology**, v.3 n. 11, p.1095-1097,1992.

HIETANEN, J.; MATTLA, P; et al. Factors Affecting the Sensitivity of Electrostatic Ultrasonic Transducers. Measurement Science Techno **In: Measurement Science and Technology** logy 4(10): 1138-1142, 1993.

HOHM, D.; HESS, G. A subminiature condenser microphone with silicon nitride membrane and silicon backplate. **In: Journal of the Acoustical Society of America**, v. 85, p. 476-480, Jan. 1989.

HUNT, F. V. Electroacoustics: the analysis of transduction, and its historical background. New York. **In: Acoustical Society of America**, 1982.

INSTRUMATIC, <https://www.instrumatic.com.br> , acessado em 23/10/2020

JENSEN, J. A.; SVENDSEN, N. B. Calculation of pressure fields from arbitrarily shaped, apodized, and excited ultrasound transducers. **IEEE Transactions on Ultrasound, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 39, n. 2, p. 262-267, 1992.

KAMAKURA, Y.M.; IKEGAYA, T. K. Developments of parametric loudspeaker for practical use. **In: International Symposium Non Linear Acoustics**, 10., Kobe, Japan, 1984.

KINO, G. S. **Acoustics Waves: devices, imaging & analog signal Processing**. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1987.

KINSLER, L.E.; COPPENS, A.B.; FREY, A.R.; SANDERS, J.V. **Fundamentals of Acoustics**. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, 1982.

KUHL, W.; SCHODDER, G. R.; SCHODDER, F. K. Condenser transmitters and microphones with solid dielectric for airborne ultrasonics. **In: Acustica**, v.4 n.5, p. 519-532, 1954.

MASON, W. P. **Electromechanical Transducers and Wave Filters**. New York: D. Van Nostrand Company, p. 163-165, 193-195, 1942.

MATTILA, P.; TSUZUKI, F.; VAATAJA, H.; SASAKI, K. Electroacoustic model for electrostatic transducers with V-grooved backplates. **In: IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 42, n.1, p. 1-7, 1995.

McSKIMIN, H. J. "Empirical Study of Effect of Diffraction on Velocity of Propagation of High-Frequency Ultrasonic Waves". **In: J. Acoustic. Soc. Am**, v.32, p.1401-1404, 1960.

ORALKAN, O., et al. Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers: next generation arrays for acoustic imaging. **In: IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 49, n. 11, p. 1596-1610, 2002.

PARK, K. K.; LEE, H.; KUPNIK, M.; Khuri-Yakub, B. T. Fabrication of capacitive micromachined ultrasonic transducers via local oxidation and direct wafer bonding. **In: Journal of Microelectromechanical Systems**, v. 20, n.1, p. 95-103, 2011.

PIWAKOWSKI, B.; DELANNOY, B. Method for computing spatial pulse response: time-domain approach. **In: Journal of the Acoustical Society of America**, v. 86, n. 6, p. 2422-32, 1989.

POMPEI, F. J. The use of airborne ultrasonics for generating audible sound beams. **In: AES Convention**, 105, San Francisco, 1998.

POMPEI, J. **Sound from Ultrasound: the Parametric Array as an Audible Sound Source**. PhD thesis, School of Architecture and Planning, Massachusetts Institute of Technology, 2002.

RAFIQ, M.; WYKES, C. The Performance of Capacitive Ultrasonic Transducers Using V-Grooved Backplates. **In: Measurement Science and Technology**, v.2, n. 2, p. 168-174, 1991.

RAMALHO F.J. et al. **Os Fundamentos da Física**. São Paulo: Editora Moderna, v. 2, 2002. p. 481- 482, 2002.

ROBINSON, D.; S. LEES; BESS L. Near field transient radiation patterns for circular pistons. **In: IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing**, v. 22, n. 6, p. 395–403, 1974.

RAYLEGH, B. **The Theory of Sound**. 2. ed. S.I., Dover publication 2v, 1945.

RISTIC, V. M. **Principles of Acoustic Devices**. John Wiley & Sons, New York, USA, 1983.

SEIKI, H.; GRANATO, A.; TRUELL, R. “Diffraction Effects in the Ultrasonic Field of a Piston Source and Their Importance in the Accurate Measurement of Attenuation”. **In: J. Acoust. Soc. Am.**, v28, p230=238, 1956.

STEPANISHEN, P. R. An approach to computing time-dependent interaction forces and mutual radiation impedances between pistons in a rigid planar baffle. **In: Journal of Acoustical Society of America**, v. 49, n. 1B, p. 283-292, 1971.

STEPANISHEN, P. R. The time-dependent force and radiation impedance on a piston in a rigid infinite planar baffle. **In: Journal of Acoustical Society of America**, v. 49, n. 1 A, p. 841-849, 1971.

STEPANISHEN, P. R. Transient Radiation from Pistons in an Infinite Plane Baffle. **In: Journal of Acoustical Society of America**, v. 49, n. 5 B, p. 1629-1638, 1971.

STREMLER, F. **Introduction to Communications Systems**, Addison Wesley Publishing Company, third edition, 1992.

SUZUKI, K.; HIGUCHI, K.; TANIGAWA H. A silicon electrostatic ultrasonic transducer. **In: IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v.36, n. 6, p. 620-627, 1989.

TANAKA, H., MACHIDA, S., HASHIBA, K., KOBAYASHI, T. Acoustic characteristics of CMUT with rectangular membranes caused by higher order modes. **In: IEEE International Ultrasonics Symposium**, Rome, Italy, 2009.

TSUZUKI F.; KEN S.; MATTILA P. Research to Design Capacitive Ultrasonic Transducers, 1992.

TUPHOLME, G. Generation of Acoustic Pulses by Baffled Plane Pistons. **In: Mathematika**, v. 16, n. 2, p. 209–24, 1969.

WEAST, R. C. et al. **Handbook of Chemistry and Physics**. 66. ed. Boca Raton, CRC, 1985.

WEI, CHANG, M. M. et al. Polymer-based capacitive micromachined ultrasonic transducers (CMUT) for micro surgical imaging applications. **In: IEEE International Conference On Nano/Micro Engineered And Molecular Systems**, 1., Zhuhai, China, 2006.

WESTERVELT, P. J. Scattering Sound by Sound. **In: Journal of the Acoustical Society of America**, v. 29, n. 2, p. 199–203, 1957.

WESTERVELT, P. J. Parametric acoustic array. **In: Journal of the Acoustical Society of America**, v. 35, n. 4, p. 535-537, 1963.

WYGANT, I. O.; KUPNIK, M; WOCHNER, M. S. et al. The Design and characterization of capacitive micromachined ultrasonic transducers (CMUTs) for generating high-Intensity ultrasound for transmission of directional audio. **In: IEEE International Ultrasonics Symposium**, Beijing, China, 2008.

WYGANT, I. O.; KUPNIK, M; WOCHNER, M. S. et al. 50 kHz capacitive micromachined ultrasonic transducers for generation of highly directional sound with parametric arrays. **In: IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 56, n. 1, p. 193-203, Jan. 2009.

YONEYAMA, M. et al. The Audio Spotlight: an application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design. **In: Journal of the Acoustical Society of America**, v. 73, n.5, p.1532-1536, May 1983.

ZEMANEK, J. Beam behavior within the nearfield of a vibrating piston. **In: Journal of Acoustical Society of America**, v. 49, n. 1 B, p. 181-191, 1971.

ZHANG, R. et al. Numerical modelling for the optimization of multi-element, capacitive, ultrasonic, air-coupled transducer. **In: Journal of Physics Conference Series**, v. 457, n. 1, p. 1-11, 2013.

APÊNDICE A - Rotinas do matlab para simulação do campo acústico

```
% Programa 1
% Calcula o campo acústico resultante de 2 transdutores circulares com
% apodização
% concêntricas, considerando excitação harmônica. Usado para simular os
% campos gerados por transdutores capacitivos com ranhuras concêntricas
% (com apodização) ou por pistões rígidos (sem apodização).
%
% 12/07/2019 Flávio Buiocchi e Manlius

clear all
close all
clc

%Tdx1
a1 = 37e-3/2; % Raio do Tx1 (m) é ajustado em montaTx.m dado o
comprimento da ranhura definido no ANSYS
f1 = 66600; %frequência (Hz)
xTx1=-50e-3; % coords. do centro do trasdutor 1, xTx1 e yTx1 (m)
yTx1=+0;
arqAnsys1='desloc.txt';

%Tdx2
a2 = 37e-3/2; % Raio do Tx2 (m) é ajustado em montaTx.m dado o
comprimento da ranhura definido no ANSYS
f2 = 60000; %frequência (Hz)
xTx2=+50e-3; % coords. do centro do trasdutor 2 (xTx2, yTx2)
yTx2=+0;
arqAnsys2='desloc2.txt';

%Tdx3
a1 = 37e-3/2; % Raio do Tx1 (m) é ajustado em montaTx.m dado o
comprimento da ranhura definido no ANSYS
f1 = 60000; %frequência (Hz)
xTx3=-50e-3; % coords. do centro do trasdutor 1, xTx1 e yTx1 (m)
yTx3=-50e-3;
arqAnsys1='desloc2.txt';

%Tdx4
a2 = 37e-3/2; % Raio do Tx2 (m) é ajustado em montaTx.m dado o
comprimento da ranhura definido no ANSYS
f2 = 66600; %frequência (Hz)
xTx4=+50e-3; % coords. do centro do trasdutor 2 (xTx2, yTx2)
yTx4=+50e-3;
arqAnsys1='desloc.txt';

% %Tdx5
% a1 = 37e-3/2; % Raio do Tx1 (m) é ajustado em montaTx.m dado o
comprimento da ranhura definido no ANSYS
% f1 = 66600; %frequência (Hz)
% xTx5=+50e-3; % coords. do centro do trasdutor 1, xTx1 e yTx1 (m)
% yTx5=+100e-3;
% arqAnsys1='desloc.txt';
%
% %Tdx6
% a2 = 37e-3/2; % Raio do Tx2 (m) é ajustado em montaTx.m dado o
comprimento da ranhura definido no ANSYS
```

```

% f2 = 60000; %frequência (Hz)
% xTx6=-50e-3; % coords. do centro do trasdutor 2 (xTx2, yTx2)
% yTx6=+100e-3;
% arqAnsys2='desloc2.txt';
%
% %Tdx7
% arq=1;
% a1 = 37e-3/2; % Raio do Tx1 (m) é ajustado em montaTx.m dado o
comprimento da ranhura definido no ANSYS
% f1 = 66600; %frequência (Hz)
% xTx7=+50e-3; % coords. do centro do trasdutor 1, xTx1 e yTx1 (m)
% yTx7=-100e-3;
% arqAnsys1='desloc.txt';
%
% %Tdx8
% a2 = 37e-3/2; % Raio do Tx2 (m) é ajustado em montaTx.m dado o
comprimento da ranhura definido no ANSYS
% f2 = 60000; %frequência (Hz)
% xTx8=-50e-3; % coords. do centro do trasdutor 2 (xTx2, yTx2)
% yTx8=-100e-3;
% arqAnsys2='desloc2.txt';

c = 343.4; %veloc. de prop. a 20°C (m/s)
rho = 1.2754 ; % densidade ar
Ndiam = 636; %número de pontos no diâmetro do tdx para formar elementos
quadrados
Ndiam2 = 636;
apodizacao = 1; % Se apodizacao=1 => com apodização
%OU se apodizacao=0 => sem apodização (PISTÃO
RÍGIDO)

% malha usada no cálculo do campo acústico
xP = linspace(-200e-3,200e-3,201); %coordenadas x do campo acústico
yP = 0; % calcula somente no plano (xP,zP)
zP = linspace(1e-3,400e-3,200); %coordenadas z do campo acústico
[XP,ZP] = meshgrid(xP,zP); %define o conjunto de pontos numa malha
retangular

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calculando o campo acústico
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% 1Monta as variáveis usadas no cálculo da pressão para o Tx1
[a1, dS1, x1, y1, di1] = montaTx(a1, Ndiam, apodizacao, xTx1, yTx1,
arqAnsys1);
% 2Monta as variáveis usadas no cálculo da pressão para o Tx2
[a2, dS2, x2, y2, di2] = montaTx2(a2, Ndiam2, apodizacao, xTx2, yTx2,
arqAnsys2);
% 3Monta as variáveis usadas no cálculo da pressão para o Tx3
[a2, dS2, x3, y3, di2] = montaTx2(a2, Ndiam2, apodizacao, xTx3, yTx3,
arqAnsys2);
% 4Monta as variáveis usadas no cálculo da pressão para o Tx4
[a1, dS1, x4, y4, di1] = montaTx(a1, Ndiam, apodizacao, xTx4, yTx4,
arqAnsys1);
% % 5Monta as variáveis usadas no cálculo da pressão para o Tx5
% [a1, dS1, x5, y5, di1] = montaTx(a1, Ndiam, apodizacao, xTx5, yTx5,
arqAnsys1);
% % 6Monta as variáveis usadas no cálculo da pressão para o Tx6

```

```

% [a2, dS2, x6, y6, di2] = montaTx2(a2, Ndiam2, apodizacao, xTx6,
yTx6, arqAns2);
% % 7Monta as variaveis usadas no cálculo da pressão para o Tx7
% [a1, dS1, x7, y7, di1] = montaTx(a1, Ndiam, apodizacao, xTx7, yTx7,
arqAns1);
% % 8Monta as variaveis usadas no cálculo da pressão para o Tx8
% [a2, dS2, x8, y8, di2] = montaTx2(a2, Ndiam2, apodizacao, xTx8,
yTx8, arqAns2);
%

%Calculando a pressão em cada ponto P do campo ao longo do eixo z p/t=0
for m=1:length(zP)
    %if ~mod(m,50), m, end % mostra que o programa está sendo executado
    m
    for n=1:length(xP)
        % pressao no campo devido ao Tx1
        RiP1 = sqrt((x1-XP(m,n)).^2 + (y1-yP).^2 + ZP(m,n)^2); %vetor
das distâncias dos elementos dSi até o ponto P
        PtoP1(m,n)=sum((j * 2*pi*f1*f1 * rho * dS1 * di1 .*exp(j * 2 *
pi * f1 * RiP1 / c)) ./RiP1);%pressão no ponto P
        % pressao no campo devido ao Tx2
        RiP2 = sqrt((x2-XP(m,n)).^2 + (y2-yP).^2 + ZP(m,n)^2); %vetor
das distâncias dos elementos dSi até o ponto P
        PtoP2(m,n)=sum((j * 2*pi*f2*f2 * rho * dS2 * di2 .*exp(j * 2 *
pi * f2 * RiP2 / c)) ./RiP2);%pressão no ponto P

        % pressao no campo devido ao Tx3
        RiP3= sqrt((x3-XP(m,n)).^2 + (y3-yP).^2 + ZP(m,n)^2); %vetor
das distâncias dos elementos dSi até o ponto P
        PtoP3(m,n)=sum((j * 2*pi*f2*f2 * rho * dS2 * di2 .*exp(j * 2 *
pi * f2 * RiP3 / c)) ./RiP3);%pressão no ponto P
        % pressao no campo devido ao Tx4
        RiP4 = sqrt((x4-XP(m,n)).^2 + (y4-yP).^2 + ZP(m,n)^2); %vetor
das distâncias dos elementos dSi até o ponto P
        PtoP4(m,n)=sum((j * 2*pi*f1*f1 * rho * dS1 * di1 .*exp(j * 2 *
pi * f1 * RiP4 / c)) ./RiP4);%pressão no ponto P

        % pressao no campo devido ao Tx5
        RiP5 = sqrt((x5-XP(m,n)).^2 + (y5-yP).^2 + ZP(m,n)^2); %vetor
das distâncias dos elementos dSi até o ponto P
        PtoP5(m,n)=sum((j * 2*pi*f1*f1 * rho * dS1 * di1 .*exp(j * 2
* pi * f1 * RiP5 / c)) ./RiP5);%pressão no ponto P
        % pressao no campo devido ao Tx6
        RiP6 = sqrt((x6-XP(m,n)).^2 + (y6-yP).^2 + ZP(m,n)^2); %vetor
das distâncias dos elementos dSi até o ponto P
        PtoP6(m,n)=sum((j * 2*pi*f2*f2 * rho * dS2 * di2 .*exp(j * 2
* pi * f2 * RiP6 / c)) ./RiP6);%pressão no ponto P
        %
        % pressao no campo devido ao Tx7
        RiP7 = sqrt((x7-XP(m,n)).^2 + (y7-yP).^2 + ZP(m,n)^2); %vetor
das distâncias dos elementos dSi até o ponto P
        PtoP7(m,n)=sum((j * 2*pi*f1*f1 * rho * dS1 * di1 .*exp(j * 2
* pi * f1 * RiP7 / c)) ./RiP7);%pressão no ponto P
        % pressao no campo devido ao Tx8
        RiP8 = sqrt((x8-XP(m,n)).^2 + (y8-yP).^2 + ZP(m,n)^2); %vetor
das distâncias dos elementos dSi até o ponto P
        PtoP8(m,n)=sum((j * 2*pi*f2*f2 * rho * dS2 * di2 .*exp(j * 2
* pi * f2 * RiP8 / c)) ./RiP8);%pressão no ponto P
        %
    end
end

```

```

end

PtoP = abs(PtoP1 + PtoP2 + PtoP3 + PtoP4 ); % + PtoP5 + PtoP6 + PtoP7 +
PtoP8); % Somando os campos resultantes dos Txs 1 e 2
PtoP = PtoP/max(max(PtoP)); %Normalizando a pressão

% Gera o gráfico do campo acústico
figure(4)
surf(ZP*1e3, XP*1e3, PtoP);
title ({' 66/66 Khz - alternado '},'FontSize',12);
ylabel({'x(mm)'},'FontSize',12);
xlabel({'z (mm)'},'FontSize',12);
%xlim ([0 250]);
%axis tight image;
view(0,90);
colormap(jet);
colorbar;
shading interp;

```

```

%Programa 2
function [a, dS, x, y, di] = montaTx(a, Ndiam, apodizacao, xTx, yTx,
arqAnsys)
%
% Define as posições e os deslocamentos da face do transdutor
capacitivo c/ ranhuras concêntricas
%
% ENTRADA:
% a = Raio do transdutor (m) - ajustado ao comprimento da ranhura
adotado
% Ndiam = número de pontos no diâmetro do transdutor
% apodizacao=1 (com apodização) e apodizacao=0 (sem apodização=PISTÃO
RÍGIDO)
% (xTx, yTx) = coordenadas do centro do transdutor
% arqAnsys = carrega o deslocamento para meia ranhura (L/2),
% onde 1a. coluna = coord. x e 2a.coluna =
deslocamento
%
% SAÍDA:
% a = Raio do transdutor ajustado para a ranhura
% dS = área da discretização
% x, y = vetores das coordenadas de cada elemento de área dS
% di = vetor dos deslocamento de cada elemento de área dS
%
% 12/07/2019 Flávio Buiocchi e Manlius
%
% a = 37e-3/2; % Raio do transdutor (m) é ajustado no programa
para o
% % comprimento da ranhura adotado
% Ndiam = 301; %número de pontos no diâmetro para formar elementos
quadrados
% apodizacao = 1; % Se apodizacao=1 => com apodização
% %OU se apodizacao=0 => sem apodização (PISTÃO RÍGIDO)
% xTx = 0;
% yTx = 0;
% arqAnsys = 'desloc.txt';

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
```

```

%%%%%%%%%%%% carrega o deslocamento e calcula o perfil no Tx
%%%%%%%%%%%%
if apodizacao == 1
    load(arqAnsys); %carrega o deslocamento na membrana para meia
    ranhura (L/2)
    %1a. coluna: coord. x / 2a.coluna:deslocamento

    posRanhura = desloc(:,1); %posição ao longo da meia ranhura
    dRanhura = desloc(:,2); %deslocamento na membrana para meia ranhura

    posMin = min(posRanhura); %menor coord. x do Ansys na meia ranhura
    posMax = max(posRanhura); %maior coord. x do Ansys na meia ranhura
    meioL = posMax - posMin; %comprimento de meia ranhura (L/2)
    Nranhuras = round((a-meioL)/(2*(posMax-posMin))); %número de
    ranhuras
    %inteiras ao longo do Raio.

    % ranhura central = meia ranhura - cpr. L/2 ( | / )
    posRaio0 = posRanhura - posMin; %inicia em 0 e termina em L/2
    dRaio0 = dRanhura; %deslocamento de metade da ranhura no centro do
    Tx
    % ranhura inteira - cpr. L ( \ / )
    posRaio1=[posRaio0; (posRaio0(end)+posRaio0(2:end))]; %inicia em 0
    e termina em L
    dRaio1=[flip(dRanhura); dRanhura(2:end)]; %desloc. ao longo da
    ranhura de cpr. L

    posRaio = posRaio0;
    dRaio = dRaio0;
    for i=1:Nranhuras %construindo ranhuras ao longo do Raio (
    |/\//\...\//\ )
        posRaio = [posRaio; (posRaio(end)+posRaio1(2:end))];
        dRaio = [dRaio; dRaio1(2:end)];
    end
    figure(2)
    plot(posRaio*1e3,dRaio*1e6,'.')
    title('Deslocamento ao longo do Raio (obtido do Arq. Ansys)')
    xlabel('raio (mm)')
    ylabel('deslocamento (\mu m)')
end

% considerando pistão rígido (sem apodização)
if apodizacao == 0 %usei essa solução para VALIDAR O PROGRAMA
    posRaio=[0; a]; %posição inicial '0' e final 'a' ao longo do raio
    dRaio=[1; 1]; %considera deslocamento 1 para todos os pontos do
    emissor
end

%%%%%%%%%%%%
%
%
%ajustando o raio e a discretizando o emissor
%

a = posRaio(end) %comprimento máximo do raio ajustado com as ranhuras
x = linspace(-a,a,Ndiam);
y = linspace(-a,a,Ndiam);
[X,Y] = meshgrid(x,y); %define o conjunto de pontos numa malha
retangular
dx = abs(x(2)-x(1)); %tamanho dos elementos na direção x

```



```

dy = abs(y(2)-y(1)); %tamanho dos elementos na direção y

x=reshape(X,[prod(size(X)) 1]); %transforma em vetor as coords. x
y=reshape(Y,[prod(size(Y)) 1]); %transforma em vetor as coords. z

r = sqrt(x.^2 +y.^2); %determina o raio de cada ponto do emissor
vetor = r <= a; %escolhendo somente os pontos do emissor de raio a
Indices = find(vetor);
x = x(Indices);
y = y(Indices);
r = r(Indices);
x = x + xTx; % deslocando as coords. dos elementos de área dS usando
as coords. do centro do Tx (xTx, yTx).
y = y + yTx;

figure(1)
plot(x*1e3,y*1e3,'.')
title('Geometria do emissor')
xlabel('x (mm)')
ylabel('y (mm)')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% interpolando deslocamentos em cada ponto do emissor
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

di = abs(interp1(posRaio,dRaio,r)); %vetor di de deslocamentos
interpolados a partir
% do vetor r que define o raio de todos os pontos do emissor. Considera
% deslocamentos positivos.
dS = dx*dy; %calcula o infinitésimo de área de cada ponto do emissor.

if 1 %Para plotar, deve-se ajustar o número de pontos para se ter y=0
    vetor = y == 0; %procura os valores de y valem zero.
    Indices = find(vetor);
    px = x(Indices);
    pdi = di(Indices);
    figure(3)
    plot(px,pdi,'.-'), grid
    title('Deslocamentos interpolados ao longo do diâmetro p/ y=0')
    xlabel('x(mm)')
end

```

```

%Programa 3
% Calcula a propagação da onda ao longo do eixo acústico (mostrando o
"batimento")
% considerando a onda resultante de 2 transdutores circulares com
apodização
% concêntricas e excitação harmônica. Usado para simular os
% campos gerados por transdutores capacitivos com ranhuras concêntricas
% (com apodização) ou por pistões rígidos (sem apodização).
%
% 03/12/2019 Flávio Buiochi e Manlius

clear all
close all

```

```

clc

a1 = 37e-3/2; % Raio do Tx1 (m) é ajustado em montaTx.m dado o
comprimento da ranhura definido no ANSYS
f1 = 66600; %frequência (Hz)
xTx1=0; % coords. do centro do trasdutor 1, xTx1 e yTx1 (m)
yTx1=0;
arqAnsys1='desloc.txt';

a2 = 37e-3/2; % Raio do Tx2 (m) é ajustado em montaTx.m dado o
comprimento da ranhura definido no ANSYS
f2 = 60000; %25899; %frequência (Hz)
xTx2=0; % coords. do centro do trasdutor 2 (xTx2, yTx2)
yTx2=0;
arqAnsys2='desloc2.txt';

c = 343.4; %veloc. de prop. a 20°C (m/s)
rho = 1.2754 ; % densidade ar
Ndiam = 636; %146; %342; %1126;636 %número de pontos no diâmetro para
formar elementos quadrados
Ndiam2 = 636; %146; %342;
apodizacao = 1; % Se apodizacao=1 => com apodização
%OU se apodizacao=0 => sem apodização (PISTÃO
RÍGIDO)

% malha usada no cálculo do campo acústico
xP = 0; % linspace(-100e-3,100e-3,100); %coordenadas x do campo
acústico
yP = 0; % calcula somente no plano (xP,zP)
zP = linspace(250e-3,450e-3,200); %coordenadas z do campo acústico
[XP,ZP] = meshgrid(xP,zP); %define o conjunto de pontos numa malha
retangular

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calculando o campo acústico
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Monta as variáveis usadas no cálculo da pressão para o Tx1
[a1, dS1, x1, y1, di1] = montaTx(a1, Ndiam, apodizacao, xTx1, yTx1,
arqAnsys1);
% Monta as variáveis usadas no cálculo da pressão para o Tx2
[a2, dS2, x2, y2, di2] = montaTx2(a2, Ndiam2, apodizacao, xTx2, yTx2,
arqAnsys2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%W1=0;
%W2=0;
faudivel = f1 - f2;
Taudivel = 1/faudivel;
%dt = Taudivel/100;
t = linspace(0, Taudivel, 100);
W1 = 2*pi*f1;
W2 = 2*pi*f2;

for jj=1:length(t)
    jj
    %Calculando a pressão em cada ponto P do campo ao longo do eixo z p/#ts

```

```

for m=1:length(zP)
    %if ~mod(m,50), m, end % mostra que o programa está sendo executado
    %m
    for n=1:length(xP)
        % pressao no campo devido ao Tx1
        RiP1 = sqrt((x1-XP(m,n)).^2 + (y1-yP).^2 + ZP(m,n)^2); %vetor
das distâncias dos elementos dSi até o ponto P
        PtoP1(m,n)=sum((1i * 2*pi*f1*f1 * rho * dS1 * di1 .*exp(-1i * 2
* pi * f1 * RiP1 / c)*exp(1i*W1*t(jj)))./RiP1);%pressão no ponto P
        % pressao no campo devido ao Tx2
        RiP2 = sqrt((x2-XP(m,n)).^2 + (y2-yP).^2 + ZP(m,n)^2); %vetor
das distâncias dos elementos dSi até o ponto P
        PtoP2(m,n)=sum((1i * 2*pi*f2*f2 * rho * dS2 * di2 .*exp(-1i * 2
* pi * f2 * RiP2 / c)*exp(1i*W2*t(jj)))./RiP2);%pressão no ponto P
        end
    end
    PtoP = PtoP1 + PtoP2; % Somando os campos resultantes dos Txs 1 e 2
    %PtoPA=(PtoP1); % + PtoP2);
    %PtoP = PtoP/max(max(PtoP)); %Normalizando a pressão
    PtoPtempo(jj,:)=real(PtoP)';
end

    I=find(zP==388e-3); %Ponto que vamos visualizar a variação da pressão
    plot(t,PtoPtempo(:, I))
    for I=1:201, plot(t, PtoPtempo(:, I)), xlabel('t(s)'), pause, end %
    pressão variando em cada posição do eixo acústico função tempo
    %PtoPtempo = PtoPtempo/max(max(PtoPtempo)); %Normalizando a pressão
    for I=1:101,
        figure(100)
        plot(zP*1e3, PtoPtempo(I, :)) % distribuição da pressão ao longo do
eixo acústico em instantes diferentes
        xlabel('z(mm)')
        title(['instante = ', num2str(t(I)), ' s'])
        pause(0.1)
    end

% Programa diretividade
clear all
clc
% Dados iniciais
f=6600;
z = -90:1:90;
l=degtorad(z);
i=1;
p=numel(z);
a=37e-3/2;
J=zeros(1,p);
d=zeros(1,p);
lamb=343.4/f;

for k =1:p
    d(k)=(2*pi/lamb)*a*sin(l(k));
end

for k= 1:p
    J(k) = 10*(log10(((2*(besselj(i,d(k)))/d(k))^2)));
end

% J=J/max(J);
% z=z*pi/180;

```

```

% Padrão de radiação
figure(1)
plot(z, J, 'k')
xlabel('Angulo °')
ylabel('Amplitude dB')
grid on
set(gca, 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 12)
%title(['Diretividade ' num2str(f) ' kHz']);
title(['Diretividade 6,6 kHz']);
xlim([-90 90])
ylim([-10 0])
%set(gca, 'XTick', [-90 -45 0 45 90])
set(gca, 'YTick', [-10 -5 0])

```

APÊNDICE B - Códigos APDL Para Simulação Do ANSYS

Passos da análise:

!Arquivo de parâmetros

!VARIÁVEIS PARA TODOS OS MODELOS

E=12E-6 !ESPESSURA DA MEMBRANA

!E=20E-6 !E=12E-6 (material: polyester MYLAR)

!Coef_d=(Diam_f)/0.75 !Compensar o aumento do diâmetro

Y=2.3E9 !MODULO DE ELASTICIDADE DA MEMBRANA

!Y=3E9 !Y= 2.3E9 !p/ 12E-6 de espessura e diâmetro 0.75mm - livro

!Y= 2.8E9 !p/ 12E-6 de espessura e diâmetro 0.75mm - fabricante 1

!Y= 3.7E9 !p/ 12E-6 de espessura e diâmetro 0.75mm - fabricante 2

!Y= 3E9 !p/ 20E-6 de espessura e diâmetro 0.75mm - livro

!Y= 4.75E9 !p/ 20E-6 de espessura e diâmetro 0.75mm - fabricante 1

!Y= 5.65E9 !p/ 20E-6 de espessura e diâmetro 0.75mm - fabricante 2

DEN=1418 !DENSIDADE DA MEMBRANA

!DEN=1637 !DEN= 1418 !p/ 12E-6 de espessura e diâmetro 0.75mm - livro

!DEN= 1718 !p/ 12E-6 de espessura e diâmetro 0.75mm - fabricante 1

!DEN= 2035 !p/ 12E-6 de espessura e diâmetro 0.75mm - fabricante 2

!DEN= 1637 !p/ 20E-6 de espessura e diâmetro 0.75mm - livro

!DEN= 2458 !p/ 20E-6 de espessura e diâmetro 0.75mm - fabricante 1

!DEN= 2732 !p/ 20E-6 de espessura e diâmetro 0.75mm - fabricante 2

```

VELOC1_1=346.8

NOS=32    !QUANTIDADE DE NÓS DA MEMBRANA (variável quantidade de elemtos)

LDIV=4    !QUANTIDADE DE DIVISÕES NA MENOR PARTE DA MEMBRANA

MDIV=3    !QUANTIDADE DE DIVISÕES NA ESPESSURA DA MEMBRANA

COEF_M=   !FATOR QUE MULTIPLICA LDIV PARA CONVERGÊNCIA

VDC=200   !TENSÃO DE POLARIZAÇÃO

Hcons=3.75E-4

! CONTROLADORES -----
K1=0      ! Controlador altura
J1=1      ! Controlador altura

K=0       ! Controladores da membrana
J=1       ! Controladores da membrana

S=0       ! Controladores NÓS !!!inverte \\para 3e-3
M=1       ! Controladores NÓS !!!inverte \\para 3e-3

S1=0      ! CONTROLADOR DA TENSÃO
M1=1      ! CONTROLADOR DA TENSÃO

! *****Análise estática*****
!pret=0    !desliga a pre-tensão
pret=1     !liga a pre-tensão

!Ar=0      !tira ar na membrana
!Ar=1      !coloca ar na membrana
Ar=2       !coloca 10% de ar na membrana

COND1=0    !Sem pretensão e sem ar (1 liga e zero desliga)
COND2=0    !Sem pretensão e com ar
COND2A=0   !Sem pretensão e com ar 10%
COND3=0    !Com pretensão e sem ar
COND4=0    !Com pretensão e com ar
COND4A=1   !Com pretensão e com ar 10%

!CONTROLADORES DA ESPESSURA DA MEMBRANA
A_1=E
A_2=E
A_3=E
A_4=E
A_5=E
A_6=E

B_1=Y
B_2=Y
B_3=Y
B_4=Y
B_5=Y
B_6=Y

C_1=DEN
C_2=DEN
C_3=DEN
C_4=DEN
C_5=DEN
C_6=DEN

```

```

! CONTROLADORES DA QUANTIDADEDE NÓS
D_1=NOS
D_2=NOS
D_3=NOS
D_4=NOS
D_5=NOS
D_6=NOS

F_1=LDIV
F_2=LDIV
F_3=LDIV
F_4=LDIV
F_5=LDIV
F_6=LDIV

G_1=MDIV
G_2=MDIV
G_3=MDIV
G_4=MDIV
G_5=MDIV
G_6=MDIV

! CONTROLADORES DA TENSÃO
T_1=VDC
T_2=VDC
T_3=VDC
T_4=VDC
T_5=VDC
T_6=VDC

!*****
!1Eletrostática
!*****
!-----
!1Meia Membrana Triangular
!-----

!1
!Variáveis comum à todas, mas com seus valores variando
!L_1=25E-4
L_1=7.5E-4

H_1=(L_1/2)*K1 +(Hcons)*J1

E_1=(12E-6)*K+A_1*J    !ESPESSURA DA MEMBRANA

Y_1=(2.3E9)*K+B_1*J    !MODULO DE ELASTICIDDAE DA MEMBRANA

DEN_1=(1418)*K+C_1*J    !DENSIDADE DA MEMBRANA

VDC_1=(200)*S1+T_1*M1    ! TENSÃO DC - POLARIZACAO

PEP_1=19E-12            !PERMISSIVIDADE ELETRICA DO PLÁSTICO (MEMBRANA)

PEA_1=8.859E-12         ! PERMISSIVIDADE ELETRICA DO AR
BULK_1=1.42E5            ! BULK MODULO DO AR
DENAR_1=1.2              ! DENSIDADE DO AR (26.7 oC) 1.1774 - MAIS PRECISO
                        !1.2 (20 oC)

RM_1=10E-3              ! RAO MEDIO DA RANHURA
V_1=0.4                  ! COEFICIENTE DE POISSON DA MEMBRANA

!-----
! NUMERO DE DIVISÕES
!-----

```

$NOS_1=(40)*S+D_1*M$!NOS ao longo da Membrana
 $LDIV_1=(5)*S+F_1*M$! NUMERO DE DIVISÕES NAS LINHAS EM GERAL
 $MDIV_1=(3)*S+G_1*M$! NUMERO DE DIVISÕES DA MEMBRANA NA ESPESSURA
 $LDIV2_1=LDIV_1*COEF_M$! NUMERO DE DIVISÕES NAS LINHAS INTERMEDIARIAS
 $ESPACAM_1=2.5$! ESPAÇAMENTO NAS LINHAS INTERMEDIARIAS
 $ESPACAM2_1=5$! ESPAÇAMENTO NAS LINHAS INTERMEDIARIAS
 $DX_1=L_1/24$!ou $DX=L_1/16$

!2
!Variáveis comum à todas, mas com seus valores variando
! $L_2=30E-04$
! $L_2=10E-04$

 $H_2=(L_2/2)*K1+(Hcons)*J1$
 $E_2=(12E-6)*K+A_2*J$!ESPESSURA DA MEMBRANA
 $Y_2=(2.3E9)*K+B_2*J$!MODULO DE ELASTICIDDAE
 $DEN_2=(1418)*K+C_2*J$!DENSIDADE DA MEMBRANA
 $VDC_2=(200)*S1+T_2*M1$! TENSÃO DC - POLARIZACAO

 $PEP_2=33.2E-12$! PERMISSIVIDADE ELETRICA DO PLÁSTICO (MEMBRANA)
! $33.2E-12$ (Emílio)
! $32.5E-12$

 $PEA_2=8.859E-12$! PERMISSIVIDADE ELETRICA DO AR
 $BULK_2=1.42E5$! BULK MODULO DO AR
 $DENAR_2=1.2$! DENSIDADE DO AR (26.7 oC)

 $RM_2=10E-3$! RAO MEDIO DA RANHURA
 $V_2=0.4$! COEFICIENTE DE POISSON

!-----
! NUMERO DE DIVISÕES
!-----
 $NOS_2=(2035)*S+D_2*M$!NOS ao longo da Membrana
 $LDIV_2=(212)*S+F_2*M$! NUMERO DE DIVISÕES NAS LINHAS EM GERAL
 $MDIV_2=(16)*S+G_2*M$! NUMERO DE DIVISÕES DA MEMBRANA NA ESPESSURA
 $LDIV2_2=LDIV_2*COEF_M$! NUMERO DE DIVISÕES NAS LINHAS INTERMEDIARIAS

 $ESPACAM_2=2.5$! ESPAÇAMENTO NAS LINHAS INTERMEDIARIAS
 $ESPACAM2_2=5$! ESPAÇAMENTO NAS LINHAS INTERMEDIARIAS

 $DX_2=L_1/24$!ou $DX=L_2/16$

!3
!Variáveis comum à todas, mas com seus valores variando
! $L_3=35E-4$
! $L_3=13.5E-4$

 $H_3=(L_3/2)*K1+(Hcons)*J1$
 $E_3=(12E-6)*K+A_3*J$!ESPESSURA DA MEMBRANA
 $Y_3=(2.3E9)*K+B_3*J$!MODULO DE ELASTICIDDAE
 $DEN_3=(1418)*K+C_3*J$!DENSIDADE DA MEMBRANA


```

VDC_3=(200)*S1+T_3*M1    ! TENSÃO DC - POLARIZACAO

PEP_3=33.2E-12            ! PERMISSIVIDADE ELETRICA DO PLÁSTICO (MEMBRANA)
                           ! 33.2E-12 (Emílio)
                           ! 32.5E-12

PEA_3=8.859E-12          ! PERMISSIVIDADE ELETRICA DO AR
BULK_3=1.42E5             ! BULK MODULO DO AR
DENAR_3=1.2               ! DENSIDADE DO AR (26.7 oC) -- 1.1774

RM_3=10E-3               ! RAO MEDIO DA RANHURA
V_3=0.4                  ! COEFICIENTE DE POISSON

!-----
! NUMERO DE DIVISÕES
!-----
NOS_3=(40)*S+D_3*M       !NOS ao longo da Membrana

LDIV_3=(5)*S+F_3*M       ! NUMERO DE DIVISÕES NAS LINHAS EM GERAL

MDIV_3=(3)*S+G_3*M       ! NUMERO DE DIVISÕES DA MEMBRANA NA ESPESSURA

LDIV2_3=LDIV_3*COEF_M    ! NUMERO DE DIVISÕES NAS LINHAS INTERMEDIARIAS

ESPACAM_3=2.5            ! ESPAÇAMENTO NAS LINHAS INTERMEDIARIAS
ESPACAM2_3=5             ! ESPAÇAMENTO NAS LINHAS INTERMEDIARIAS
DX_3=L_3/24              !ou DX=L_3/16

!4
!Variáveis comum à todas, mas com seus valores variando
!L_4=40E-4
L_4=15E-4

H_4=(L_4/2)*K1 +(Hcons)*J1
E_4=(12E-6)*K+A_4*J      !ESPESSURA DA MEMBRANA

Y_4=(2.3E9)*K+B_4*J      !MODULO DE ELASTICIDDAE

DEN_4=(1418)*K+C_4*J     !DENSIDADE DA MEMBRANA

VDC_4=(200)*S1+T_4*M1    ! TENSÃO DC - POLARIZACAO

PEP_4=33.2E-12            ! PERMISSIVIDADE ELETRICA DO PLÁSTICO (MEMBRANA)
                           ! 33.2E-12 (Emílio)
                           ! 32.5E-12

PEA_4=8.859E-12          ! PERMISSIVIDADE ELETRICA DO AR
BULK_4=1.42E5             ! BULK MODULO DO AR
DENAR_4=1.2               ! DENSIDADE DO AR (26.7 oC) --1.1774

RM_4=10E-3               ! RAO MEDIO DA RANHURA
V_4=0.4                  ! COEFICIENTE DE POISSON

!-----
! NUMERO DE DIVISÕES
!-----
NOS_4=(40)*S+D_4*M       !NOS ao longo da Membrana

LDIV_4=(5)*S+F_4*M       ! NUMERO DE DIVISÕES NAS LINHAS EM GERAL

MDIV_4=(3)*S+G_4*M       ! NUMERO DE DIVISÕES DA MEMBRANA NA ESPESSURA

LDIV2_4=LDIV_4*COEF_M    ! NUMERO DE DIVISÕES NAS LINHAS INTERMEDIARIAS

ESPACAM_4=2.5            ! ESPAÇAMENTO NAS LINHAS INTERMEDIARIAS

```

ESPACAM2_4=5 ! ESPAÇAMENTO NAS LINHAS INTERMEDIARIAS
DX_4=L_4/24 !ou DX=L_4/16

!5

!Variáveis comum à todas, mas com seus valores variando

!L_5=45E-4

L_5=17.5E-4

H_5=(L_5/2)*K1 +(Hcons)*J1

E_5=(12E-6)*K+A_5*J !ESPESSURA DA MEMBRANA

Y_5=(2.3E9)*K+B_5*J !MODULO DE ELASTICIDDAE

DEN_5=(1418)*K+C_5*J !DENSIDADE DA MEMBRANA

VDC_5=(200)*S1+T_5*M1 ! TENSÃO DC - POLARIZACAO

PEP_5=33.2E-12 ! PERMISSIVIDADE ELETRICA DO PLÁSTICO (MEMBRANA)

! 33.2E-12 (Emílio)

! 32.5E-12

PEA_5=8.859E-12 ! PERMISSIVIDADE ELETRICA DO AR

BULK_5=1.42E5 ! BULK MODULO DO AR

DENAR_5=1.2 ! DENSIDADE DO AR (26.7 oC) --1.1774

RM_5=10E-3 ! RAO MEDIO DA RANHURA

V_5=0.4 ! COEFICIENTE DE POISSON

!-----

! NUMERO DE DIVISÕES

!-----

NOS_5=(40)*S+D_5*M !NOS ao longo da Membrana

LDIV_5=(5)*S+F_5*M ! NUMERO DE DIVISÕES NAS LINHAS EM GERAL

MDIV_5=(3)*S+G_5*M ! NUMERO DE DIVISÕES DA MEMBRANA NA ESPESSURA

LDIV2_5=LDIV_5*COEF_M ! NUMERO DE DIVISÕES NAS LINHAS INTERMEDIARIAS

ESPACAM_5=2.5 ! ESPAÇAMENTO NAS LINHAS INTERMEDIARIAS

ESPACAM2_5=5 ! ESPAÇAMENTO NAS LINHAS INTERMEDIARIAS

DX_5=L_5/24 !ou DX=L_5/16

!6

!Variáveis comum à todas, mas com seus valores variando

!L_6=50E-4

L_6=20E-4

H_6=(L_6/2)*K1 +(Hcons)*J1

E_6=(12E-6)*K+A_6*J !ESPESSURA DA MEMBRANA

Y_6=(2.3E9)*K+B_6*J !MODULO DE ELASTICIDDAE

DEN_6=(1418)*K+C_6*J !DENSIDADE DA MEMBRANA

VDC_6=(200)*S1+T_6*M1 ! TENSÃO DC - POLARIZACAO

PEP_6=33.2E-12 ! PERMISSIVIDADE ELETRICA DO PLÁSTICO (MEMBRANA)

! 33.2E-12 (Emílio)

! 32.5E-12

PEA_6=8.859E-12 ! PERMISSIVIDADE ELETRICA DO AR

BULK_6=1.42E5 ! BULK MODULO DO AR

DENAR_6=1.2 ! DENSIDADE DO AR (26.7 oC) --1.1774

```

RM_6=10E-3      ! RAO MEDIO DA RANHURA
V_6=0.4         ! COEFICIENTE DE POISSON

!-----
! NUMERO DE DIVISÕES
!-----
NOS_6=(40)*S+D_6*M      !NOS ao longo da Membrana

LDIV_6=(5)*S+F_6*M      ! NUMERO DE DIVISÕES NAS LINHAS EM GERAL

MDIV_6=(3)*S+G_6*M      ! NUMERO DE DIVISÕES DA MEMBRANA NA ESPESSURA

LDIV2_6=LDIV_6*COEF_M   ! NUMERO DE DIVISÕES NAS LINHAS INTERMEDIARIAS

ESPACAM_6=2.5   ! ESPAÇAMENTO NAS LINHAS INTERMEDIARIAS
ESPACAM2_6=5    ! ESPAÇAMENTO NAS LINHAS INTERMEDIARIAS
DX_6=L_6/24     ! ou DX=L_6/16

!*****
!2Estatica
!*****
!-----
!1Meia Membrana Triangular
!-----
!2.1 Sem pre_tensao
!2.1 Com pre_tensao
!*****
!pre_tensaoM aplicada na membrana, usado para a análise estatica, modal, harmonica
!*****
PI=3.14159265
!PRE-TENSAO
TENS=7.13E6 !para espessura de 12um
!TENS=4.3E6 !para espessura de 20um (4.3E6)
!*****
TENS1_1=TENS*E_1*(RM_1+(L_1)/2)*2*PI !transformar em força
!TENS1_1=TENS*E_2*(RM_1+(L_1)/2)*2*PI !!ligo e desligo de acordo a largura do teste
!TENS1_1=TENS*E_3*(RM_1+(L_1)/2)*2*PI !!ligo e desligo de acordo a largura do teste
TENS1_2=TENS*E_1*(RM_2+L_2/2)*2*PI
!TENS1_2=TENS*E_2*(RM_2+L_2/2)*2*PI
!TENS1_2=TENS*E_3*(RM_2+L_2/2)*2*PI
TENS1_3=TENS*E_1*(RM_3+L_3/2)*2*PI
!TENS1_3=TENS*E_2*(RM_3+L_3/2)*2*PI
!TENS1_3=TENS*E_3*(RM_3+L_3/2)*2*PI
TENS1_4=TENS*E_1*(RM_4+L_4/2)*2*PI
!TENS1_4=TENS*E_2*(RM_4+L_4/2)*2*PI
!TENS1_4=TENS*E_3*(RM_4+L_4/2)*2*PI
TENS1_5=TENS*E_1*(RM_5+L_5/2)*2*PI
!TENS1_5=TENS*E_2*(RM_5+L_5/2)*2*PI
!TENS1_5=TENS*E_3*(RM_5+L_5/2)*2*PI
TENS1_6=TENS*E_1*(RM_6+L_6/2)*2*PI
!TENS1_6=TENS*E_2*(RM_6+L_6/2)*2*PI
!TENS1_6=TENS*E_3*(RM_6+L_6/2)*2*PI

!*****
!3Modal
!*****
!3.1 Sem pre_tensao
!3.2 Com pre_tensao
!-----
!1Meia Membrana Triangular
!-----
NMOD=1      !NUMERO DE MODOS
LIG1=1      ! 0-NÃO // USA O MDOF 1-USA O MDOF DA MEMBRANA
LIG2=0      ! 0-NÃO // USA O MDOF 1-USA O MDOF DO AR
LIG3=1      ! 0-NÃO // NÃO LIGA A FASE DE EXPANSAO 1-LIGA

```

```
LIG4=1      ! 0-NÃO // USA AS FORÇAS DO ESTATICO  1-USA AS FORÇAS
LIG5=1      ! 0-NÃO // USA pre_tensao  1- USA pre_tensao
```

```
!*****
```

```
!4Harmônico
```

```
!*****
```

```
!4.1 Harmonica Sem pré-tensão
```

```
!4.2 Harmonica Com pré-tensão
```

```
!-----
```

```
!1Meia Membrana Triangular
```

```
!-----
```

```
LIG6=0      ! 1-Liga a pre_tensao para harmonica
```

```
LIG7=1      ! 0-NÃO USA MOF MEMBRANA 1-USA MOF
```

```
LIG8=0      ! 0-NÃO USA O MOF AR  1-USA O MOF DO AR
```

```
LIG9=0      !
```

```
!LIG10=0    !
```

```
LIG11=1     ! 0-NÃO NÃO LIGA A ANALISE MODAL  1-LIGA
```

```
!LIG12=0    !
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
!TENSÃO AC - ALTERNADA
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
VAC_1=1
```

```
VAC_2=1
```

```
VAC_3=1
```

```
VAC_4=1
```

```
VAC_5=1
```

```
VAC_6=1
```

```
!!INTERVALO PARA ANALISE DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA
```

```
FA_1=50000  !64000
```

```
FB_1=70000  !72000
```

```
FFAA_1=50000 !64000
```

```
FFBB_1=70000 !68000
```

```
!*****
```

```
FA_2=47780  !45000
```

```
FB_2=47800  !49000
```

```
!*****
```

```
FA_3=30000  !30000
```

```
FB_3=41000  !41000
```

```
!*****
```

```
FA_4=29000  !29000
```

```
FB_4=31000  !31000
```

```
!*****
```

```
FA_5=23400  !23000
```

```
FB_5=27400  !27000
```

```
!*****
```

```
FA_6=21000  !21000
```

```
FB_6=23000  !23000
```

```
!*****
```

```
!ESPECIFICA O NUMERO DE SUBSTEPS DO INTERVALO ACIMA
```

```
NF=65      !65  100 150 200
```

```
damping1ar=1e-4  !1e-7 1e-3 1e-1          usado com MP,DAMP
```

```
damping1Men=2.5e-8
```

```
damping2=1e-4    !4E-4 1E-1 1E-2 1E-3      usado com DMPRAT
```

```
alfa=0          !usado com ALPHAD
```

```
beta=1e-10      !usado com BETAD
```

```

! ANÁLISE ELETROSTÁTICA
FINISH
/CLEAR,START

!-----

/UNITS,SI
/CWD,'C:\Users\Manlius\Desktop\APDLs\1Eletrostatico\1Meia membrana triangular\1' !Changes the current
working directory
!/CWD,'\\LENOVO\Desktop\APDLs\1Eletrostatico\1Meia membrana triangular\1'

!-----

!Parâmetros
/INPUT,'C:\Users\Manlius\Desktop\APDLs\parametros','txt'      ! arquivo de parâmetros
!/INPUT,'\\LENOVO\Desktop\APDLs\parametros','txt'

!-----

! Inicialização
/PNUM,KP,1
/PNUM,LINE,1
/PNUM,AREA,1

!-----

!Pre-processamento
!
/PREP7
!EMATWRITE,YES
!SHPP,MODIFY,1,500

!-----

! Elementos
ET,1,PLANE55,,,1      ! analogia c/o elemento axissimetrico térmico

!-----

! Propriedades dos materiais
!-- material 1 --
! (AR)
MP,KXX,1,PEA_1      ! permissividade elétrica do ar
MP,KYY,1,PEA_1

!-- material 2 ---
! (PLÁSTICO)
MP,KXX,2,PEP_1      ! permissividade elétrica do plástico
MP,KYY,2,PEP_1

! *****
! geometria
! *****
!-----

! Geração dos keypoints
K,1,RM_1,0

K,2,RM_1+L_1/2,H_1
K,3,RM_1+L_1/2,H_1+E_1

u=H_1/(L_1/2)
v=(L_1/2)-DX_1
o=u*v

K,4,RM_1+L_1/2-DX_1,o

K,5,RM_1+L_1/2-1.5*DX_1,H_1-DX_1/3
K,6,RM_1+L_1/2-1.5*DX_1,H_1
K,7,RM_1+L_1/2-1.5*DX_1,H_1+E_1
K,8,RM_1,2.5*H_1/4
K,9,RM_1,H_1

```

K,10,RM_1,H_1+E_1

!-----

! Geração das linhas

L,4,1,LDIV2_1

L,5,8,LDIV2_1

L,6,9,LDIV2_1

L,7,10,LDIV2_1

L,4,2,LDIV_1

L,6,2,LDIV_1

L,7,3,LDIV_1

L,5,4,LDIV_1

L,5,6,LDIV_1

L,8,1,LDIV_1

L,8,9,LDIV_1

L,2,3,MDIV_1

L,6,7,MDIV_1

L,9,10,MDIV_1

!DEFINE ESPAÇAMENTO NAO UNIFORME NAS

!LINHAS INTERMEDIARIAS

!LESIZE,1,,,LDIV2_1,ESPACAM2_1

!LESIZE,2,,,LDIV2_1,ESPACAM2_1

!LESIZE,3,,,LDIV2_1,ESPACAM2_1

!LESIZE,4,,,LDIV2_1,ESPACAM2_1

!LESIZE,10,,,LDIV_1,ESPACAM_1

!-----

! Geração das areas

A,1,4,5,8

A,8,5,6,9

A,4,2,6,5

A,9,6,7,10

A,2,3,7,6

!-----

! Geração da malha

ESHAPE,2,2

MAT,1

AMESH,1,3,1

MAT,2

AMESH,4,5,1

!ASEL,S,AREA,,4,5,1,1

!/OUTPUT,A4eA5conv,DAT

!SHPP,on

!SHPP,MODIFY,1,1,1

!SHPP,MODIFY,11,1

!SHPP,MODIFY,17,90

!SHPP,MODIFY,31,1

!SHPP,summary

!/OUTPUT

!ASEL,S,AREA,,1,3,1,1

!/OUTPUT,A1aA3conv,DAT

!SHPP,on

!SHPP,MODIFY,1,1,1

!SHPP,MODIFY,11,1

!SHPP,MODIFY,17,90

!SHPP,MODIFY,31,1

!SHPP,summary

!/OUTPUT

! *****

! condições de contorno

! *****

```

!-----
! seleciona as linha laterais da ranhura
LSEL,S,LINE,,1
LSEL,A,LINE,,5
NSLL,S,1          ! SELEC. OS NO'S ASSOCIADOS A ESSAS LINHAS incluindo os KP
D,ALL,TEMP,0      ! DEFINE POTENCIAL = 0V

! seleciona as linha da membrana
LSEL,S,LINE,,4
LSEL,A,LINE,,7
NSLL,S,1          ! SELEC. OS NO'S ASSOCIADOS A ESSAS LINHAS incluindo os KP
D,ALL,TEMP,1      ! DEFINE POTENCIAL = 1V
ALLSEL

!-----
! otimização da onda
WSORT,X

!-----
! mostra elementos e vínculos que representam condições de contorno
!/PBC,TEMP,1
!EPlot
!*ASK,CONTINUE,KEY
!/PBC,TEMP,0

SAVE
FINISH

!-----
! Solução

/SOLU
ANTYPE,STATIC

SAVE
SOLVE
FINISH

!/solu
!antype,substr
!seopt,file,1,1
!m,all,all
!/output,rigidez
!solve
!/output

!-----
! Pos-processamento

/POST1

ETABLE,TGX,TG,X   ! CRIA UMA TABELA DE VALORES POR ELEMENTO,
ETABLE,TGY,TG,Y   ! FORMADA PELAS COMPONENTES DOS VETORES
ETABLE,TFY,TF,Y   ! GRAD DO POTENCIAL (TG) E DESLOC. ELETRICO (TF)
SADD,TGX,TGX,,-1  ! INVERTE O SINAL DO GRAD DO POTENCIAL
SADD,TGY,TGY,,-1  ! PARA ACHAR O VETOR CAMPO ELETRICO

!-----
!plotagem
!/TLABEL,-0.75,-0.92,CAMPO ELETRICO
!PLVECT,TGX,TGY,,TG
!*ASK,CONTINUE,KEY
!/ANNOt,DELE

```

```

/TLABEL,-0.75,-0.92,DESLOCAMENTO ELETRICO
!PLVECT,TF
!* ASK,CONTINUE,KEY
!/ANNOT,DELE

SMULT,FX,TGX,TFY,-1 ! CALCULO DA FORCA ELETROSTATICA:
SMULT,FY,TGY,TFY,-1 ! FORCAX=DENS.CARGA(TFY)*CAMPO(-TGX)

N1=NODE(RM_1,H_1+E_1,,)
N2=NODE(RM_1+L_1/2,H_1+E_1,,)
PATH,mypath,2,,NOS_1
PPATH,1,N1
PPATH,2,N2
PDEF,FX,ETAB,FX ! CALCULA A FORCA ELETROST. AO LONGO DA MEMBRANA
PDEF,FY,ETAB,FY
!PDEF,STAT ! USAR QUANDO DESEJA VERIFICAR O CAMINHO

!*****
! força elétrica dc
! *****
! AQUI ESTA O CALCULO DA FORCA DINAMICA,
! QUE, EM UM MEIO LINEAR, CORRESPONDE
! A FORCA ESTATICA MULTIPLICADA PELA
! TENSÃO DE POLARIZACAO AO QUADRADO.

! Ao invés de fazer esta conta, já poderia ter
! assumido um potencial de VDC nas cond. contorno.
PCALC,ADD,FXDC,FX,,VDC_1*VDC_1
PCALC,ADD,FYDC,FY,,VDC_1*VDC_1

/TLABEL,-0.75,-0.92,COMP. DA FORCA ELETROSTATICA -X(DC)
!PLPATH,FXDC
!*ASK,CONTINUE,KEY
!/ANNOT,DELE

/TLABEL,-0.75,-0.92,COMP. DA FORCA ELETROSTATICA -Y(DC)
!PLPATH,FYDC
!*ASK,CONTINUE,KEY
!/ANNOT,DELE

! *****
! p/ 1 Volt
! *****

/TLABEL,-0.75,-0.92,COMP.DA FORCA ELETROSTATICA -X(1V)
!PLPATH,FX
!*ASK,CONTINUE,KEY
!/ANNOT,DELE

/TLABEL,-0.75,-0.92,COMP. DA FORCA ELETROSTATICA -Y(1V)
!PLPATH,FY
!*ASK,CONTINUE,KEY
!/ANNOT,DELE

!PLNSOL,TEMP ! GRAFICO DAS LINHAS EQUIPOTENCIAIS

!-----
! Gera os arquivos de saída
/HEADER,OFF,OFF,OFF,OFF,OFF,OFF
/FORMAT,,20,12
/PAGE,100000,-100000

/OUTPUT,FXcom1V,DAT

```



```

PRPATH,FX          ! Saída para 1 Volt de referência
/OUTPUT,FYcom1V,DAT
PRPATH,FY          ! Saída para 1 Volt de referência

/OUTPUT,FX,DAT
PRPATH,FXDC        !Saída para VDC_1 Volts dereferência
/OUTPUT
/OUTPUT,FY,DAT
PRPATH,FYDC        !Saída para VDC_1 Volts de referência
/OUTPUT            !Retorna para a saída primaria que no caso é o terminal
NSEL,S,LOC,Y,H_1+E_1
/OUTPUT,NO,DAT
NLIST,all,,,COORD  !alterado man
/OUTPUT            ! retorna para a saída primaria que no caso e' o terminal

NSEL,ALL

! *****
! CALCULO DA ENERGIA ELETRICA ARMAZENADA
! *****

ETABLE,CAMPO,TG,SUM
ETABLE,VOLUME,VOLU
SMULT,CAMPO2,CAMPO,CAMPO

ASEL,S,AREA,,1,3,1          ! selecionando os elementos definidos como ar
ESLA
SMULT,ENERGIA,CAMPO2,VOLUME,PEA_1,0.5    !8.859e-12 permis. do ar
SSUM                          ! mostra energia individual

ASEL,S,AREA,,4,5,1          ! selecionando os elementos definidos como ar
ESLA
SMULT,ENERGIA,CAMPO2,VOLUME,PEP_1,0.5
SSUM                          ! mostra energia individual

ALLSEL

! *****
! CALCULO DA CAPACITANCIA = 2*Energia/Volt^2
! *****

SMULT,CAPACITANCIA,ENERGIA,,2/1**2      ! foi feito para 1 Volt

SSUM ! soma todos os valores de cada coluna de ETABLE
      ! mostrando a energia total armazenada para 1 volt de referencia
      ! e também a capacitância.

```

```

!ANÁLISE ESTATICA
FINISH
/CLEAR,START

/UNITS,SI
/CWD,'C:\Users\Manlius\Desktop\APDLs\2Estatico\1Meia membrana triangular\Com pre_tensaoM2'
!Changes the current working directory

!-----
!Parâmetros

/INPUT,'C:\Users\Manlius\Desktop\APDLs\parametros','txt'    ! arquivo de parâmetros

!-----
!Inicialização
/PNUM,KP,1
/PNUM,LINE,1
/PNUM,AREA,1

```

```

!-----
! Pre-processamento
!
/PREP7

!-----
! Elementos
ET,1,FLUID79,,,1
ET,2,PLANE42,,,1

!-----
! Propriedades dos materiais
!-- material 1 --
! (AR)
MP,EX,1,BULK_2      ! bulk modulus 1.42E5
MP,DENS,1,DENAR_2   ! densidade (26.7 oC) 1.1774

!-- material 2 --
! (PLASTICO)
MP,EX,2,Y_2
MP,NUXY,2,V_2
MP,DENS,2,DEN_2

! *****! geometria
! *****
!-----
! Geração dos keypoints
K,1,RM_2,0
K,2,RM_2+L_2/2,H_2
K,3,RM_2+L_2/2,H_2+E_2

u=H_2/(L_2/2)
v=(L_2/2)-DX_2
o=u*v

K,4,RM_2+L_2/2-DX_2,o

K,5,RM_2+L_2/2-1.5*DX_2,H_2-DX_2/3
K,6,RM_2+L_2/2-1.5*DX_2,H_2
K,7,RM_2+L_2/2-1.5*DX_2,H_2+E_2
K,8,RM_2,2.5*H_2/4
K,9,RM_2,H_2
K,10,RM_2,H_2+E_2

!-----
! Geração das linhas
L,4,1,LDIV2_2
L,5,8,LDIV2_2
L,6,9,LDIV2_2
L,7,10,LDIV2_2
L,4,2,LDIV_2
L,6,2,LDIV_2
L,7,3,LDIV_2
L,5,4,LDIV_2
L,5,6,LDIV_2
L,8,1,LDIV_2
L,8,9,LDIV_2
L,2,3,MDIV_2
L,6,7,MDIV_2
L,9,10,MDIV_2

!DEFINE ESPAÇAMENTO NAO UNIFORME NAS
!LINHAS INTERMEDIARIAS
!LESIZE,1,,,LDIV2_2,ESPACAM2_2
!LESIZE,2,,,LDIV2_2,ESPACAM2_2

```

```

!LESIZE,3,,,LDIV2_2,ESPACAM2_2
!LESIZE,4,,,LDIV2_2,ESPACAM2_2
!LESIZE,10,,,LDIV2_2,ESPACAM2_2

!-----
! Geração das areas
A,1,4,5,8
A,8,5,6,9
A,4,2,6,5
A,9,6,7,10
A,2,3,7,6

!-----
! Geração da malha
ESHAPE,2,2
TYPE,1
MAT,1
AMESH,1,3,1
TYPE,2
MAT,2
AMESH,4,5,1

! *****
! condições de contorno
! *****
!-----
! seleciona os nos em contato com o disco restringindo os deslocamentos em x e y.
KSEL,S,KP,,1,2,1
KSEL,A,KP,,4
!KSEL,A,KP,,3
NSLK          !SELECIONA OS NO'S SSOCIADOS A ESSES KP
D,ALL,UX,0,,,UY      !Define deslocamentos zero nas direções x e y

LSEL,S,LINE,,1
LSEL,A,LINE,,5
NSLL          !SELECIONA OS NO'S ASSOCIADOS A ESSAS LINHAS menos os KP
D,ALL,UX,0,,,UY

! Seleciona os nos pertencentes as bordas da membrana, restringindo o deslocamento em x (simetria)
KSEL,S,KP,,8,10,1
KSEL,A,KP,,3
NSLK
D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,10,12,1
LSEL,A,LINE,,14
NSLL
D,ALL,UX,0

ALLSEL

! -----
! mostra os elementos e os vínculos (condições de contorno)
/PBC,U,1
EPLT
!*ASK,CONTINUE,KEY
SAVE
FINISH

!-----
! Solução
/SOLU
ANTYPE,STATIC

```

```

!-----
! Carregando as Forças em X e em Y

/INPUT,'FXX','txt'    ! arquivo de parâmetros
/INPUT,'FYY','txt'    ! arquivo de parâmetros

! Aplicando a pre_tensao quando estica a membrana
KSEL,S,KP,,2,3,1      ! LADO DIREITO
NSLK
F,ALL,FX,TENS1_2/(2*MDIV_2)
LSEL,S,LINE,,12
NSLL
F,ALL,FX,TENS1_2/MDIV_2

ALLSEL

! Mostra as forças eletrostáticas aplicadas na membrana
/PBC,U,1
/PBC,F,1

!-----
/TLABEL,-0.98,-0.92,FORCA ELETROSTATICA
EPLOT
!*ASK,CONTINUE,KEY
/ANNOT,DELE
/PBC,F,0
/PBC,U,0

SAVE
SOLVE
FINISH

!-----
! Pos-processamento

/POST1
SET
/COM DC
LCDEF,1
LCFACT,1,VDC_2*VDC_2
LCASE,1
LCWRITE,1,ESTAT2A,DAT

/COM geometria
/TLABEL,-0.98,-0.92,DEFORMED GEOMETRY
PLDISP,1
!*ASK,CONTINUE,KEY
/ANNOY,DELE

/COM deformação
N1=NODE(RM_2,H_2+E_2,,)
N2=NODE(RM_2+L_2/2-1.5*DX_2,H_2+E_2,,)
N2=NODE(RM_2+L_2/2,H_2+E_2,,)
LPATH,N1,N2,N3
PDEF,UY,U,Y

!/GROPT,DIG1,10
!/YRANGE,0.61E-75,0.7e-72,ALL

/TLAEEL,-0.98,-0.92,DEFOEMACAO NA MEMBRANA (DC)
PLPATH,UY
!*ASK,CONTINUE,KEY
/ANNOT,DELE

!Geração dos arquivos de saída
/COM GENERATING OUTPUT FILES

```

```
/HEADER,OFF,OFF,OFF,OFF,OFF,OFF,OFF,OFF
/FORMAT,,,20,12
/PAGE,8000,,,-8000
```

```
SAVE
```

```
/OUTPUT,GDD,DAT
NLIST,all,,,COORD
PRNSOL,U,COMP
```

```
/OUTPUT
KSEL,S,KP,,10
NSLK
/OUTPUT,GRAF1,DAT
PRNSOL,U,COMP
```

```
/OUTPUT
KSEL,S,KP,,10
NSLK
/OUTPUT,GRAF1,DAT
PRNSOL,U,COMP
```

```
/OUTPUT
KSEL,S,KP,,10
NSLK
/OUTPUT,GRAF_conv,DAT
PRNSOL,U,COMP
```

```
/OUTPUT
!425 Testar nó
```

```
!ANÁLISE MODAL
FINISH
/CLEAR,START
```

```
!-----
/UNITS,SI
```

```
/CWD,'C:\Users\Manlius\Desktop\APDLs\3Modal\1Meia          membrana          triangular\Com
pre_tensaoM\Reduzida\Com pre_tensao\1' !Changes the current working directory
```

```
!-----
! Pre-processamento
!
/PREP7
EMATWRITE,YES
!-----
```

```
!-----
!Parâmetros
```

```
/INPUT,'C:\Users\Manlius\Desktop\APDLs\parametros','txt'      ! arquivo de parâmetros
```

```
!-----
!Inicialização
/PNUM,KP,1
/PNUM,LINE,1
/PNUM,AREA,1
```

```
!-----
! Elementos
ET,1,FLUID79,,,1
ET,2,PLANE42,,,1
```

```
!-----
! Propriedades dos materiais
```

```

!-- material 1 --
! (AR)
MP,EX,1,BULK_1      ! bulk modulus 1.42E5
MP,DENS,1,DENAR_1   ! densidade (26.7 oC) 1.1774

!-- material 2 --
! (PLASTICO)
MP,EX,2,Y_1
MP,NUXY,2,V_1
MP,DENS,2,DEN_1

! *****
! geometria
! *****
! Geração dos keypoints
K,1,RM_1,0

K,2,RM_1+L_1/2,H_1
K,3,RM_1+L_1/2,H_1+E_1

u=H_1/(L_1/2)
v=(L_1/2)-DX_1
o=u*v

K,4,RM_1+L_1/2-DX_1,o

K,5,RM_1+L_1/2-1.5*DX_1,H_1-DX_1/3
K,6,RM_1+L_1/2-1.5*DX_1,H_1
K,7,RM_1+L_1/2-1.5*DX_1,H_1+E_1
K,8,RM_1,2.5*H_1/4
K,9,RM_1,H_1
K,10,RM_1,H_1+E_1

!-----
! Geração das linhas
L,4,1,LDIV2_1
L,5,8,LDIV2_1
L,6,9,LDIV2_1
L,7,10,LDIV2_1
L,4,2,LDIV_1
L,6,2,LDIV_1
L,7,3,LDIV_1
L,5,4,LDIV_1
L,5,6,LDIV_1
L,8,1,LDIV_1
L,8,9,LDIV_1
L,2,3,MDIV_1
L,6,7,MDIV_1
L,9,10,MDIV_1

!DEFINE ESPAÇAMENTO NAO UNIFORME NAS
!LINHAS INTERMEDIARIAS
!LESIZE,1,,,LDIV2_1,ESPACAM2_1
!LESIZE,2,,,LDIV2_1,ESPACAM2_1
!LESIZE,3,,,LDIV2_1,ESPACAM2_1
!LESIZE,4,,,LDIV2_1,ESPACAM2_1
!LESIZE,10,,,LDIV_1,ESPACAM_1

!-----
! Geração das areas
A,1,4,5,8
A,8,5,6,9
A,4,2,6,5
A,9,6,7,10
A,2,3,7,6

```

```

!-----
! Geração da malha
ESHAPE,2,2
TYPE,1
MAT,1
AMESH,1,3,1
TYPE,2
MAT,2
AMESH,4,5,1

!WSORT
WAVES,RMS

!*****
! condições de contorno
!*****
!-----
! seleciona os nos em contato com o disco restringindo os deslocamentos em x e y.
KSEL,S,KP,,1,2,1
KSEL,A,KP,,4
!KSEL,A,KP,,8
!KSEL,S,KP,,2
!KSEL,A,KP,,3
NSLK          !SELECIONA OS NO'S SSOCIADOS A ESSES KP
D,ALL,UX,0,,,UY    !Define deslocamentos zero nas direcoes x e y

LSEL,S,LINE,,1
LSEL,A,LINE,,5
!LSEL,A,LINE,,10,11,1
NSLL          !SELECIONA OS NO'S ASSOCIADOS A ESSAS LINHAS menos os KP
D,ALL,UX,0,,,UY

! Seleciona os nos pertencentes as bordas da membrana, restringindo o deslocamento em x (simetria)
!KSEL,S,KP,,9,10,1
KSEL,S,KP,,3
!KSEL,A,KP,,8
!KSEL,A,KP,,2
NSLK
D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,12
!LSEL,A,LINE,,14
!LSEL,A,LINE,,10,11,1
NSLL
D,ALL,UX,0

ALLSEL

!-----
!mostra os elementos e os vínculos (condições de contorno)
/PBC,U,1
EPLOT
!*ASK,CONTINUE,KEY
SAVE
FINISH

!-----
! Solução
/SOLU
ANTYPE,STATIC
PSTRES,ON

*IF,LIG4,EQ,1,THEN
! Carregando as Forças em X e em Y -----

```

```

/INPUT,'FXX','txt'      ! arquivo de parâmetros
/INPUT,'FYY','txt'      ! arquivo de parâmetros
*ENDIF

!IF,LIG5,EQ,1,THEN
! Aplicando a pre_tensao quando estica a membrana
KSEL,S,KP,,2,3,1        ! LADO DIREITO
NSLK
F,ALL,FX,TENS1_1  !/(2+(MDIV_1-1))

LSEL,S,LINE,,12
NSLL
F,ALL,FX,TENS1_1  !/(2+(MDIV_1-1))

KSEL,S,KP,,9,10,1       ! LADO esquerdo
NSLK
F,ALL,FX,-1*(TENS1_1/3)  !/(2+(MDIV_1-1)))

LSEL,S,LINE,,14
NSLL
F,ALL,FX,-1*(TENS1_1/3)  !/(2+(MDIV_1-1)))
*ENDIF

ALLSEL
! Mostra as forças eletrostáticas aplicadas na membrana
/PBC,U,1
/PBC,F,1
/TLABEL,-0.98,-0.92,FORCA ELETROSTATICA
EPLOT
!*ASK,CONTINUE,KEY
/ANNOT,DELE
/PBC,F,0
/PBC,U,0

SAVE
SOLVE
FINISH

!*****
!MODAL
!*****
!Solução
/SOLU
ANTYPE,MODAL
MODOPT,REDUC,NMOD
PSTRES,ON

!MODOPT,SUBSP,NMOD
!PSTRES,ON                ! Subspace, 5 modes
!EQSLV,FRONT              ! Frontal solver
!MXPAND,5                  ! Expand 5 modes

!IF,LIG1,EQ,1,THEN
!*****
! definindo os MASTER DOFS
!*****
! Definindo GMs para a membrana
KSEL,S,KP,,6,7,1
NSLK
!M,ALL,UX                  ! define os graus mestres
M,ALL,UY

LSEL,S,LINE,,3,4,1        ! Selec. as linhas sup. e inf da membrana

```



```

LSEL,A,LINE,,6,7,1
NSLL      ! nos associados a essas linhas menos os KP
M,ALL,UY
!M,ALL,UX

ASEL,S,,,4,5,1      ! Selec. os nos definidos no interior das areas
NSLA
M,ALL,UY
M,ALL,UX

LSEL,S,LINE,,13
NSLL
M,ALL,UY
M,ALL,UX

LSEL,S,LINE,,12
LSEL,A,LINE,,14
NSLL
M,ALL,UY
!M,ALL,UX

KSEL,S,KP,,2,3,1
KSEL,A,KP,,9,10,1      ! Alterei aqui
NSLK
M,ALL,UY
!M,ALL,UX      !FUI EU Q COLOQUEI

*ENDIF

*IF,LIG2,EQ,1,THEN
!*****
! Definindo GMs para o ar
!*****
KSEL,S,KP,,5
KSEL,A,KP,,8
NSLK
M,ALL,UY
!M,ALL,UX      !FUI EU Q COLOQUEI

LSEL,S,LINE,,2
NSLL
M,ALL,UY
!M,ALL,UX      !FUI EU Q COLOQUEI

LSEL,S,LINE,,10,11,1
NSLL
M,ALL,UY
!M,ALL,UX      !FUI EU Q COLOQUEI

ASEL,S,,,1,2,1
NSLA
M,ALL,ALL      ! define graus mestres em todas as direcoes (x e y)

*ENDIF

ALLSEL

!*****
! Mostra os graus mestres escolhidos pelo programa
/PBC,U,0
/PBC,MAST,1
/TLABEL,-0.98,0.92,GRAUS MESTRES
EPLOT
*ASK,CONTINUE,KEY
/ANNOT,DELE
/PBC,MAST,0

```

```

SAVE
SOLVE
FINISH

*IF,LIG3,EQ,1,THEN
!FASE DE EXPANSÃO-----
/SOLU
EXPASS,ON
MXPAND,NMOD,,,YES
SAVE
SOLVE
FINISH
*ENDIF

!-----
! Pos-processamento
/POST1

! Mostar as frequencias
/OUTPUT,GRAF1,DAT
SET,LIST
/OUTPUT

! Mostra os modos de vibrar
!*ASK,CONTINUE,KEY

*ASK,MODO,'ENTER NUMBER OF THE MODE DESIRED',1
/TLABEL,-0.97,-0.92,MODO %MODO% DE VIBRACAO

:LOOP1

SET,,MODO
PLDISP,1

*ASK,CONTINUE,KEY

N1=NODE(RM_1,H_1+E_1,,) !Já foi definido acima,veja CP.
N2=NODE(RM_1+L_1/2-1.5*DX_1,H_1+E_1,,)
N3=NODE(RM_1+L_1/2,H_1+E_1,,)

LPATH,N1,N2,N3
PDEF,UY,U,Y

/ANNOT,DELE
/TLABEL,-0.98,-0.92,DEFORMACAO NA MEMBRANA (modo %MODO%)
PLPATH,UY

*ASK,CONTINUE,KEY

*ASK,MODO,'ENTER NUMBER OF THE MODE DESIRED',0
*IF,MODO,NE,0,:LOOP1

SAVE

```

```

FINISH
/CLEAR,START

/UNITS,SI

/CWD,'C:\Users\Manlius\Desktop\APDLs\4Harmonica\1Meia      membrana      triangular\Com
pre_tensaoM\Total\Com pre_tensao\1' !Changes the current working directory

!-----

```

```

! Pre-processamento
!
/PREP7

!-----
!Parâmetros

/INPUT,'C:\Users\Manlius\Desktop\APDLs\parametros','txt'    ! arquivo de parâmetros

!-----
!Inicialização
/PNUM,KP,1
/PNUM,LINE,1
/PNUM,AREA,1

!-----
! Elementos
ET,1,FLUID79,,,1
ET,2,PLANE42,,,1

!-----
! Propriedades dos materiais
!-- material 1 --
! (AR)
MP,EX,1,BULK_1    ! bulk modulus 1.42E5
MP,DENS,1,DENAR_1 ! densidade (26.7 oC) 1.1774

!-- material 2 --
! (PLASTICO)
MP,EX,2,Y_1
MP,NUXY,2,V_1
MP,DENS,2,DEN_1

! *****
! geometria
! *****
! Geração dos keypoints
K,1,RM_1,0

K,2,RM_1+L_1/2,H_1
K,3,RM_1+L_1/2,H_1+E_1

u=H_1/(L_1/2)
v=(L_1/2)-DX_1
o=u*v

K,4,RM_1+L_1/2-DX_1,o

K,5,RM_1+L_1/2-1.5*DX_1,H_1-DX_1/3
K,6,RM_1+L_1/2-1.5*DX_1,H_1
K,7,RM_1+L_1/2-1.5*DX_1,H_1+E_1
K,8,RM_1,2.5*H_1/4
K,9,RM_1,H_1
K,10,RM_1,H_1+E_1

!-----
! Geração das linhas
L,4,1,LDIV2_1
L,5,8,LDIV2_1
L,6,9,LDIV2_1
L,7,10,LDIV2_1
L,4,2,LDIV_1
L,6,2,LDIV_1
L,7,3,LDIV_1

```

```

L,5,4,LDIV_1
L,5,6,LDIV_1
L,8,1,LDIV_1
L,8,9,LDIV_1
L,2,3,MDIV_1
L,6,7,MDIV_1
L,9,10,MDIV_1

!DEFINE ESPAÇAMENTO NAO UNIFORME NAS
!LINHAS INTERMEDIARIAS
!LESIZE,1,,,LDIV2_1,ESPACAM2_1
!LESIZE,2,,,LDIV2_1,ESPACAM2_1
!LESIZE,3,,,LDIV2_1,ESPACAM2_1
!LESIZE,4,,,LDIV2_1,ESPACAM2_1
!LESIZE,10,,,LDIV_1,ESPACAM_1

!-----
! Geração das areas
A,1,4,5,8
A,8,5,6,9
A,4,2,6,5
A,9,6,7,10
A,2,3,7,6

!-----
! Geração da malha
ESHAPE,2,2
TYPE,1
MAT,1
AMESH,1,3,1
TYPE,2
MAT,2
AMESH,4,5,1

SAVE
FINISH

!-----
! Solução
/SOLU
ANTYPE,STATIC
PSTRES,ON

!*****
! condições de contorno
!*****
! seleciona os nos em contato com o disco restringindo os deslocamentos em x e y.
KSEL,S,KP,,1,2,1
KSEL,A,KP,,4
!KSEL,S,KP,,2
!KSEL,A,KP,,3
NSLK      !SELECIONA OS NO'S SSOCIADOS A ESSES KP
D,ALL,UX,0,,,UY    !Define deslocamentos zero nas direcoes x e y

LSEL,S,LINE,,1
LSEL,A,LINE,,5
NSLL      !SELECIONA OS NO'S ASSOCIADOS A ESSAS LINHAS menos os KP
D,ALL,UX,0,,,UY

! Seleciona os nos pertencentes as bordas da membrana, restringindo o deslocamento em x (simetria)
!KSEL,S,KP,,9,10,1

KSEL,S,KP,,3
!KSEL,A,KP,,2
NSLK
D,ALL,UX,0

```

```

LSEL,S,LINE,,12
!LSEL,A,LINE,,14
NSLL
D,ALL,UX,0

ALLSEL

!-----
!mostra os elementos e os vinculos (condicoes de contorno)
/PBC,U,1
EPLOT
!*ASK,CONTINUE,KEY

*IF,LIG4,EQ,1,THEN
! Carregando as Forças em X e em Y -----
/INPUT,'FXX','txt'    ! arquivo de parâmetros
/INPUT,'FYY','txt'    ! arquivo de parâmetros
ALLSEL
! Mostra as forcas eletrostáticas aplicadas na membrana
/PBC,U,1
/PBC,F,1
/TLABEL,-0.98,-0.92,FORCA ELETROSTATICA
EPLOT
!*ASK,CONTINUE,KEY
/ANNOT,DELE
/PBC,F,0
/PBC,U,0
*ENDIF

*IF,LIG5,EQ,1,THEN
! Aplicando a pre_tensao quando estica a membrana
KSEL,S,KP,,2,3,1      ! LADO DIREITO
NSLK
F,ALL,FX,TENS1_1      !/(2+(MDIV_1-1))
LSEL,S,LINE,,12
NSLL
F,ALL,FX,TENS1_1      !/(2+(MDIV_1-1))

KSEL,S,KP,,9,10,1     ! LADO esquerdo
NSLK
F,ALL,FX,-1*(TENS1_1/3) !/(2+(MDIV_1-1)))
LSEL,S,LINE,,14
NSLL
F,ALL,FX,-1*(TENS1_1/3) !/(2+(MDIV_1-1)))

ALLSEL
! Mostra as forcas eletrostáticas aplicadas na membrana
/PBC,U,1
/PBC,F,1
/TLABEL,-0.98,-0.92,FORCA ELETROSTATICA
EPLOT
!*ASK,CONTINUE,KEY
/ANNOT,DELE
/PBC,F,0
/PBC,U,0
*ENDIF

SAVE
SOLVE
FINISH

```

```

!*****
!ANÁLISE HARMONICA
!*****

/SOLU
ANTYPE,HARMIC
HROPT,FULL
HROUT,OFF
KBC,1
MP,DAMP,1,damping1ar
MP,DAMP,2,damping1Men
!DMPRAT,damping2
!BETAD,beta
!ALPHAD,alfa

PSTRES,ON

!*****
! condições de contorno
!*****
!-----
! seleciona os nos em contato com o disco restringindo os deslocamentos em x e y.
!KSEL,S,KP,,1,2,1
!KSEL,A,KP,,4
KSEL,S,KP,,2
!KSEL,A,KP,,3
NSLK          !SELECIONA OS NO'S SSOCIADOS A ESSES KP
D,ALL,UX,0,,,UY  !Define deslocamentos zero nas direcoes x e y

!LSEL,S,LINE,,1
!LSEL,A,LINE,,5
!NSLL          !SELECIONA OS NO'S ASSOCIADOS A ESSAS LINHAS menos os KP
!D,ALL,UX,0,,,UY

! Seleciona os nos pertencentes as bordas da membrana, restringindo o deslocamento em x (simetria)
KSEL,S,KP,,9,10,1
KSEL,A,KP,,3
!KSEL,A,KP,,2
NSLK
D,ALL,UX,0

LSEL,S,LINE,,12
LSEL,A,LINE,,14
NSLL
D,ALL,UX,0

ALLSEL

!-----
!mostra os elementos e os vinculos (condicoes de contorno)
/PBC,U,1
EPLOT
!*ASK,CONTINUE,KEY

*IF,LIG4,EQ,1,THEN
! Carregando as Forças em X e em Y -----
/INPUT,'FXX','txt'  ! arquivo de parâmetros
/INPUT,'FYY','txt'  ! arquivo de parâmetros
*ENDIF

HARFRQ,FA_1,FB_1          ! intervalo para análise da resposia em frcq.
NSUBST,NF                  ! numero de substeps para este intervalo
KBC,1                      ! mantem a mesma amplitude das forcas durante todos os substeps

```

```

!/HEADER,OFF,OFF,OFF,OFF,OFF,OFF,OFF
!/FORMAT,,,20,12
!/PAGE,8000,-8000

SAVE
SOLVE          - aqui o arquivo está fechando
FINISH

!*****
! Pos-processamento
!*****
/POST26

!-----
!Carrega o NÓ 3 para mostrar o seu deslocamento
N3=NODE(RM_1+L_1,H_1+E_1,,) !define o nó localizado no ponto medio da membrana

NSOL,3,N3,U,Y,UY      ! numero 3 usado c/ referencia da variavel em post26

!-----
! Obtém o deslocamento devido a tensão AC alternada
ADD,3,3,,,,,VAC_1*VAC_1
PROD,2,1,,,,,0.001      !muda a escala da freq.(NV=I) na abscissa para KHz
XVAR,2                  ! especifica 2 como a variavel a ser usada na abscissa

!-----
! Mostra a resposta em frequência do NÓ médio da membrana
/TLABEL,-0.98,-0.92,DESLOCAMENTO DO PONTO MEDIO DA MEMBRANA
ABS,4,3,,,DESLOC      ! modulo do deslocamento

/GRID,1                ! ativa grid
/AXLAB,X,FREQUENCIA (kHz)
/AXLAB,Y,|DESLOCAMENTO| (m)
PLVAR,4
!PLVAR,3 ! Este comando sempre plota a amplitude de um valor complexo
! neste caso tem-se o desloc. - obs. p/ o NÓ N3 é real
!*ASK,CONTINUE,KEY
/ANNOT,DELE
/GRID,0

/OUTPUT

/OUTPUT,GRAF1,DAT
PRVAR,4
/OUTPUT

!*****
Calculando o deslocamento
!*****
N10=1+NODE(RM_1+L_1/NOS,H_1+E_1,,) !define o nó localizado no ponto médio da membrana
NSOL,5,N10,U,Y,UY      ! numero 3 usado c/ referencia da variável em post26

NT=2*LDIV_1+1
NOM=N10+1

*DO,NOM,NOM,N10+NT-1,1
NSOL,2,NOM,U,Y,UY
ADD,5,2,5,,,,,VAC_1*VAC_1
NOM=NOM+1
*ENDDO

PROD,5,5,,,,,1/NT

/OUTPUT,GRAF2,DAT
PRVAR,5

```

```
/OUTPUT
```

```
*ASK,CONTINUE,'1-Plotar Desloc Med 0-PARAR',0
```

```
*IF,CONTINUE,EQ,1,THEN
```

```
!*****
```

```
! plotando o deslocamento
```

```
!*****
```

```
/ANNOT,DELE
```

```
PROD,2,1,,,,,0.001      !muda a escala da freq.(NV=I) na abscissa para KHz
```

```
XVAR,2                  ! especifica 2 como a variável a ser usada na abscissa
```

```
/TLABEL,-0.98,-0.92,RESPOSTA EM FREQUENCIA DO DESLOCAMENTO MEDIO
```

```
/GRID,1                ! ativa grid
```

```
/AXLAB,X,FREQUENCIA (kHz)
```

```
/AXLAB,Y,|DESLOCAMENTO| (m)
```

```
PLVAR,5
```

```
!*ASK,CONTINUE,KEY
```

```
/ANNOT,DELE
```

```
/GRID,0
```

```
*ENDIF
```

```
SAVE
```


ANEXO A - Circuito amplificador

Componentes do circuito:

Value	Qty	Referência
270pF	1	C15
1nF	2	C16 C18
10nF	2	C1 C2
82nFx630V	2	C11 C12
100nF	2	C3 C4
2,2uFx450V	1	C19
10uFx35V	1	C13
10uF	1	C14
100uFx50V	4	C5 C6 C7 C8
100uFx35V	3	C9 C10 C17
1N4937	1	D1
TIP50	1	Q1
1R	1	R22
100R	2	R17 R21
1K	2	R3 R4
2K2	2	R13 R20
3K3	1	R19
5K6	1	R16
6K8	1	R11
10K	5	R1 R2 R14 R24 R25
22K	3	R5 R6 R18
33K	2	R7 R8
100K	1	R12
500K	1	R15
1M	3	R9 R10 R23
10K	1	RV1
Transformador 1:15	2	T1 T2
Transformador 1:5	1	T3
TL494	1	U3
LM3886TF	2	U1 U2
Fonte 24VDC	2	V1 V2