
**MODELAGEM ACÚSTICA DO TRATO VOCAL HUMANO PELO MÉTODO DOS
ELEMENTOS DE CONTORNO**

CELSO DONIZETE DA SILVA JÚNIOR

PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**MODELAGEM ACÚSTICA DO TRATO VOCAL HUMANO PELO
MÉTODO DOS ELEMENTOS DE CONTORNO**

CELSO DONIZETE DA SILVA JÚNIOR

ORIENTADORA: ÉDER LIMA DE ALBUQUERQUE

**PROJETO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

BRASÍLIA/DF: JULHO - 2015.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**MODELAGEM ACÚSTICA DO TRATO VOCAL HUMANO PELO
MÉTODO DOS ELEMENTOS DE CONTORNO**

CELSO DONIZETE DA SILVA JÚNIOR

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

APROVADA POR:

Prof. Éder Lima de Albuquerque. (ENM-UnB)
(Orientador)

Prof. Marcus Vinícius Girão. (ENM-UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Álvaro Campos Ferreira. (ENM-UnB)
(Examinador Interno)

BRASÍLIA/DF, 01 DE JULHO DE 2015.

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA JÚNIOR, CELSO DONIZETE

Modelagem do trato vocal humano pelo método do elementos de contorno
para o Título de Graduação

em Engenharia Mecânica. [Distrito Federal] 2015.

xii, 10p., 297mm (ENM/FT/UnB, Graduação, Engenharia Mecânica, 2015).

Projeto de Graduação - Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

- | | |
|-------------------------|------------------------------------|
| 1. Projeto de Graduação | 2. Engenharia Mecânica |
| 3. Trato Vocal Humano | 4. L ^A T _E X |
| I. ENM/FT/UnB | II. Graduação |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA Jr., CELSO D. (2015). Modelagem do trato vocal humano pelo método dos elementos de contorno para o Programa de Graduação em Engenharia Mecânica . Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica, Publicação JULHO - 01 A/15, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 63p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Celso Donizete da Silva Júnior.

TÍTULO DO PROJETO DE GRADUAÇÃO: Modelagem do trato vocal humano pelo método dos elementos de contorno para o Programa de Graduação em Engenharia Mecânica.

GRAU / ANO: Engenheiro Mecânico / 2015

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste projeto de

graduação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Celso Donizete da Silva Júnior

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado aos meus pais
e também a todas as amizades feitas nesse período.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Eng. Álvaro Campos Ferreira por toda a disponibilidade, atenção e paciência.

RESUMO

MODELAGEM ACÚSTICA DO TRATO VOCAL HUMANO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS DE CONTORNO

Autor: Celso Donizete da Silva Júnior

Orientadora: ÉDER LIMA DE ALBUQUERQUE

Graduação em Engenharia Mecânica

Brasília, Julho de 2015

O projeto tem por objetivo caracterizar os fonemas /a/, /i/ e /u/ criando uma ferramenta numérica para análise. Muito estudo tem se voltado para essa área e o Método de Elementos de Contorno é muito bom para ambientes onde o domínio é muito grande para se discretizar, como no caso da irradiação da voz em uma sala. O projeto ainda é um pequeno passo ao qual deve-se dar continuidade. Será feita uma metodologia para estudar o efeito da curvatura, onde não se tem solução analítica.

ABSTRACT

ACOUSTIC MODELING OF HUMAN VOCAL TRACT BY THE METHOD OF BOUNDARY ELEMENT

Author: Celso Donizete da Silva Júnior

Supervisor: ÉDER LIMA DE ALBUQUERQUE

Degree Project in Mechanical Engineering

Brasília, 2015 July

The project aims to characterize the phonemes / a /, / i / and / u / creating a numerical tool for analysis. Much study has focused on this area and the Boundary Element Method is very good for environments where the domain is too large to discretize, as in the case of voice irradiation in a room. The project is still a small step which should continue. A methodology to study the effect of Bend, where there is no analytical solution will be made.

ÍNDICE

Capítulo	Página
INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Motivação	3
1.3 Objetivos	3
1.4 Metodologia	4
1.5 Plano da Dissertação	4
ACÚSTICA DO TRATO VOCAL	5
2.1 Descrição dos elementos	5
2.2 Mecanismo da produção da voz	6
2.3 Frequência do formante	8
2.4 Modelos da produção da voz	9
FUNDAMENTOS DA ACÚSTICA DE CAVIDADES	12
3.1 Equação da onda	12
3.2 Solução da equação da onda para cavidade retangular	16
3.3 Solução para cavidades unidimensionais	20
3.4 Escala decibel	24
3.5 Velocidade do som em tubos	24
MODELAGEM DE ACÚSTICA DE CAVIDADES PELO MÉTODO DE ELEMEN- TOS DE CONTORNO	26
4.1 Obtenção de Valores em Pontos Internos	31
IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA	32

5.1	Programa transfer_matrix.m	32
5.2	Programa Helmholtz3Dfreq.m	33
5.3	GiD	33
RESULTADOS		35
6.1	Cavidade unidimensional uniforme	35
6.2	Modelagem das vogais /a/, /i/ e /u/	43
6.3	Análise da curvatura	56
CONCLUSÕES PARCIAL E PERSPECTIVAS		60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		61

ÍNDICE DAS TABELAS

Tabela		Página
3.1	Coeficientes da matriz de transferência em função das condições de contorno.	24
6.2	Frequência fundamentais para um tubo unidimensional com seção constante.	42
6.3	Parâmetros das malhas das vogais /a/, /i/ e /u/.	46
6.4	Frequências naturais das vogais /a/, /i/ e /u/.	53
6.5	Parâmetros da malha do tubo curvo com seção constante.	56
6.6	Frequência fundamentais para um tubo unidimensional e para um tubo curvo com seção constante obtidas pelo MEC.	58

ÍNDICE DAS FIGURAS

Figura	Página
2.1 Aparelho fonador (Brandão, 2011)	6
2.2 Representação do sistema fonador (Cataldo et al., 2004).	6
2.3 Produção do sinal glotal (Titze, 2001).	8
2.4 Geometria do trato vocal criada a partir de imagens de ressonância magnética (Hironori Takemotoa, 2010).	8
2.5 Espectro sonoros dos formantes das vogais [u], [a] e [i] (Bistafa, 2006).	9
2.6 Modelo aparelho fonador proposto por Flanagan (1968).	10
2.7 Modelo aparelho fonador com dois graus de liberdade (Ishizaka and Flanagan, 1972).	10
2.8 Modelo aparelho fonador com três graus de liberdade (Titze, 2001).	11
2.9 Aproximação para o trato vocal da vogal [a].	11
2.10 Aproximação para o trato vocal da vogal [i].	11
2.11 Aproximação para o trato vocal da vogal [u].	11
3.12 Deslocamento do fluido em um tubo unidimensional uniforme devido a passagem de onda sonora (Gerges, 2001)	12
3.13 Cavidade prismática	16
3.14 Esquema unidimensional seção constante.	20
3.15 Modelo para análise da rugosidade em tubos (M Valdan and Oss, 2014).	25
4.16 Discretização do contorno (Albuquerque, 2009)	27
4.17 Discretização do contorno por segmentos de reta (Albuquerque, 2009)	27
6.18 Tubo unidimensional com seção constante, vogal /ə/.	36
6.19 Dimensões do tubo unidimensional com seção constante em <i>mm</i>	36
6.20 Frequência natural do tubo retilíneo com seção uniforme utilizando (MMT).	38

6.21	Primeiro modo vogal /ə/ utilizando (MMT).	38
6.22	Segundo modo vogal /ə/ utilizando (MMT).	39
6.23	Malha do tubo unidimensional com seção constante.	39
6.24	Função resposta em frequência para um tubo retilíneo e uniforme utilizando o MEC.	40
6.25	Primeiro modo para um tubo unidimensional uniforme (MEC).	40
6.26	Segundo modo para um tubo unidimensional uniforme (MEC).	41
6.27	Primeiro modo dos pontos internos para um tubo unidimensional uniforme (MEC).	41
6.28	Segundo modo dos pontos internos para um tubo unidimensional uniforme (MEC).	41
6.29	Comparação dos métodos MMT e MEC na obtenção da forma modal de um tubo unidimensional com seção constante, primeiro modo.	42
6.30	Comparação dos métodos MMT e MEC na obtenção da forma modal de um tubo unidimensional com seção constante, segundo modo.	42
6.31	Modelo tridimensional vogal /a/.	43
6.32	Dimensões do modelo da vogal /a/ em <i>mm</i>	43
6.33	Modelo tridimensional vogal /i/.	44
6.34	Dimensões do modelo da vogal /i/ em <i>mm</i>	44
6.35	Modelo tridimensional vogal /i/.	44
6.36	Dimensões do modelo da vogal /u/ em <i>mm</i>	45
6.37	Malha do modelo da vogal /a/.	45
6.38	Malha do modelo da vogal /i/.	45
6.39	Malha do modelo da vogal /u/.	46
6.40	Frequência natural da vogal /a/ utilizando (MMT).	46
6.41	Frequência natural da vogal /i/ utilizando (MMT).	47
6.42	Frequência natural da vogal /u/ utilizando (MMT).	47
6.43	Primeiro modo vogal /a/ utilizando (MMT).	47
6.44	Segundo modo vogal /a/ utilizando (MMT).	48
6.45	Primeiro modo vogal /i/ utilizando (MMT).	48
6.46	Segundo modo vogal /i/ modo utilizando (MMT).	48
6.47	Primeiro modo vogal /u/ utilizando (MMT).	49
6.48	Segundo modo vogal /u/ utilizando (MMT).	49

6.49	Função resposta em frequência da vogal /a/ obtida pelo MEC.	49
6.50	Função resposta em frequência da vogal /i/ obtida pelo MEC.	50
6.51	Função resposta em frequência da vogal /u/ obtida pelo MEC.	50
6.52	Primeiro modo vogal /a/ obtida pelo MEC.	51
6.53	Segundo modo vogal /a/ obtida pelo MEC.	51
6.54	Primeiro modo vogal /i/ obtida pelo MEC.	52
6.55	Segundo modo vogal /i/ obtida pelo MEC.	52
6.56	Primeiro modo vogal /u/ obtida pelo MEC.	52
6.57	Segundo modo vogal /u/ obtida pelo MEC.	53
6.58	Comparação da primeira forma modal vogal/a/.	53
6.59	Comparação da segunda forma modal vogal/a/.	54
6.60	Comparação da primeira forma modal vogal/i/.	54
6.61	Comparação da segunda forma modal vogal/i/.	54
6.62	Comparação da primeira forma modal vogal/u/.	55
6.63	Comparação da segunda forma modal vogal/u/.	55
6.64	Modelo tridimensional do tubo curvo.	56
6.65	Dimensões do tubo curvo em <i>mm</i>	57
6.66	Malha gerada pelo programa GiD do tubo curvo com seção constante. . . .	57
6.67	Gráfico FRF dos tubos retilíneo e curvo ambos com seção transversal constante.	58
6.68	Primeiro modo modelo tridimensional tubo curvo.	59
6.69	Segundo modo modelo tridimensional tubo curvo.	59

,

Capítulo 1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A fala é o meio de expressão e comunicação mais usual, distúrbios da voz podem ter profundas implicações na vida social e profissional de uma pessoa. De maneira simplificada a produção da voz se inicia quando o ar proveniente dos pulmões, passa pelas pregas vocais que vibram e o transforma em pulsos sonoros. Estes pulsos são de baixa intensidade assim necessitam ser amplificados e que determinadas componentes harmônicas sofram ênfase, o que caracteriza e dá identidade para a voz, tornando-a única (Cataldo et al., 2004). Este processo ocorre no trato vocal humano sistema que vai da laringe à boca . As deficiências vocais são caracterizadas por mudanças significativas que comprometem a inteligibilidade e a efetividade da comunicação oral, dentre os quais podemos destacar: alterações na qualidade vocal, frequência e intensidade da voz, desordens no funcionamento laríngeo, respiratório e/ou do trato vocal. Segundo Silverio (2013) as lesões mais recorrentes são o aparecimento de nódulos vocais, cistos intracordais, edemas e fendas glóticas.

Os profissionais da voz contam hoje com uma série de possibilidades de análise da produção e da percepção do sinal vocal. Muitas das análises baseiam-se na percepção auditiva dos avaliadores. Por depender de julgamentos do(s) avaliador (es), tais propostas geram uma série de discussões entre os profissionais que atendem pacientes, ou alunos com queixas vocais, inclusive quanto à validade de tais procedimentos. A análise acústica pode ser considerada um recurso complementar não invasivo, que permite um registro e oferece a possibilidade de detalhamento do processo de geração, modulação e irradiação do sinal sonoro os quais correspondem a eventos das porções glóticas e supra glótica do aparelho fonador (Sader and Hanayama, 2004).

Historicamente, o século XX marca o período moderno da análise acústica. As primeiras análises iniciaram-se com o oscilógrafo, em 1920, que produzia gráficos relacionando

a amplitude do som e o tempo. Na década de 40, foi desenvolvido o espectrógrafo sonoro, aparelho que teve implicação revolucionária, por permitir um registro tridimensional do sinal sonoro, integrando os aspectos de tempo, frequência e intensidade num único gráfico de dois eixos, chamado de espectrograma. Somente no início dos anos 70, começaram a operar os primeiros processadores digitais de sinal, com definições mais acuradas e mais claras. Atualmente tem-se utilizado imagens de ressonância magnética (RM) e tomografia computadorizada (TC) (Hironori Takemotoa, 2010) para uma criar um modelo mais próximo da realidade. A partir daí são criadas malhas para o método dos elementos finitos (método dos elementos finitos) (Hannukainen et al., 2007), método das linhas de transmissão (MLT) (Brandão, 2011), redes neurais artificiais (RNA) (Lucero et al., 2012) e o método das diferenças finitas (MDF) (Hironori Takemotoa, 2010), (Savioja, 2000). Neste projeto de graduação será usado o método dos elementos de contorno (MEC), que possui a vantagem de não ser necessário discretizar todo o domínio apenas sua fronteira. As medidas obtidas na análise acústica correspondem a medidas físicas definidas. O sinal glótico (sinal da fonte) sofre efeitos ao longo do trato vocal supra glótico até a saída deste para o meio externo (ação de filtro). Há uma somatória das ondas sonoras provenientes da fonte glótica com outras refletidas ao longo do trato vocal, sendo a resultante final (sinal de saída), o sinal irradiado pelos lábios (Sader and Hanayama, 2004).

A demanda por sintetizadores de voz tem crescido nos últimos tempos. Um dos métodos baseia-se no modelo do trato vocal humano. Mantendo um conjunto de regras que simulam a língua, os lábios e as pregas vocais. O sistema imita a voz humana ao produzir ressonância e articulação (de Castro, 2004). Muita pesquisa tem sido realizada sobre a modelagem do sistema da produção da voz, cujo funcionamento é complexo em seus diversos componentes, exigindo o desenvolvimento de melhores modelos computacionais para descrevê-los (Brandão, 2011).

A acústica de cavidades é objeto de estudo do grupo de dinâmica de sistemas (GDS) da Universidade de Brasília há um tempo. O GDS dispõe de uma cavidade de auralização para o estudo modal de cavidades. Essa cavidade é importante para o desenvolvimento de uma bancada experimental e numérica de estudo de acústica de cavidades. Tem-se também estudado a cavidade de um motor de foguete híbrido que tem potencial de serem mais seguros,

flexíveis e de menor custo comparado com outros tipos de propulsão química. E recentemente tem-se estudado a acústica do trato vocal, o grupo já possui um modelo físico da cavidade do trato vocal para a produção da vogal 'a' e simulações numéricas com programas em MEC em linguagem Matlab aproximado por tubos de seção retangular.

Este projeto de graduação tem interesse de dar uma contribuição nos estudos em acústica do trato vocal humano, por ser um área de interesse próprio além de possibilitar a familiarização com softwares como Matlab e GiD.

1.2 Motivação

Uma das principais motivações para a compreensão do mecanismo da produção de voz está no fato que a voz é um dos principais meios de comunicação humana. A análise feita por profissionais da voz como cantores e fonoaudiólogos é baseada na percepção auditiva dos mesmos. Tendo um embasamento científico e com valores quantitativos a análise terá muito mais confiabilidade e será menos subjetiva. Técnicas baseadas em análise acústica, por meio de processamento digital de sinais, podem ser aplicadas para a obtenção de características de sinais de voz que possam diferenciar vozes saudáveis (voz gerada a partir do funcionamento normal das pregas vocais) de vozes afetadas por patologia na laringe. A análise acústica permite a obtenção de uma ferramenta auxiliar de baixo custo, que pode auxiliar no pré-diagnóstico de patologias laríngeas sem a necessidade de exames invasivos. A possibilidade de trabalhar com MEC também motivou a realização do trabalho.

1.3 Objetivos

Contribuir no desenvolvimento de um método numérico na modelagem do trato vocal, utilizando o método de elementos de contorno é o método da matriz de transferência, criando uma ferramenta onde o trato vocal terá uma melhor aproximação com modelos que possuem seção transversal circulares e ainda pretende-se estudar o efeito da curvatura no trato vocal.

1.4 Metodologia

Com o intuito de validar o código implementado foi analisado primeiramente uma cavidade uniforme e unidimensional. Passado essa etapa foi resolvido tubos concatenados que representam as vogais [a], [i] e [u] utilizando a técnica da matriz de transferência e o método de elementos de contorno, aproveitando que se tem solução analítica para esses casos. E depois utilizou-se o MEC para estudar o efeito da curvatura.

1.5 Plano da Dissertação

O capítulo Acústica do trato vocal ilustra conceitos básicos e modelos matemáticos do trato vocal. No capítulo Fundamentos da acústica de cavidades tem-se a dedução da equação da onda e sua solução para cavidades retangular, cilíndricas para um tubo unidimensional utilizando a técnica da matriz de transferência. O quarto capítulo trata-se do método de elemento de contorno aplicado à acústica. Na seção seguinte é dedicado a implementação numérica mostrando como utilizar os programas fornecido pelo GDS como o Helmholtz3D feito em linguagem Matlab. Com o intuito de validar a metodologia aplicada foi iniciado o estudo com um tubo unidimensional uniforme. A análise foi estendida para a modelagem das vogais [a], [i] e [u] com um modelo de seção transversal circular, e ainda um estudo sobre o efeito da curvatura.

Capítulo 2 ACÚSTICA DO TRATO VOCAL

2.1 Descrição dos elementos

A voz humana é produzida pelo sistema fonador sendo que o mesmo não existe enquanto unidade anatômica, mas comporta-se como unidade funcional. Ou seja, um conjunto de estruturas envolvidas na digestão e também na respiração são os responsáveis pela produção vocal (Behlau et al., 1995). O mecanismo de produção da voz pode ser entendido como um sistema fonte–filtro (Fant, 1970) exemplificado pela figura 2.1. Onde o mesmo é reduzido em quatro grupos distintos.

O grupo de respiração corresponde a produção do fluxo ar que se inicia nos pulmões e termina no final da traqueia participando do processo os músculos do diafragma, abdominais e peitorais. O segundo grupo chamado de vibração se inicia nas pregas vocais que está na laringe e é responsável pelo sinal glotal. O ruído produzido sofre alterações no terceiro grupo chamado de grupo de ressonância que amplificam o sinal e dar ênfase a determinadas componentes harmônicas. Fazem parte desse grupo a faringe e as cavidades oral e nasal. E por fim temos o grupo de articulação composto pela língua, palato mole, maxilar, lábios e os dentes que modificam as propriedades dos órgãos do sistema de ressonância (Brandão, 2011), (Cataldo et al., 2004).

O trato vocal é composto pela, língua, lábios, mandíbula e úvula, denominados articuladores ativos, pelos dentes e palato, articuladores passivos e pela faringe, laringe e cavidade nasal (Bistafa, 2006) que estão inclusos nos grupos de ressonância e de articulação.

A figura 2.2 mostra uma representação esquemática do sistema de produção de vogais onde o trato vocal é tratado como um tubo uniforme e o fluxo de ar é interrompido pela vibração das pregas vocais.

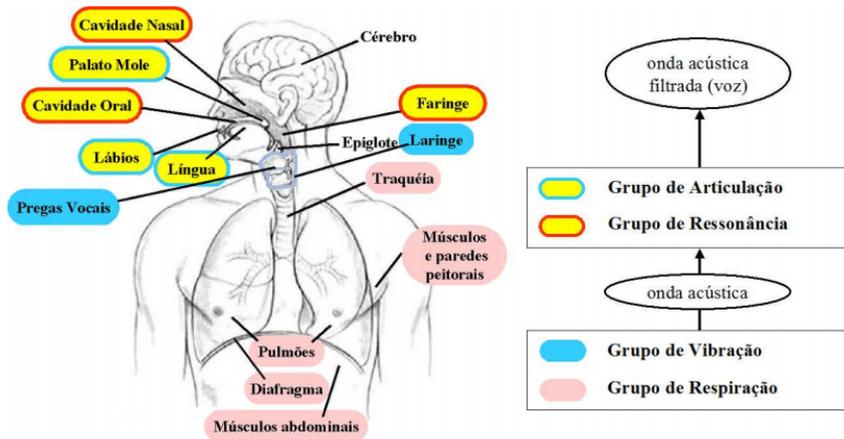


Figura 2.1: Aparelho fonador (Brandão, 2011)

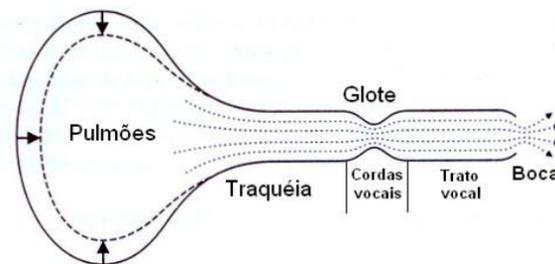


Figura 2.2: Representação do sistema fonador (Cataldo et al., 2004).

2.2 Mecanismo da produção da voz

O desenvolvimento do conceito da produção da voz passou por quatro principais fases. Na primeira, denominada mística, os homens procuravam explicar os fenômenos naturais através da magia, da religião ou pela ação sobrenatural. Na segunda denominada metafísica, o conhecimento era baseado na observação, embora fosse puramente especulativo. A terceira fase, chamada tradicional, toda informação era baseada em tradição ou revelação, nas grandes autoridades políticas e religiosas da época. A quarta e última fase, denominada realista, iniciou-se com o Renascimento, quando a medicina passou a ser considerada uma ciência, sendo esperado que os médicos fossem habilitados tanto em arte quanto em ciência. As principais teorias de produção da voz são resumidas abaixo (Behlau et al., 1995).

- Teoria da corda vibrante: as pregas vocais vibram pela passagem da corrente de ar.
- Teoria da palheta: o ar que escapa no afastamento temporário das pregas vocais produz o som.

- Teoria mioelástica: a tensão dos tecidos produz os ciclos vibratórios repetidos.
- Teoria neurocronáxica: os impulsos nervosos vibram as pregas vocais na mesma frequência do som.
- Teoria mioelástica-aerodinâmica: A elasticidade dos músculos e a pressão do ar produzem o som.
- Teoria muco-ondulatória: a mucosa define a vibração das pregas vocais.
- Teoria neuroscilatória: a voz é um fenômeno direto da atividade assincrônica do músculo vocal.
- Teoria osciloimpedancional: a laringe é um oscilador complexo com amortização reduzida.

Uma teoria bastante aceita e que é suficiente para a análise estudada no projeto é a teoria mioelástica-aerodinâmica proposta por van der Berg (1958) e (Titze, 2001). Segundo ela o movimento de abrir e fechar as pregas vocais é função das propriedades mecânicas dos tecidos musculares, em especial os das pregas vocais, e as forças aerodinâmicas que se distribuem ao longo da laringe durante a fonação (Cataldo et al., 2004).

Devido ao movimento de expansão dos pulmões é gerado um gradiente de pressão entre a frente da boca e os pulmões causando assim um escoamento de ar. A produção da voz se inicia com as pregas vocais inicialmente, quando a força do ar expelido dos pulmões vence a força elástica exercida pelos músculos laríngeos o mesmo passa pelas pregas vocais causando a vibração da mucosa que as revestem. Devido ao efeito de Bernoulli (Bergen et al., 2012) as pregas vocais se fecham assim é gerado um fluxo periódico e pulsos de ar que acarreta em um ruído similar ao de uma campainha, denominado sinal glotal (Brandão, 2011) como na figura 2.3.

O sinal é modificado pelas ressonâncias do trato vocal amplificando-o e modificando determinadas componentes harmônicas, caracterizando os fonemas (Cataldo et al., 2004), (Bis-

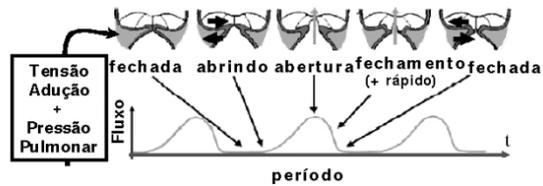


Figura 2.3: Produção do sinal glotal (Titze, 2001).

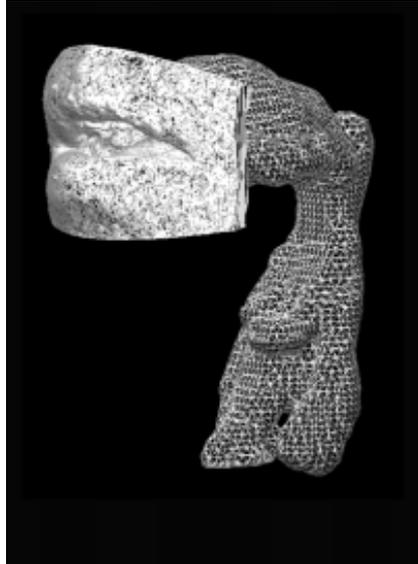


Figura 2.4: Geometria do trato vocal criada a partir de imagens de ressonância magnética (Hironori Takemotoa, 2010).

tafa, 2006). Que pode ser modificado alterando os articuladores ativos dando liberdade para uma infinidade de sons. A figura 2.4 ilustra o trato vocal retirado a partir de imagens de ressonância magnética.

2.3 Frequência do formante

Os sinal glotal produzido pelas pregas vocais são modificados no trato vocal, que ressoa na suas frequências naturais. Essas frequências de ressonância são denominadas frequências formantes. Segundo Urbassek (2014) o termo formante é a resposta da frequência natural porém é comumente usado como sendo a própria frequência natural. A produção de vogais ocorrem devido a alterações na geometria do trato vocal assim mudando as frequências formantes. Para uma voz masculina temos as seguintes faixas de formantes (Bistafa, 2006):

- primeiro formante, $150 - 850Hz$

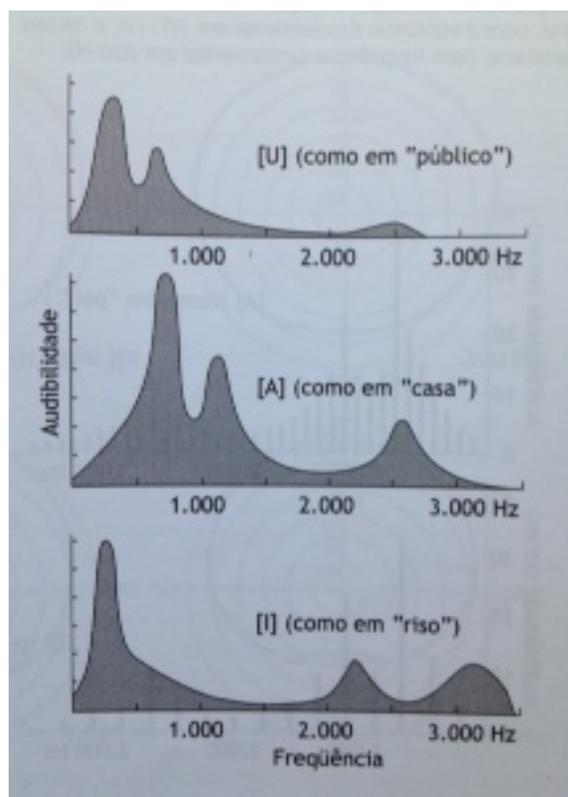


Figura 2.5: Espectro sonoros dos formantes das vogais [u], [a] e [i] (Bistafa, 2006).

- segundo formante, $500 - 2500 Hz$
- terceiro formante, $1500 - 3500 Hz$
- quarto formante, $2500 - 4800 Hz$

Pode-se ver na figura 2.5 que as vogais possuem picos no espectro nos formantes. Nota-se também que os formantes vocais ocorrem em frequências distintas dentro de cada faixa listadas acima.

2.4 Modelos da produção da voz

Para melhor entender o aparelho fonador foram desenvolvidos modelos mecânicos que simplificam o estudo. Os modelos existentes se diferenciam no número de graus de liberdade utilizados para representar as pregas vocais. Tem-se o modelo de uma única massa proposto por (Flanagan, 1968) que está ilustrado na figura 2.6. Os pulmões aparecem como

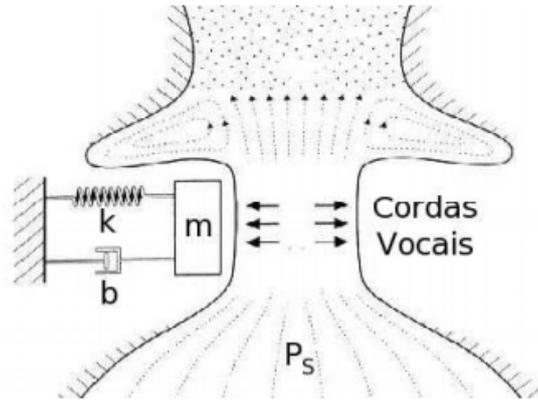


Figura 2.6: Modelo aparelho fonador proposto por Flanagan (1968).

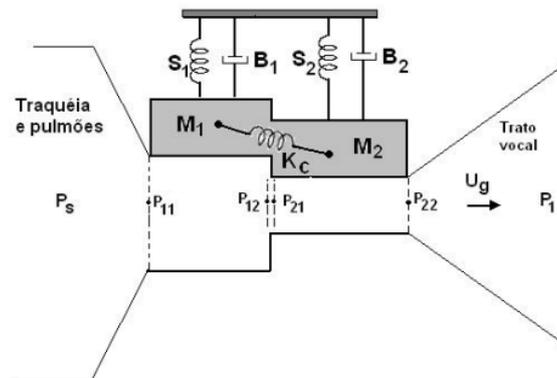


Figura 2.7: Modelo aparelho fonador com dois graus de liberdade (Ishizaka and Flanagan, 1972).

uma fonte de pressão que se mantém constante, as pregas vocais são consideradas como um sistema massa mola amortecedor de um grau de liberdade. Um forçamento $F(t)$ representa o produto da pressão de ar na glote pela área da superfície intraglotal.

Outros modelos mais rebuscados considerando mais graus de liberdade estão ilustrados nas figuras 2.7, 2.8 extraídas dos trabalhos de Titze (2001) e Ishizaka and Flanagan (1972).

Como a modulação da voz é feita pelo trato vocal é de se esperar que um modelo mais realista represente mais fielmente o sistema. Uma boa aproximação do formato do trato vocal para as vogais [a], [i], [u] é ilustrado nas figuras 2.9, 2.10, 2.11, onde o diâmetro maior é de $40mm$ e o menor é de $15mm$.

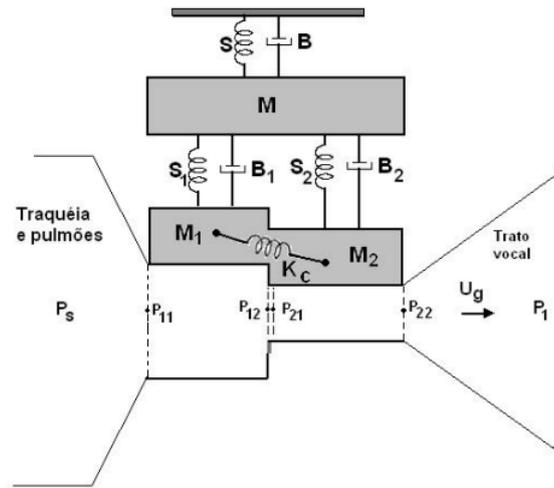


Figura 2.8: Modelo aparelho fonador com três graus de liberdade (Titze, 2001).



Figura 2.9: Aproximação para o trato vocal da vogal [a].

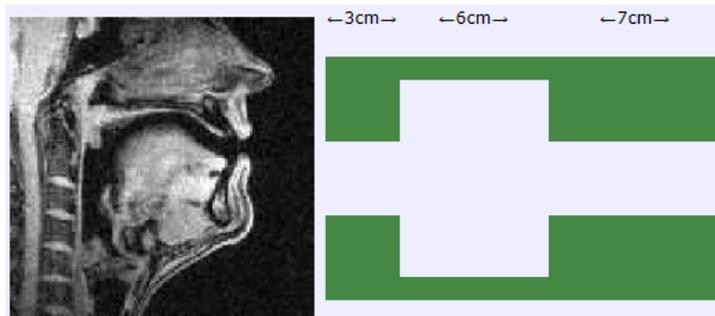


Figura 2.10: Aproximação para o trato vocal da vogal [i].

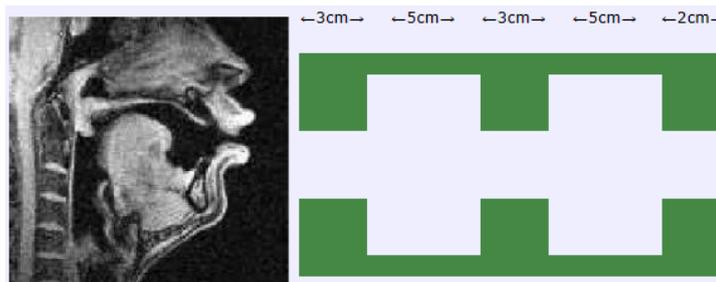


Figura 2.11: Aproximação para o trato vocal da vogal [u].

Capítulo 3 FUNDAMENTOS DA ACÚSTICA DE CAVIDADES

3.1 Equação da onda

Segundo Gerges (2001) a equação da onda tem muitas características em comum com ondas longitudinais que se propagam ao longo de um tubo. Por esse motivo primeiramente será realizado a dedução da equação da onda unidimensional e depois a mesma será generalizada para ondas acústicas com propagação tridimensional. Serão desprezados os efeitos gravitacionais e o meio é considerado homogêneo, isotrópico e sem viscosidade.

A figura 3.12 ilustra uma onda plana se propagando dentro de um tubo com seção uniforme onde, S é a seção transversal, x é a coordenada da posição de equilíbrio da partícula e ξ deslocamento da partícula da posição de equilíbrio no eixo de propagação. Utilizando o princípio da conservação da massa tem-se:

$$\rho S dx = \rho_1 S dx \left(1 + \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \quad (3.1)$$

como os volumes são diferentes para que a massa se conserve os valores das densidades ρ_1 e ρ não são iguais. Sabendo que s é a condensação em qualquer ponto definida como:

$$s = \left(\frac{\rho_1 - \rho}{\rho} \right) \quad (3.2)$$

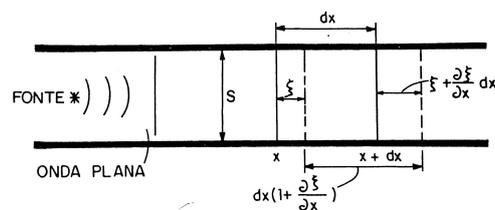


Figura 3.12: Deslocamento do fluido em um tubo unidimensional uniforme devido a passagem de onda sonora (Gerges, 2001)

dessa forma tem-se que:

$$\rho_1 = \rho(1 + s) \quad (3.3)$$

substituindo a equação 3.3 na equação 3.1 e cancelando o termo comum ρdx tem-se:

$$(1 + s) \left(1 + \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) = 1 \quad (3.4)$$

como as mudanças na densidade e deslocamento molecular são pequenas, é possível desprezar o produto de s por $\frac{\partial \xi}{\partial x}$ resultando então em:

$$s = - \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \quad (3.5)$$

a equação 3.5 é conhecida como equação da continuidade.

Para dar sequência a dedução deve-se recorrer a propriedades termodinâmicas do fluido que relaciona a pressão com a densidade. Quando um fluido está transmitindo ondas acústicas às variações de temperatura entre as partes vizinhas são pequenas dessa forma o processo pode ser considerado adiabático. A equação 3.6 descreve o processo adiabático para gases perfeitos.

$$\frac{P_1}{P} = \left(\frac{\rho_1}{\rho} \right)^\gamma \quad (3.6)$$

Para generalizar a equação 3.6 para qualquer fluido considera-se que

$$dP = \left(\frac{dP}{d\rho} \right) d\rho \quad (3.7)$$

como em acústica ocorrem pequenas mudanças pode-se substituir dP pela pressão acústica P e a mudança incremental $d\rho$ por $s\rho$ assim tem-se:

$$P = \left(\frac{dP}{d\rho} \right) \rho s \quad (3.8)$$

sabendo que a velocidade de propagação da onda acústica em um meio fluido é dada por:

$$c^2 = \frac{\partial P}{\partial \rho} \quad (3.9)$$

substituindo a equação 3.9 na equação 3.8 tem-se:

$$P = \rho c^2 \rho s \quad (3.10)$$

para retirarmos o termo que representa a condensação s basta utilizar a equação da continuidade 3.5 dessa forma obtém-se:

$$P = -\rho c^2 \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \quad (3.11)$$

fazendo o equilíbrio dinâmico das forças tem-se:

$$-\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) = \rho \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \right) \quad (3.12)$$

combinando a equação 3.12 com a equação 3.11 obtém-se:

$$\left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \right) = c^2 \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \right) \quad (3.13)$$

ou

$$\left(\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \right) = c^2 \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right) \quad (3.14)$$

assim obteve-se a equação da equação da onda acústica plana.

Considerando que a partícula fluida possa se movimentar nas direções x, y, z , seu deslocamento será representado pelo vetor $\vec{d} = \{\xi, \delta, \zeta\}$. Similarmente a equação 3.4, para o caso tridimensional tem-se:

$$(1 + s) \left(1 + \frac{\partial \xi}{\partial x}\right) \left(1 + \frac{\partial \delta}{\partial y}\right) \left(1 + \frac{\partial \zeta}{\partial z}\right) = 1 \quad (3.15)$$

ou

$$s = - \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \delta}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial z} \right) = -\nabla \vec{d} \quad (3.16)$$

substituindo a equação 3.16 na equação 3.10 obtém-se:

$$P = -\rho c^2 \nabla \vec{d} \quad (3.17)$$

fazendo o equilíbrio dinâmico para cada componente temos:

$$- \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \delta}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial z} \right) \quad (3.18)$$

ou

$$-\nabla^2 P = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \nabla \vec{d} \quad (3.19)$$

utilizando a equação 3.17 e 3.18 e rearranjando temos a equação geral da onda 3.20

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 P \quad (3.20)$$

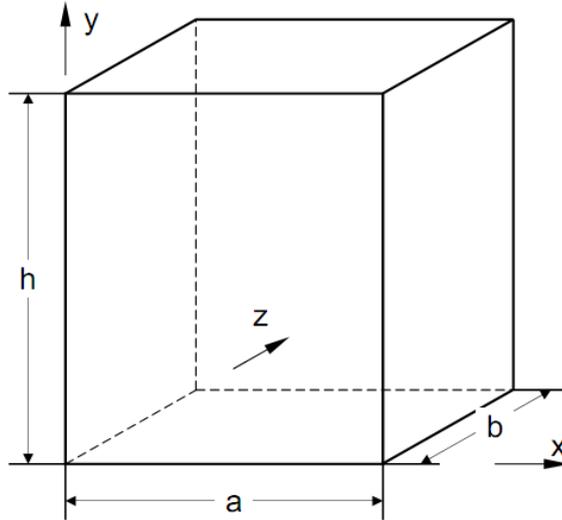


Figura 3.13: Cavidade prismática

3.2 Solução da equação da onda para cavidade retangular

Para resolvermos problemas de acústicas em uma cavidade prismática uniforme como na figura 3.13. Deve-se solucionar a equação de Helmholtz (Pedroso et al., 2000), equação 3.21

$$\nabla^2 \phi - \frac{1}{c^2} \ddot{\phi} = 0 \quad (3.21)$$

Onde c é a velocidade do som e ϕ o potencial de velocidade que pode ser expresso por um produto de funções, uma parte dependente do espaço e a outra do tempo mostrado na equação 3.22.

$$\phi = F(x, y, z).T(t) \quad (3.22)$$

Para cavidades com paredes rígidas têm-se as seguintes condições de contorno:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \vec{n}} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial F}{\partial \vec{n}} = 0 \quad (3.23)$$

para $\begin{cases} x = 0 & x = a \\ y = 0 & y = b \\ z = 0 & z = h \end{cases}$

Utilizando o método de separação de variáveis, tem-se:

$$\frac{\nabla^2 F}{F} = \frac{1}{c^2} \frac{\ddot{T}}{T} = m^2 \quad (3.24)$$

Logo

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + m^2 \right) F = 0 \quad (3.25)$$

e

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - c^2 m^2 \right) T = 0 \quad (3.26)$$

Separando a equação 3.25 em cada coordenada tem-se:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + p^2 \right) F = 0 \quad (3.27)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} + q^2 \right) F = 0 \quad (3.28)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + r^2 \right) F = 0 \quad (3.29)$$

Onde

$$m^2 = p^2 + q^2 + r^2 \quad (3.30)$$

Resolvendo a equação diferencial 3.27, tem-se:

$$F(x) = A \cos(px) \quad (3.31)$$

Repetindo para as outras coordenadas e reagrupando-as, tem-se:

$$F(x, y, z) = A \cos(px) \cos(qy) \cos(rz) \quad (3.32)$$

Ou ainda

$$F(x, y, z) = A_{i,j,k} \cos\left(\frac{i\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{j\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{k\pi z}{h}\right) \quad (3.33)$$

Onde

$$m^2 = \pi^2 \left(\frac{i^2}{a^2} + \frac{j^2}{b^2} + \frac{k^2}{h^2} \right) \quad (3.34)$$

Porém aplicando a transformada de Fourier na equação 3.26, tem-se:

$$m^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \quad (3.35)$$

Substituindo a equação 3.35 na equação 3.34, obtém-se:

$$\omega_{i,j,k} = \pi c \sqrt{\frac{i^2}{a^2} + \frac{j^2}{b^2} + \frac{k^2}{h^2}} \quad (3.36)$$

$$\text{,para } \begin{cases} i = 0, 1, 2, 3, \dots \\ j = 0, 1, 2, 3, \dots \\ k = 0, 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

Assim a solução geral da equação 3.21 fica:

$$\phi = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} A_{i,j,k} \cos\left(\frac{i\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{j\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{k\pi z}{h}\right) e^{i\omega t} \quad (3.37)$$

As formas modais são facilmente obtidas, basta fazer $p = \rho \dot{\phi}$

Quando se tem uma cavidade aberta obtêm-se novas condições de contorno. Vejamos então a solução para uma cavidade aberta em $z = h$

Condições de contorno:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \vec{n}} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial F}{\partial \vec{n}} = 0 \quad , \text{ para } z = 0 \quad (3.38)$$

$$\phi = 0 \quad \Rightarrow \quad F = 0 \quad , \text{ para } z = h \quad (3.39)$$

logo a solução da equação 3.27 é:

$$F = A_z \cos(rz) + B_z \cos(rz) \quad (3.40)$$

Assim para $z = 0$, obtém-se:

$$B_z = 0 \quad (3.41)$$

e para $z = h$, temos:

$$r = \frac{k\pi}{2h} \quad (3.42)$$

Então a equação 3.40 fica da seguinte forma:

$$F = A_z \cos\left(\frac{k\pi}{2h}z\right) \quad , \text{para } k = 1, 3, 5, \dots \quad (3.43)$$

logo a solução geral do problema é:

$$\phi = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} A_{i,j,k} \cos\left(\frac{i\pi z}{a}\right) \cos\left(\frac{j\pi z}{b}\right) \cos\left(\frac{k\pi z}{2h}\right) e^{i\omega t} \quad (3.44)$$

e

$$\omega_{i,j,k} = \pi c \sqrt{\frac{i^2}{a^2} + \frac{j^2}{b^2} + \frac{k^2}{4h^2}} \quad (3.45)$$

$$\text{,para } \begin{cases} i = 0, 1, 2, 3, \dots \\ j = 0, 1, 2, 3, \dots \\ k = 0, 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

De maneira análoga, para uma cavidade aberta em $z = 0$, obtém-se:

$$\phi = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} A_{i,j,k} \cos\left(\frac{i\pi z}{a}\right) \cos\left(\frac{j\pi z}{b}\right) \cos\left(\frac{k\pi z}{2h}\right) e^{i\omega t} \quad (3.46)$$

e

$$\omega_{i,j,k} = \pi c \sqrt{\frac{i^2}{a^2} + \frac{j^2}{b^2} + \frac{k^2}{h^2}} \quad (3.47)$$

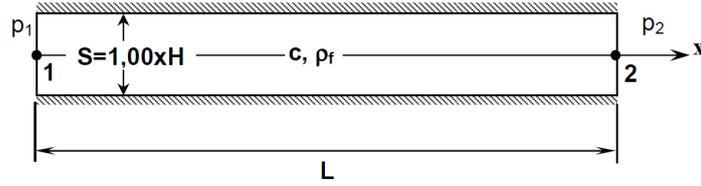


Figura 3.14: Esquema unidimensional seção constante.

$$\text{,para } \begin{cases} i = 0, 1, 2, 3, \dots \\ j = 0, 1, 2, 3, \dots \\ k = 0, 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

3.3 Solução para cavidades unidimensionais

A matriz de transferência proposta por Gibert (1988) é uma solução utilizada quando se tem tubos unidimensionais e não uniformes, as seções transversais são variáveis. Uma aproximação para o trato vocal humano pode ser feita desta maneira. Definem-se as variáveis de fluxo de pressão e pressão em cada extremidade que compõe a cavidade. A matriz de transferência é a matriz que faz a relação entre essas extremidades. A seguir será apresentada a dedução da matriz de transferência.

Sabendo que a equação da Helmholtz unidimensional, onde a parcela dependente do tempo é uma função harmônica, tem-se (Morais, 2000):

$$\frac{d^2 p}{dx^2} + \frac{1}{k^2} p = 0 \quad (3.48)$$

Onde $k = \frac{c}{\omega}$ é o número de onda. Resolvendo esta equação diferencial temos:

$$p(x, \omega) = A \sin\left(\frac{\omega}{c} x\right) + B \cos\left(\frac{\omega}{c} x\right) \quad (3.49)$$

A figura 3.14 mostra um esquema de um tubo unidimensional uniforme, onde S é a área da seção transversal, P1 e P2 são as pressões nos pontos 1 e 2 respectivamente, L é o comprimento de tubo, c a velocidade do som no ar e ρ a densidade do fluido.

Fazendo o equilíbrio dinâmico de forças para uma partícula de fluido infinitesimal tem-se:

$$\frac{dp}{dx} + \rho_f \ddot{X}_f = 0 \quad (3.50)$$

Sabendo que a vazão mássica acústica q é:

$$q = \rho_f S V_f = \rho_f S \dot{X}_f \quad (3.51)$$

Substituindo a equação 3.51 na equação 3.50 tem-se:

$$\frac{dp}{dx} + \frac{\dot{q}}{S} = 0 \quad (3.52)$$

Utilizando o método da transformada de Fourier na equação 3.52 tem-se:

$$\frac{dp}{dx} + \frac{i\omega}{S} q = 0 \quad (3.53)$$

Assim isolando o termo da vazão mássica chegamos a:

$$q = \frac{iS}{\omega} \frac{dp}{dx} \quad (3.54)$$

Derivando a equação 3.49 em relação à x e substituindo na equação 3.54 tem-se:

$$q(x, \omega) = \frac{iS}{c} \left(A \cos\left(\frac{\omega}{c}x\right) - B \sin\left(\frac{\omega}{c}x\right) \right) \quad (3.55)$$

Para um tubo com comprimento L e seção transversal S constantes busca-se utilizar as equações 3.49 e 3.55 em função de q_1 e p_1 para calcular o valor de q_2 e p_2 . Assim para encontrar os valores das constantes A e B analisam-se as equações em $x=0$.

$$p_1 = p(0, \omega) = B \quad (3.56)$$

$$q_1 = q(0, \omega) = \frac{iS}{c}A \quad (3.57)$$

Agora se utiliza o mesmo processo com $x=L$. Assim tem-se:

$$\lambda = \frac{\omega L}{c} \quad (3.58)$$

Assim temos o valor das constantes A e B e o valor de λ assim escrevendo o sistema a equação 3.49 e a equação 3.55 na forma matricial tem-se:

$$\begin{Bmatrix} p_2 \\ q_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\lambda) & \frac{c}{iS} \sin(\lambda) \\ \frac{-iS}{c} \sin(\lambda) & \cos(\lambda) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_1 \\ q_1 \end{Bmatrix} \quad (3.59)$$

Onde a matriz que relaciona o ponto 1 ao ponto 2 e denominada matriz de transferência.

Para cavidades não uniformes deve seccionar o tubo em porções uniformes e juntar cada pedaço por uma matriz de transferência diferente. Essa técnica também nos permite determinar as formas modais nas cavidades não uniformes. Tem-se então:

$$\begin{Bmatrix} p_3 \\ q_3 \end{Bmatrix} = A_{(3)(1)} \begin{Bmatrix} p_1 \\ q_1 \end{Bmatrix} \quad (3.60)$$

Em que $A_{(3)(1)}$ é a matriz de transferência que relaciona o ponto 1 ao 3. De forma análoga pode-se escrever a matriz de transferência do ponto 1 ao 2, equação 3.61.

$$\begin{Bmatrix} p_2 \\ q_2 \end{Bmatrix} = A_{(2)(1)} \begin{Bmatrix} p_1 \\ q_1 \end{Bmatrix} \quad (3.61)$$

Sabendo que não existe restrição condições finais e iniciais na montagem das matrizes pode-se da mesma maneira montar a equação 3.62

$$\begin{Bmatrix} p_3 \\ q_3 \end{Bmatrix} = A_{(3)(2)} \begin{Bmatrix} p_2 \\ q_2 \end{Bmatrix} \quad (3.62)$$

Onde $A_{(3)(2)}$ relaciona o ponto 2 ao 3. Utilizando as equações 3.60 3.61 3.62 determina-se uma a equação 3.63 que relaciona o ponto 1 diretamente com o ponto 3.

$$\begin{Bmatrix} p_3 \\ q_3 \end{Bmatrix} = A_{(3)(2)} \cdot A_{(2)(1)} \begin{Bmatrix} p_1 \\ q_1 \end{Bmatrix} \quad (3.63)$$

Para o caso geral onde se tem um número N de cavidades tem-se:

$$\begin{Bmatrix} p_N \\ q_N \end{Bmatrix} = A_{(N)(N-1)} \cdot A_{(N-1)(N-2)} \cdot A_{(N-2)(N-3)} \dots A_{(3)(2)} \cdot A_{(2)(1)} \begin{Bmatrix} p_1 \\ q_1 \end{Bmatrix} \quad (3.64)$$

A partir de uma solução uniforme e unidimensional obtêm-se as matrizes $A_{(i)(i-1)}$ que modela acusticamente a cavidade no determinado segmento entre os pontos i e $i - 1$ assim para um valor qualquer de L e para múltiplas seções S obtêm-se o comportamento acústico da cavidade como um todo. Pode-se então escrever a equação 3.64 da seguinte forma:

$$\begin{Bmatrix} p_N \\ q_N \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_1 \\ q_1 \end{Bmatrix} \quad (3.65)$$

Onde os termos da matriz A_{11} , A_{12} , A_{21} e A_{22} são determinados pela multiplicação das N matrizes. Escrevendo a equação 3.65 como um sistema de equações tem-se que:

$$p_N = A_{11} \cdot p_1 + A_{12} \cdot q_1 \quad (3.66)$$

$$q_N = A_{21} \cdot p_1 + A_{22} \cdot q_1 \quad (3.67)$$

Para se obter então os valores das variáveis desconhecidas faz-se necessário determinar as condições de contorno do objeto de estudo. Sabendo que a condição de contorno para uma extremidade aberta é $p = 0$ e para fechada é $q = 0$ a tabela 3.1 nos fornece os valores dos coeficientes da matriz de transferência para as condições de contorno possíveis.

Pode-se então determinar as frequências de ressonância e os modos para uma cavidade uni-

Tabela 3.1: Coeficientes da matriz de transferência em função das condições de contorno.

Condição de Contorno	Condição necessária
Aberta-Aberta	$A_{12} = 0$
Aberta-Fechada	$A_{22} = 0$
Fechada-Aberta	$A_{11} = 0$
Fechada-Fechada	$A_{21} = 0$

dimensional com área transversal variável.

3.4 Escala decibel

A unidade decibel (dB) foi criada em homenagem a Alexander Graham Bell com o intuito de facilitar a comparação entre potências de sistemas de telefonia utilizando uma escala que varria uma grande faixa de variação lineares (Bistafa, 2006). Tomando como exemplo o ouvido humano a $1000Hz$ a intensidade acústica capaz de causar sensação de dor é de 10^{12} vezes a intensidade capaz de causar a sensação de audição (Gerges, 2001). Porém com unidade *bel* ficou difícil de mostrar com clareza variações menores assim criaram o decibel que foi definido como (de Almeida, 2014):

$$IL = 10 \log \left(\frac{I}{I_{ref}} \right) \quad (3.68)$$

onde o valor de referencia I_{ref} é de $10^{-12} W/m^2$ que é a intensidade mínima que uma pessoa com audição normal pode perceber (de Almeida, 2014).

3.5 Velocidade do som em tubos

M Valdan and Oss (2014) apresenta um método para se obter a velocidade do do som em tubos levando em consideração sua rugosidade. Um ponto relevante a é que seu valor é diferente do obtido no ar livre (aberta) ou, de modo equivalente, no interior de um tubo desconsiderando a rugosidade. Isso acontece devido a interação do fluido com as ondulações e conduz a uma redução da velocidade de som por um factor que. A correcção para ser aplicado está relacionada com a geometria da ondulação e pode ser retomado, o objectivo de expressar a velocidade efectiva de som dentro do tubo, de acordo com a equação 3.69.

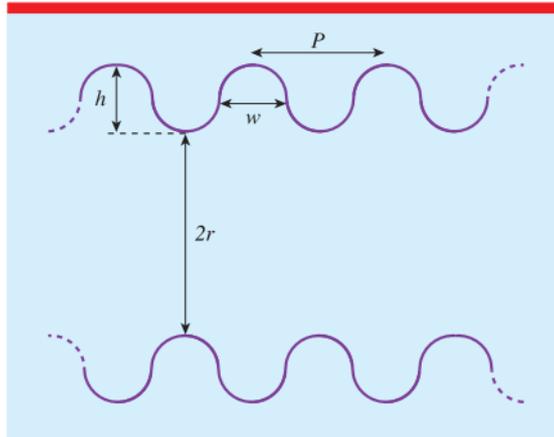


Figura 3.15: Modelo para análise da rugosidade em tubos (M Valdan and Oss, 2014).

$$c_1 = \frac{c}{\sqrt{1 + \frac{2hw}{rp}}} \quad (3.69)$$

Onde, c é a velocidade do som no ar desconsiderando o efeito da rugosidade, h e w são altura e a largura da rugosidade p distancia entre os picos e r o raio como mostrado na figura 3.15

Capítulo 4 MODELAGEM DE ACÚSTICA DE CAVIDADES PELO MÉTODO DE ELEMENTOS DE CONTORNO

Alguns problemas de engenharia tem sua solução exata difícil ou até impossível de ser determinada. Assim foram desenvolvidas técnicas matemáticas que encontram valores aproximados conhecidas como métodos numéricos. Os métodos mais utilizados são:

- Método das diferenças finitas (MDF)
- Método dos elementos finitos (MEF)
- Método dos elementos de contorno (MEC).

Esses métodos simplificam problemas contínuos discretizando-o (Azevedo, 2007). O método de elementos de contorno consiste em obter as equações integrais somente com informações do contorno (Albuquerque, 2009). O MEC tem a vantagem de diminuir em uma ordem a dimensão do problema se comparado com os outros métodos citados (Albuquerque, 2009). O resultado disso é uma diminuição na quantidade de entrada de dados e no tempo de processamento. O MEC é muito utilizado em problemas onde o domínio é infinito como no caso da acústica. O MEC transforma as equações diferenciais em integrais de contorno não necessitando discretizar todo o domínio, apenas o seu contorno. Cada pedaço do contorno discretizado recebe o nome de elementos de contorno demonstrado na figura 4.16

Assim o contorno S é dado pela soma de cada elemento s_1, s_2, \dots, s_n . Os elementos de contorno podem ser constantes, lineares contínuos e quadráticos contínuos (Albuquerque, 2009). Este trabalho ficará restrito aos elementos constantes. A figura 4.17 mostra a discretização do domínio por elementos constantes. Onde o contorno é aproximado por segmentos de reta com um nó no meio de cada segmento.

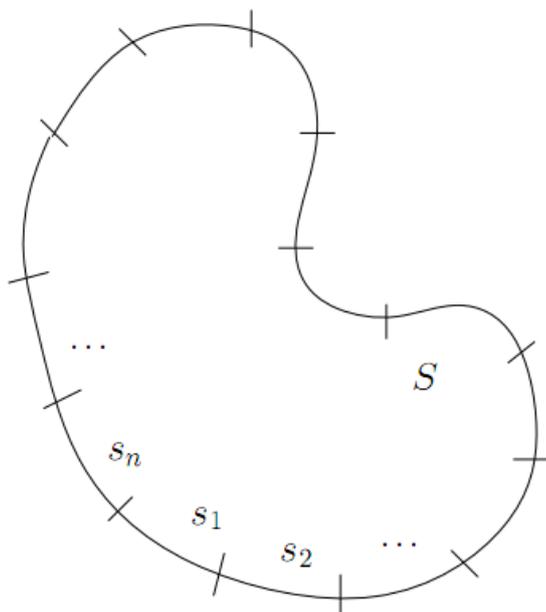


Figura 4.16: Discretização do contorno (Albuquerque, 2009)

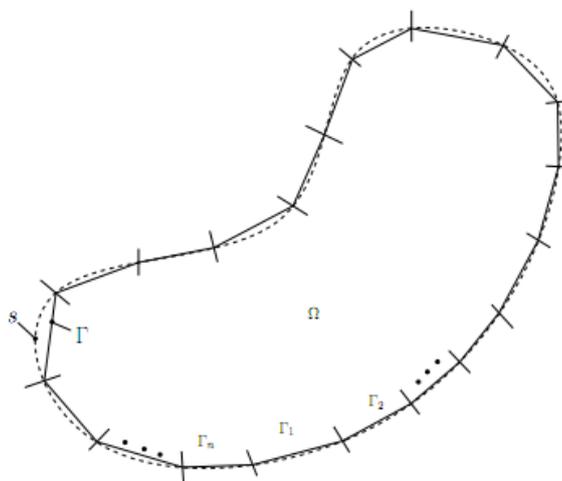


Figura 4.17: Discretização do contorno por segmentos de reta (Albuquerque, 2009)

Considere-se que ao longo de cada elemento a pressão e o fluxo sejam constantes. Como visto no capítulo 3 a equação geral da onda é dada por 3.20. Em um domínio Ω de contorno Γ , considera-se um escalar governado pela equação da onda com forças de campos não nulas dadas por $\frac{b}{c^2}$ no domínio Ω pela equação 4.70 (Ferreira, 2012):

$$\nabla^2 p + \frac{1}{c^2} b = \frac{1}{c^2} \frac{\delta^2 p}{\delta t^2} \quad (4.70)$$

segundo Dominguez (1993) para problemas de propagação de ondas escalares podemos chegar a representação integral da equação da onda, equação 4.71:

$$\int_s \left(\frac{\delta p^*}{\delta n} * p^* \right) ds + \int_s \frac{1}{c^2} (b * p^* + p_0 \dot{p}^* + v_0 p^*) ds = \int_s \left(\frac{\delta p^*}{\delta n} * p \right) ds + \int_s \frac{1}{c^2} (b * p + p_0 \dot{p} + v_0 p) ds \quad (4.71)$$

onde n é o vetor normal ao contorno e $*$ é a convolução de Riemann. O Campo $p^*(x, t)$ é assumido como a solução escalar do domínio infinito sob a forma de um impulso pontual unitário em 4.72

$$\frac{1}{c^2} b^*(x, t) = \delta(t) \delta(x - \xi) \quad (4.72)$$

onde δ é o Delta de Dirac e ξ é o ponto de aplicação da fonte no instante t . Utilizando as propriedades do Delta de Dirac na equação 4.71 obtêm-se:

$$C(\xi) p(\xi, t) = \int_s \left(\frac{\delta p}{\delta n} * p^* - p * \frac{\delta p^*}{\delta n} \right) ds + \int_s \frac{1}{c^2} (b * p^*) ds + \int_s \frac{1}{c^2} (p_0 \dot{p}^* + v_0 p^*) ds \quad (4.73)$$

$$\text{onde } C(\xi) = \begin{cases} 1 & \text{se } \xi \in s \\ 0 & \text{se } \xi \notin s \\ \frac{1}{2} & \text{se } \xi \in s \text{ suave} \end{cases}$$

Se $\xi \in s$ as integrais de contorno são integrais de valores principais de Cauchy (Azevedo, 2007). Considerando o problema como harmônico tem-se que:

$$p(x, t) = p(x, \omega)e^{i\omega t} \quad (4.74)$$

Assim a convolução torna-se um produto escalar e a equação da onda com solução fundamental p^* fica (Ferreira, 2012):

$$\nabla^2 p^* + \frac{\omega^2}{c^2} p^* + \frac{1}{\mu} \delta(x - \xi) = 0 \quad (4.75)$$

Dominguez (1993) e Kirkup (2007) obtiveram a solução da equação fundamental que é:

$$p^* = \frac{1}{2\pi\mu} K_0 \left(\frac{i\omega r}{c} \right) \quad (4.76)$$

K_0 é chamado de função modificada de Bessel, μ é o módulo de elasticidade e r a distância com relação a fonte. Assim a solução fundamental e dada por:

$$\frac{\delta p^*}{\delta n} = \frac{\omega}{2\pi c} \frac{\delta r}{\delta n} K_1 \left(\frac{i\omega r}{c} \right) \quad (4.77)$$

Assim para considerando as propriedades do delta de Dirac para representação integral da equação da onda harmônica linearizada em MEC é:

$$C(\xi)p(\xi, t) + \int_s p \frac{\delta p^*}{\delta n} ds = \int_s \frac{\delta p}{\delta n} p^* ds \quad (4.78)$$

Para qualquer ponto $i = \xi$, temos que $C(\xi) = \frac{1}{2}$ esse é um caso de singularidade explicado em Dominguez (1993) Reescrevendo a equação 4.78 onde o contorno Γ foi discretizado em N partes tem-se:

$$C(\xi)p_j(\xi, t) + \sum_{i=1}^N \int_{s_i} p \frac{\delta p^*}{\delta n} ds = \sum_{i=1}^N \int_{s_i} \frac{\delta p}{\delta n} p^* ds \quad (4.79)$$

Assim calcula-se a integral em cada segmento para depois fazer o somatório e obter o resultado da integral do contorno completo. A resolução pode ser feita utilizando o método da Quadratura de Gauss. É importante lembrar que para elementos constantes $C(\xi) = \frac{1}{2}$ como a pressão p e o fluxo são considerado constantes $\frac{\delta p}{\delta n}$ temos:

$$C(\xi)p_j(\xi, t) + \sum_{i=1}^N \left(\int_{s_i} \frac{\delta p^*}{\delta n} ds \right) p_i = \sum_{i=1}^N \left(\int_{s_i} p^* ds \right) \frac{\delta p_i}{\delta n} \quad (4.80)$$

Escrevendo na forma matricial têm-se:

$$H_{ij} = C(\xi) + \sum_{i=1}^N \left(\int_{s_i} \frac{\delta p^*}{\delta n} ds \right), C(\xi) = \begin{cases} \frac{1}{2} \text{ se } i = j \\ 0 \text{ se } i \neq j \end{cases} \quad (4.81)$$

$$G_{ij} = \sum_{i=1}^N \left(\int_{s_i} p^* ds \right) \quad (4.82)$$

logo, a equação 4.80 pode ser escrita como:

$$\sum_{i=1}^N H_{ij} p_i = \sum_{i=1}^N G_{ij} \frac{\delta p_i}{\delta n} \quad (4.83)$$

temos então um sistema de equações onde as variáveis são o fluxo de pressão e a pressão acústica podemos escrever a equação 4.83 como:

$$[H] \{p\} = [G] \{q\} \quad (4.84)$$

a matriz $[H]$ contém informações do campo de pressão e a matriz $[G]$ do fluxo. Rescrevendo o sistema 4.84 chega-se a (Albuquerque, 2009):

$$[A] \{x\} = \{b\} \quad (4.85)$$

Daí resolve-se o sistema linear e calculam-se os valores das variáveis desconhecidas.

4.1 Obtenção de Valores em Pontos Internos

Para uma visualização mais quantitativa se faz necessário criar um gráfico gráfico com os pontos internos do domínio. Assim será mais fácil comparar os resultados obtidos com MEC com valores oriundos do método da matriz de transferência. Com os valores determinados no contorno, o valor da pressão e do fluxo de pressão em pontos internos são facilmente obtidos aplicando as Equações 4.86 e 4.87.

$$p_j(\xi, t) = \int_s \frac{\delta p}{\delta n} p^* ds - \int_s p \frac{\delta p^*}{\delta n} ds \quad (4.86)$$

$$\frac{\delta p_j}{\delta \xi}(\xi, t) = \int_s \frac{\delta p}{\delta n} \frac{\delta p^*}{\delta \xi} ds - \int_s p \frac{\delta^2 p^*}{\delta n \delta \xi} ds \quad (4.87)$$

Onde p_j é o valor da pressão no ponto interno j e os valores de p e $\frac{\delta p}{\delta n}$ já foram determinados anteriormente.

Esses valores são obtidos de maneira direta no MEC, utilizando uma única equação para determinar cada valor de pressão e outra para o fluxo de pressão. A obtenção desses valores é computacionalmente barata, essa é a característica que leva o MEC a ser o método mais indicado para estudar casos em que o domínio é infinito.

Capítulo 5 IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA

Usou-se dois programas em linguagem Matlab. Um utilizando o (MMT) chamado `transfer_matrix.m` e outro aplicando o (MEC) com o nome `Helmholtz3Dfreq.m`. O MatLab é um programa que possui uma linguagem de alto nível, e possui recursos de linguagens de baixo nível sem precisar ser compilada. O Matlab integra a capacidade de fazer cálculos com a visualização gráfica além de possuir um ambiente fácil de usar. O Matlab é um sistema interativo cujo elemento de dados básico é uma matriz que não requer dimensionamento o que permite solucionar problemas que envolvem formulações matriciais ou vetoriais com um código mais simples e um menor tempo de execução do que em um programa em linguagem C (Albuquerque, 2009).

5.1 Programa `transfer_matrix.m`

O programa `transfer_matrix.m` é utilizado para avaliar a solução analítica para cavidades rígidas utilizando o (MMT). Para entrada de dados utiliza-se uma subrotina como por exemplo $[l,s]=dad_1(l,s)$. Onde nela o usuário insere as áreas das seções transversais e o comprimento de cada "pedaço". Após é montada a matriz de transferência de cada porção e depois elas são multiplicadas. Quando o programa é rodado aparece um menu interativo onde seleciona o tipo de extremidade (aberta ou fechado). Assim o sistema sabe o tipo de condição de contorno que será aplicada. A parâmetro w permite que o usuário estipule a faixa de frequência a qual deseja que o programa varra. O programa plota o resultado para cada frequência e quando o resultado é nulo que dizer que o mesmo encontrou a frequência natural do sistema. Se encontrado alguma frequência natural o passo seguinte e plotar a resposta para esta frequência alterando o valor de x . Para isso o parametro m indica o número de divisões que se deseja fazer até chegar no comprimento do tubo. Assim é plotado a forma modal.

5.2 Programa Helmholtz3Dfreq.m

É um programa de elementos de contorno aplicado à acústica tri-dimensional utilizando elementos constantes. De forma semelhante ao transfer-matrix.m o programa possui uma subrotina para a entrada de dados. Essa subrotina formata os dados inseridos pela subrotina *dad_1.m* e cria as matrizes que serão manipuladas pelas subrotinas consequentes. É a subrotina de entrada de dados que define o problema estudado, e cada problema diferente é definido por uma subrotina diferente. Para facilitar esta entrada de dados será usado o programa GiD. Depois se faz necessário inserir a matriz de conectividade dos nós chamada matriz *ELEM* a primeira coluna recebe o número do elemento é as demais os números dos quatro nós que formam o elemento já que a malha utilizada em tetraédrica. Da mesma forma que a matriz *NÓS* para a criação da matriz *ELEM*. Deve-se preencher a matriz de condições de contorno (CDC), ainda na subrotina de entrada de dados é importante verificar a velocidade do som, colocar o valor da frequência natural encontrada pela solução analítica inserir os parâmetros de varredura de frequência nas variáveis *freq_ini* e *freq_final*, as frequências devem estar em *rad/s*. Antes de rodar o programa principal é importante verificar se o nome do arquivo de entrada de dados está igual ao que foi criado. No final do programa tem-se um algoritmo que salva os resultados deve-se verificar o endereçamento ou comentar este bloco do programa. O programa obtêm as frequências de ressonância e mostra a forma modal em um gráfico de cores na geometria tri-dimensional do problema analisado.

5.3 GiD

O GiD é um programa de pré e pós-processamento universal para simulações numéricas. Sua versão gratuita utilizada no trabalho é limitada em 1010 nós, assim, deve-se tomar o cuidado para não exceder este parâmetro. O GiD aceita importar desenhos em formato .IGES assim pode-se criar a geometria do problema em qualquer plataforma que permite a opção de salvar nesse formato e depois e só importar o desenho no GiD. O próximo passo é criar as superfícies utilizando o a sequência de passos: *geometry* → *create* → *NURBS Surfaces* → *by Contour*, seleciona os segmentos que formam a superfície e depois *ESC*. A seguir utilize os comando *Mesh* → *Element Type* → *Quadrilateral* selecione todo o modelo aperte novamente *ESC* para escolher o tipo de elemento o programa *Helmholtz3Dfreq.m* utiliza elementos qua-

drilaterais. Depois para gerar a malha utilize os passos *Mesh*→ *generate mesh* insira um valor para o tamanho dos elementos desejados, se o valor do muito pequeno pode estourar o limite de nós da versão gratuita e ainda mesmo que esteja dentro da margem permitida deve-se lembrar do custo operacional, porém elementos muito grandes gera uma malha grosseira onde os resultados serão pouco preciso esta etapa então deve ter uma análise do usuário caso a malha não esteja de seu agrado repita a operação. É importante que as normais dos elementos estejam no sentido correto caso contrario deve-se usar o comando *swap normals*. E por fim os dados são exportado para o bloco de notas utilizando as linhas de comando *Files*→ *export*→ *Gid mesh* agora basta copiar os dados do bloco de nota e colar na subrotina de entrada de dados do Matlab.

Capítulo 6 RESULTADOS

O estudo foi feito em 5 tubos. Por ter uma geometria simples foi usado um tubo retilíneo com seção constante para validar a metodologia utilizada. Três tubos retos com seção transversal variável, que representa as vogais /a/, /i/ e a vogal /u/. E por último um tubo curvo com seção constante no intuito de se verificar a influência que a curvatura. Os modelos do trato vocal serão então formados por tubos onde uma das faces do tubo será fechada e a outra aberta representando assim as pregas vocais e a boca respectivamente. Temos os seguintes valores de pressão e fluxo de pressão dependendo do tipo de extremidade.

- aberta: pressão $p = 0$ e fluxo $q \neq 0$.
- fechada: pressão $p \neq 0$ e fluxo $q = 0$.

6.1 Cavidade unidimensional uniforme

A vogal /ə/ é obtida quando a mandíbula está semi-aberta e a língua não faz bloqueio na passagem do ar. Essa forma do trato vocal pode ser aproximada por um tubo retilíneo de seção constante com o comprimento $L = 170mm$ e diâmetro de $\phi = 15mm$ conforme as imagens 6.18 e 6.19 . A face da esquerda é fechada e a da direita aberta. As faces vão receber os índices de 1 e 2 respectivamente.

- $p_1 \neq 0$; $q_1 = 0$.
- $p_2 = 0$; $q_2 \neq 0$.

Assim aplicada as condições de contorno na equação 3.59 temos:

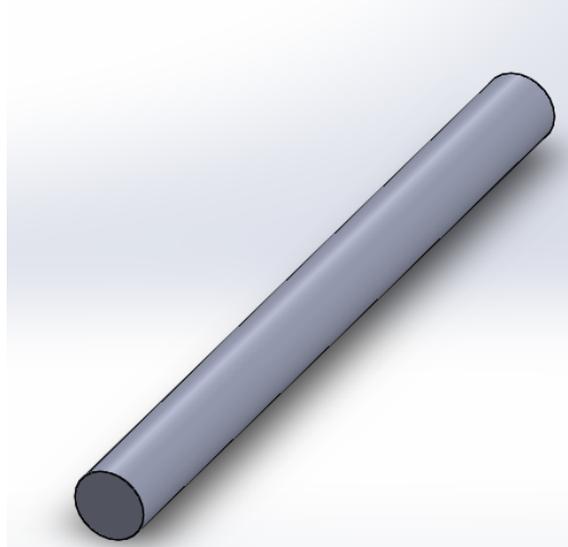


Figura 6.18: Tubo unidimensional com seção constante, vogal /ə/.

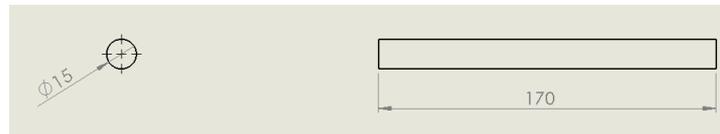


Figura 6.19: Dimensões do tubo unidimensional com seção constante em *mm*.

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ q_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\lambda) & \frac{c}{iS} \sin(\lambda) \\ \frac{-iS}{c} \sin(\lambda) & \cos(\lambda) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6.88)$$

A primeira equação do sistema 6.88 nos mostra que:

$$0 = p_1 \cos(\lambda) \quad (6.89)$$

Como

$$p_1 \neq 0 \quad (6.90)$$

$$\cos(\lambda) = 0 \quad (6.91)$$

logo,

$$\lambda = (2n - 1) \frac{\pi}{2} \quad (6.92)$$

onde n um número natural. É sabido que

$$\lambda = \frac{\omega L}{c} \quad (6.93)$$

assim temos que a frequência natural ω tem a seguinte equação:

$$\omega = (2n - 1) \frac{\pi c}{2L} \quad (6.94)$$

Substituindo os valores $n = 1$, $c = 343m/s$, $L = 0.17m$ temos que $\omega_1 = 3169,312rad/s$ para $n = 2$ temos $\omega_2 = 9507,936rad/s$.

Para plotarmos a forma modal utilizamos a equação 3.49 substituindo os valores das constantes A e B já determinadas desta forma temos:

$$\frac{p(x, \omega)}{p_1} = \frac{q_1 c}{i s} \sin\left(\frac{\omega}{c} x\right) + p_1 \cos\left(\frac{\omega}{c} x\right) \quad (6.95)$$

Assim tem-se que:

$$\frac{p(x, \omega)}{p_1} = \cos\left(\frac{\omega}{c} x\right) \quad (6.96)$$

A equação 6.96 nos mostra que a forma modal é um cosseno. O programa transfer _matrix usa o método descrito acima. A frequência natural é encontrada quando o gráfico da figura 6.20 corta o eixo 'x' assim temos que $\omega_1 = 3168,610rad/s$ e $\omega_2 = 9512,742rad/s$ os valores estão bem próximos dos encontrados com a resolução feita a mão. Para uma análise quantitativa será calculado o valor do erro encontrado utilizando a equação 6.97.

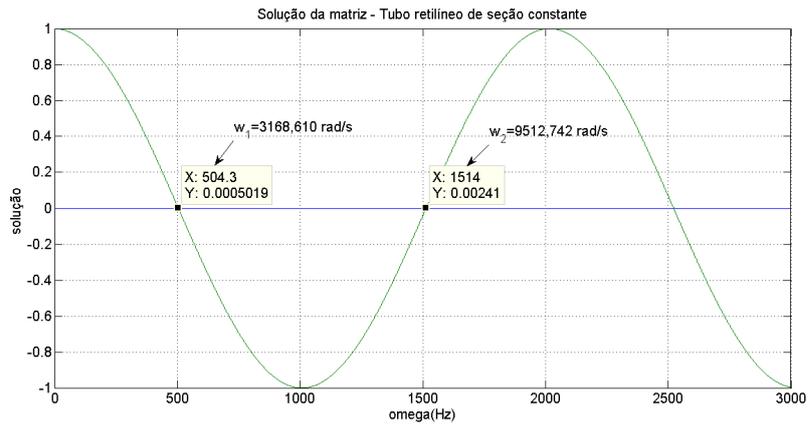


Figura 6.20: Frequência natural do tubo retilíneo com seção uniforme utilizando (MMT).

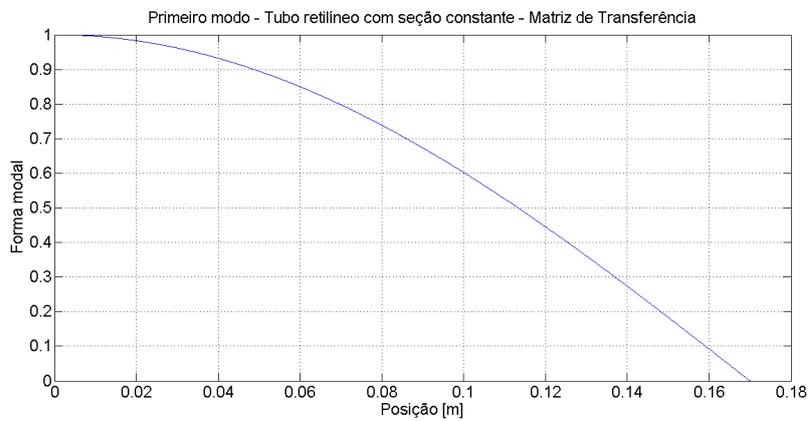


Figura 6.21: Primeiro modo vogal /ə/ utilizando (MMT).

$$erro = \left(1 - \left(\frac{w_{tr}}{w_{calc}}\right)\right) * 100 \quad (6.97)$$

Onde w_{calc} é o valor calculado a mão e w_{tr} o valor encontrado utilizando o programa transfer_matrix. O valor será dado em porcentagem. Temos então que $erro_1 = 0,022\%$ e o $erro_2 = 0,050\%$.

As figuras 6.21 e 6.22 nos mostra as formas modais do tubo retilíneo de seção constante para o primeiro e segundo modo respectivamente. Nelas podemos ver bem claramente o formato da senoide como era esperado.

A parte de pré-processamento do MEC inclui a criação da malha da geometria estudada. A figura 6.23 mostra a malha do tubo retilíneo de seção constante que será usada no programa

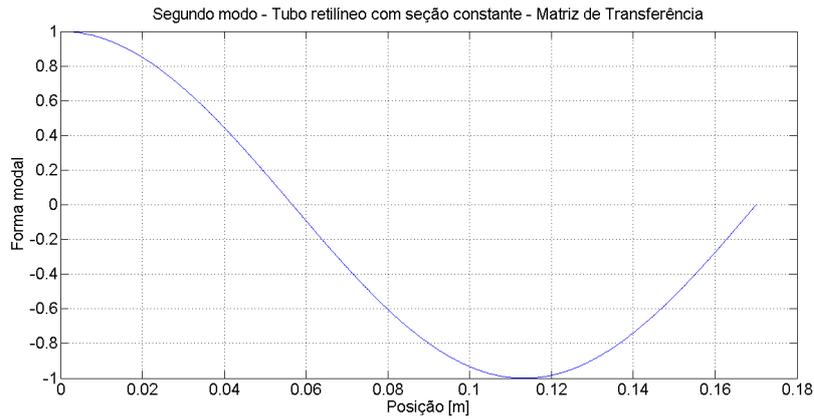


Figura 6.22: Segundo modo vogal /ə/ utilizando (MMT).

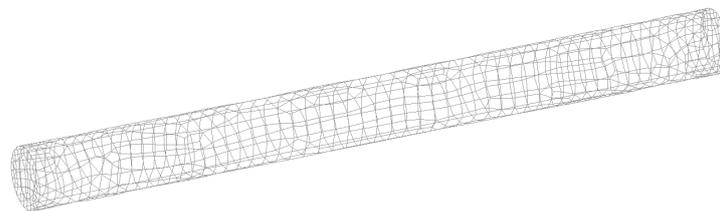


Figura 6.23: Malha do tubo unidimensional com seção constante.

Helmholtz3d.m. A malha é formada por elementos 989 quadrilaterais com o tamanho de $0.0037m$ e 991 nós. A versão gratuita do programa GiD nos impões um limite de apenas 1010 nós. Assim como o modelo mostrado para o MMT a face da direita é aberta para fazer isso basta alterar os valores dos elementos que compõe a face que no caso vai do elemento 905 ate o 947 e alterar o valor que indica que o valor conhecido é o valor da pressão que é igual a 0 na matriz CDC (condição de contorno) presente na subrotina de entrada de dados. Foi usado o recurso do GiD que gera malha automaticamente, porém podemos notar que a mesma não fica bem estruturada com alguns elementos bastante deformados o que pode prejudicar o resultado para futuros trabalhos pode-se usar algum método para melhorar a qualidade da malha.

Agora os resultados obtidos utilizando (MEC). A figura 6.24 mostra um gráfico de resposta em função da frequência (FRF) o eixo das ordenadas está em escala log e a unidade da pressão é a mesma em que foi excitada que no caso é *atm*. Quando temos um pico significa que esse frequência é uma frequência fundamental vemos que essas frequências influencia muita mais que as outras. O segundo valor da frequência não ficou um bom ponto pela 6.24 vimos que não pegou um pico certinho. As figuras 6.25 e 6.26 nos mostra a forma modal

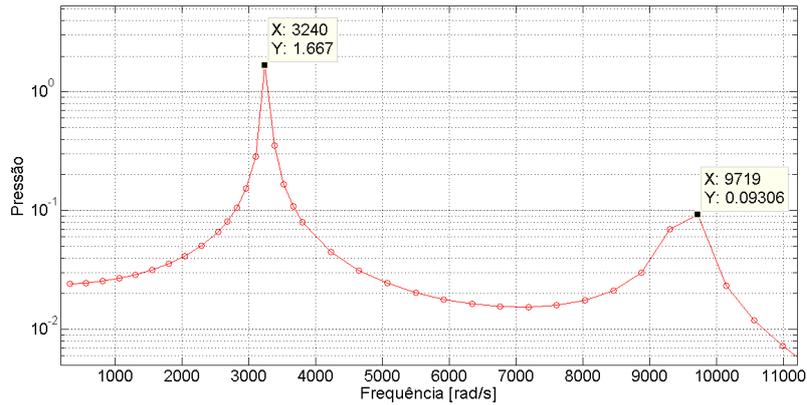


Figura 6.24: Função resposta em frequência para um tubo retilíneo e uniforme utilizando o MEC.

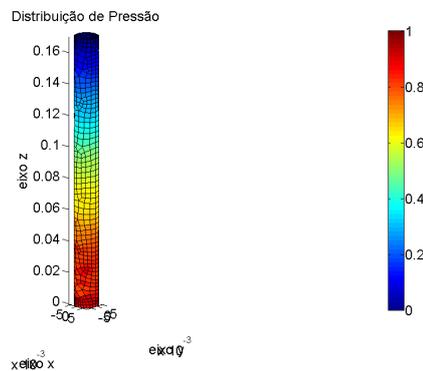


Figura 6.25: Primeiro modo para um tubo unidimensional uniforme (MEC).

do elementos no contorno do modelo esse gráfico é bom para termos uma visualização física global do fenômeno porém é difícil retirar valores quantitativos. Por esse motivo temos nas figuras 6.27 e 6.28 a forma modal dos pontos internos ao elemento. Esses gráficos nos permite uma melhor comparação com os resultados obtido pelo (MMT). Os resultados das formas modais estão normalizados para poder comparar os resultados do dois métodos.

O erro calculado para os valores das frequências fundamentais obtidos pelo MMT resolvido a mão. Assim utilizando a equação 6.97 temos que $erro_1 = 2.181\%$ e o $erro_2 = 2,171\%$

Os gráficos 6.27 e 6.28 que representam as formas modais dos pontos internos não possuem a curva da senoide bem definida. Talvez com uma malha melhor estruturada ou com um maior número de pontos internos esse problema seja resolvido. Agora justapondo os modos obtidos pelos dois métodos podemos comparar o método numérico com o método analítico mostrado nas figuras 6.29 e 6.30. A tabela 6.2 além de resumir os valores das primeiras duas frequências fundamentais obtidas pela matriz de transferência resolvida da forma comum,

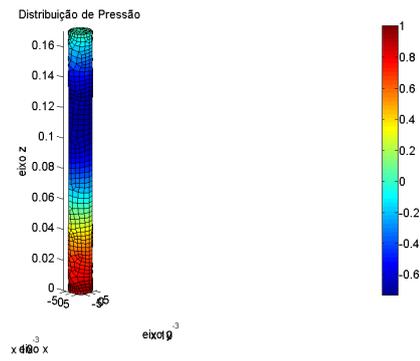


Figura 6.26: Segundo modo para um tubo unidimensional uniforme(MEC).

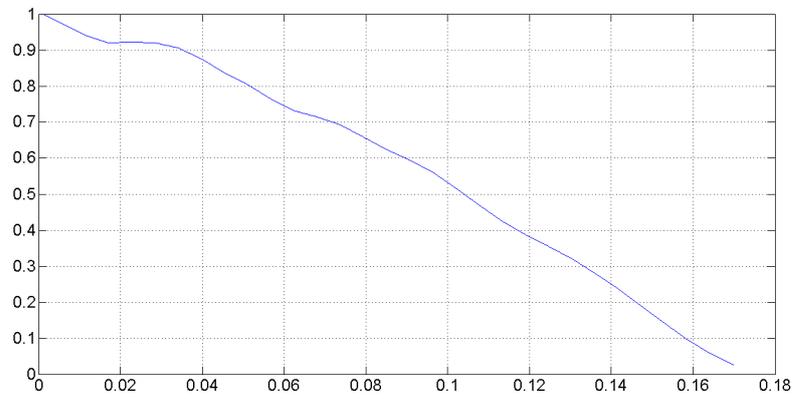


Figura 6.27: Primeiro modo dos pontos internos para um tubo unidimensional uniforme (MEC).

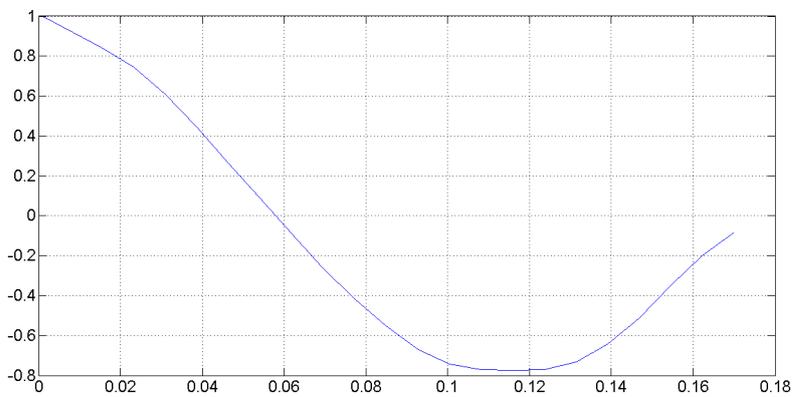


Figura 6.28: Segundo modo dos pontos internos para um tubo unidimensional uniforme(MEC).

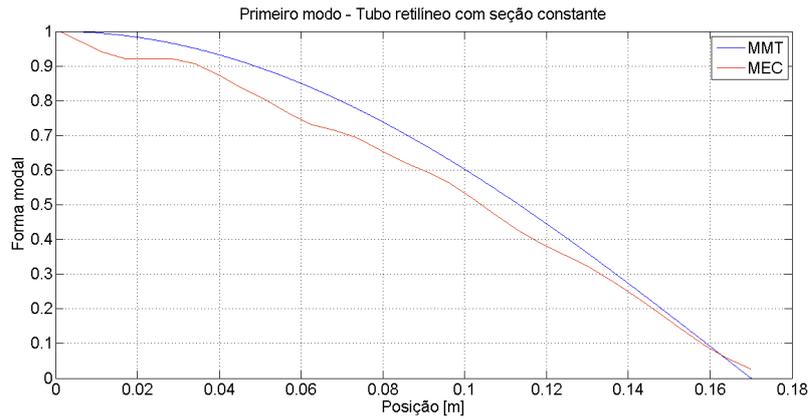


Figura 6.29: Comparação dos métodos MMT e MEC na obtenção da forma modal de um tubo unidimensional com seção constante, primeiro modo.

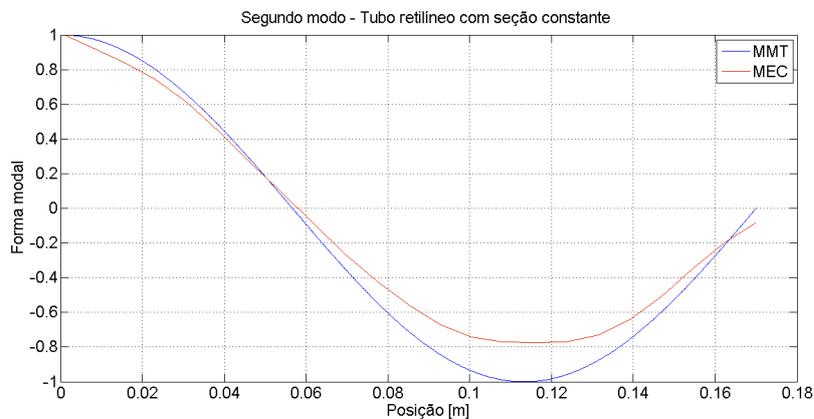


Figura 6.30: Comparação dos métodos MMT e MEC na obtenção da forma modal de um tubo unidimensional com seção constante, segundo modo.

MMT com o auxílio do programa transfer `_matrix`, MEC, e resultados extraídos do trabalho de Urbassek (2014).

Tabela 6.2: Frequência fundamentais para um tubo unidimensional com seção constante.

	$\omega_1(rad/s)$	$\omega_2(rad/s)$	$erro_1\%$	$erro_2\%$
MMT resolvido a mão	3169,312	9507,936		
MMT utilizando transfer <code>_matrix</code>	3168,610	9512,742	0,022	0,050
MEC	3240,000	9719,000	2,181	2,171
(Urbassek, 2014)	3248,312	9091,769	2,434	4,377

Para as frequências naturais o erro ficou na casa de 2% para uma análise numérica um valor um pouco alto, porém dentro do aceitável. Os valores de (Urbassek, 2014) tiveram erro na casa dos 4% porém são resultados experimentais. Quanto a forma modal os dois métodos tiveram uma pequena divergência mas também aceitável. Assim conclui-se que o método ainda pode ser mais refinado, mas já nos traz resultados satisfatórios. Desta forma podemos

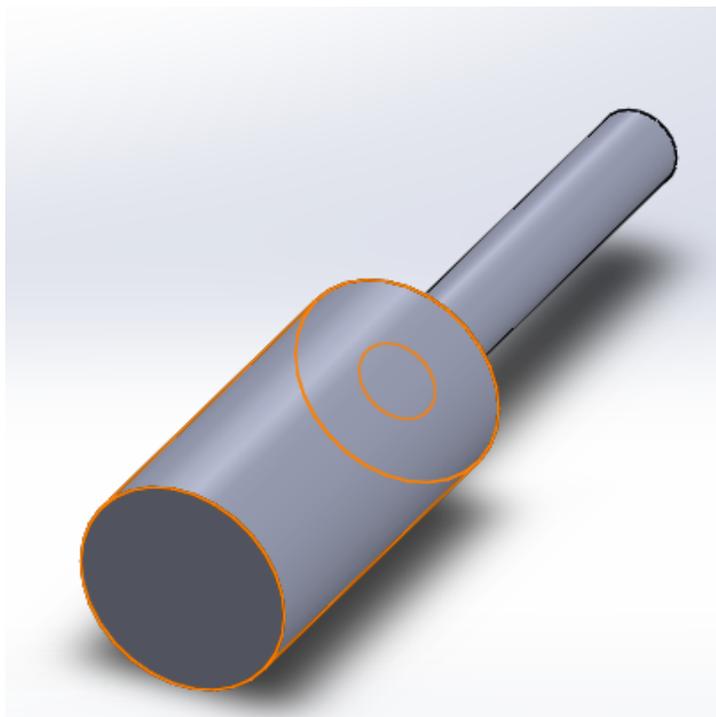


Figura 6.31: Modelo tridimensional vogal /a/.

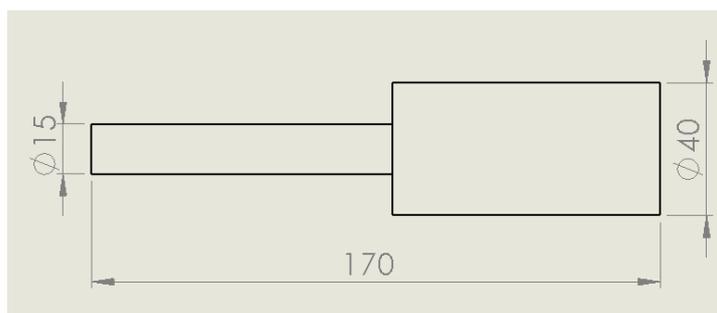


Figura 6.32: Dimensões do modelo da vogal /a/ em *mm*.

prosseguir fazendo a caracterização das vogais /a/, /i/ e /u/.

6.2 Modelagem das vogais /a/, /i/ e /u/

As vogais /a/, /i/ e /u/ são modeladas como a união de determinadas quantidade de tubos, como visto nas figuras 2.9, 2.10, 2.11 retiradas dos trabalhos de (Urbassek, 2014) e (Huckvale, 2008). As figuras 6.31, 6.32, 6.33, 6.34, 6.35 e 6.36 mostram os modelos tridimensional criado e suas respectivas dimensões em *mm*.

Com os modelos criados exporta-se os mesmos para o programa GiD e de maneira análoga

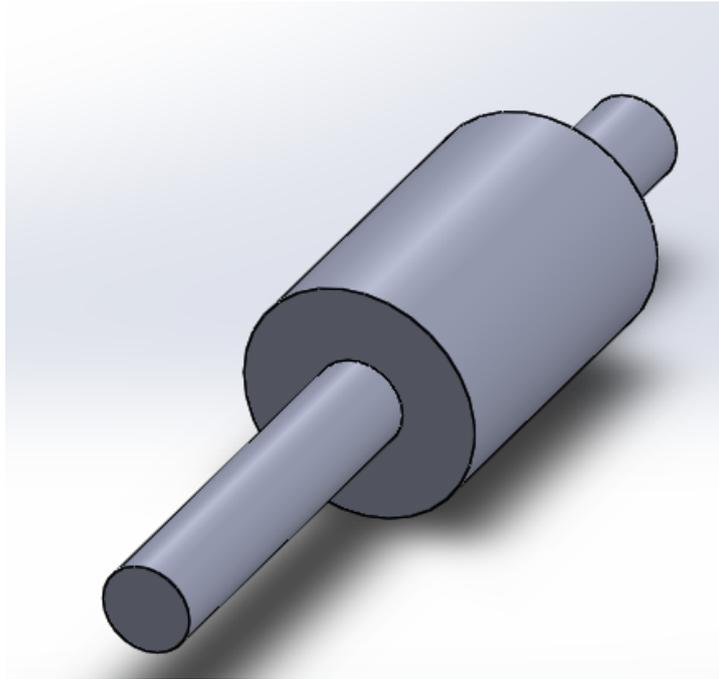


Figura 6.33: Modelo tridimensional vogal /i/.

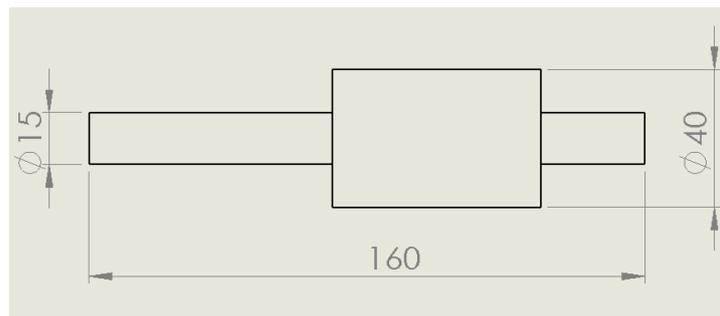


Figura 6.34: Dimensões do modelo da vogal /i/ em *mm*.

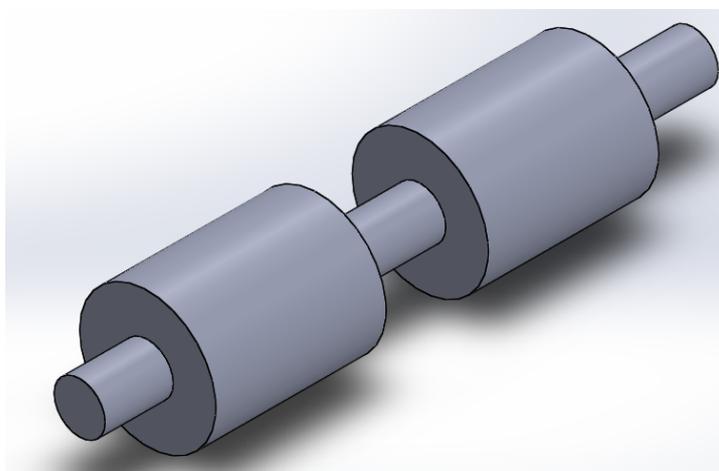


Figura 6.35: Modelo tridimensional vogal /i/.

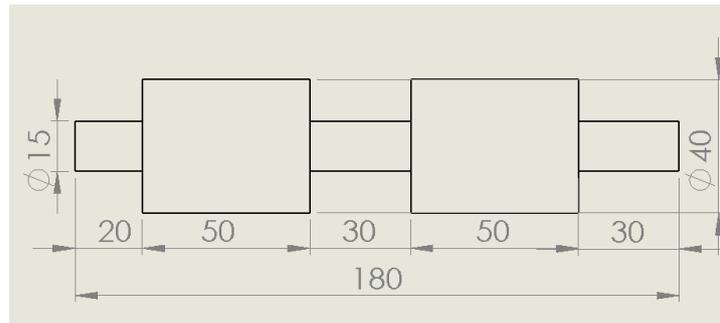


Figura 6.36: Dimensões do modelo da vogal /u/ em *mm*.

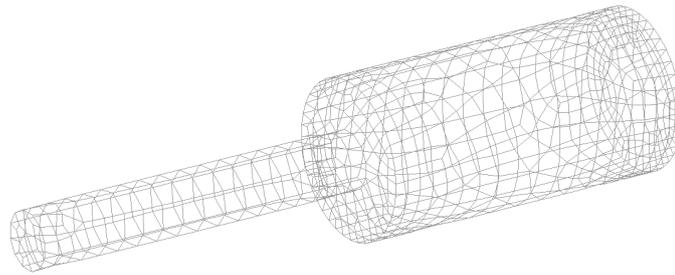


Figura 6.37: Malha do modelo da vogal /a/.

ao tubo unidimensional com seção constante geram-se as malhas. As figuras 6.37, 6.38 e 6.39 mostram as malhas das vogais /a/, /i/ e /u/ respectivamente. A tabela 6.3 resume os parâmetros das malhas de elementos quadrilaterais.

Os modelos que representam as vogais podem ser considerados unidimensionais. Desse modo, podemos aplicar o método da matriz de transferência, tendo assim uma solução exata para comparar com os resultados obtidos numericamente. De forma análoga ao tubo unidimensional com seção constante começaremos encontrando as frequências naturais das vogais resolvendo o sistema de equações. A solução oriunda do programa `transfer_matrix` nos fornece o gráfico com a solução da matriz. Assim a frequência que quando substituída na

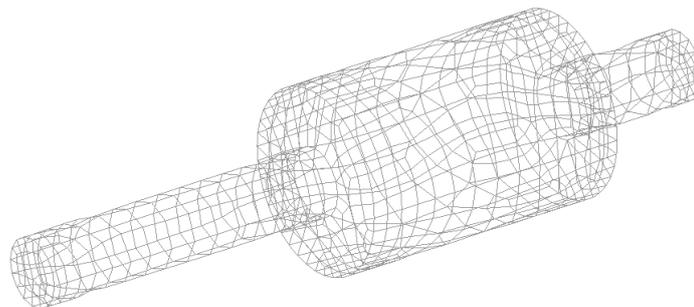


Figura 6.38: Malha do modelo da vogal /i/.

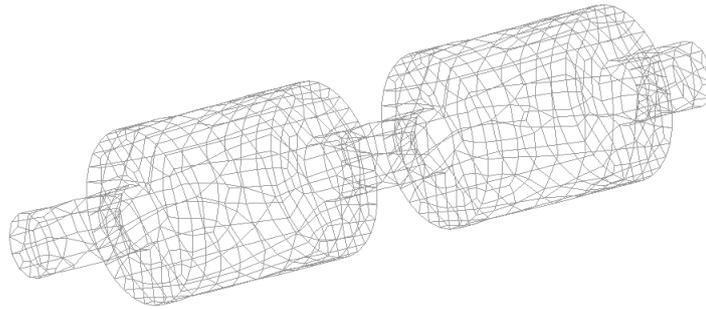


Figura 6.39: Malha do modelo da vogal /u/.

Tabela 6.3: Parâmetros das malhas das vogais /a/, /i/ e /u/.

Vogais	/a/	/i/	/u/
Tamanho do elemento [m]	0,006	0,0058	0,0075
Quantidade de elementos	933	921	990
Quantidade de nós	935	923	992

equação, similar a equação 3.59, nos fornecer o resultado 0 é uma frequência natural para sua respectiva cavidade. Para facilitar a visualização os resultados das frequências naturais serão mostradas na tabela 6.4, as soluções gráficas para cada vogal estão ilustradas nas figuras 6.40, 6.41 e 6.42.

As formas modais utilizando o MMT são mostradas pelas figuras 6.43, 6.44 , 6.45, 6.46, 6.47 e 6.47. Deve-se observar que os valores estão normalizados para serem comparados com o MEC.

As figuras 6.49, 6.50 e 6.51 mostram os gráficos de resposta em função da frequência para as vogais /a/, /i/ e /u/ respectivamente.

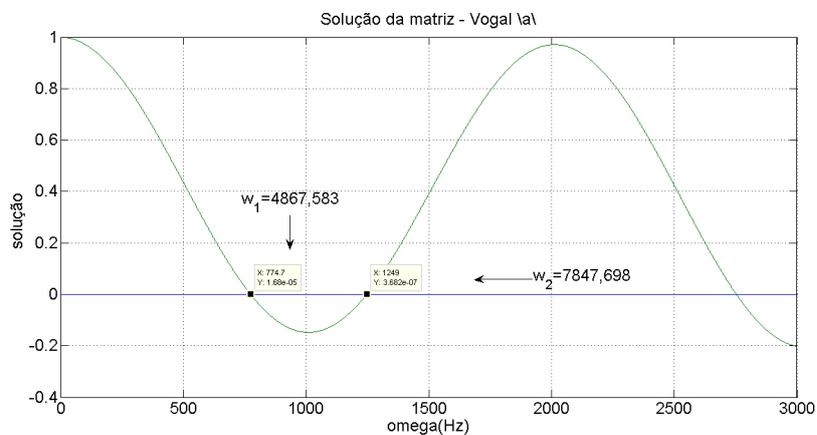


Figura 6.40: Frequência natural da vogal /a/ utilizando (MMT).

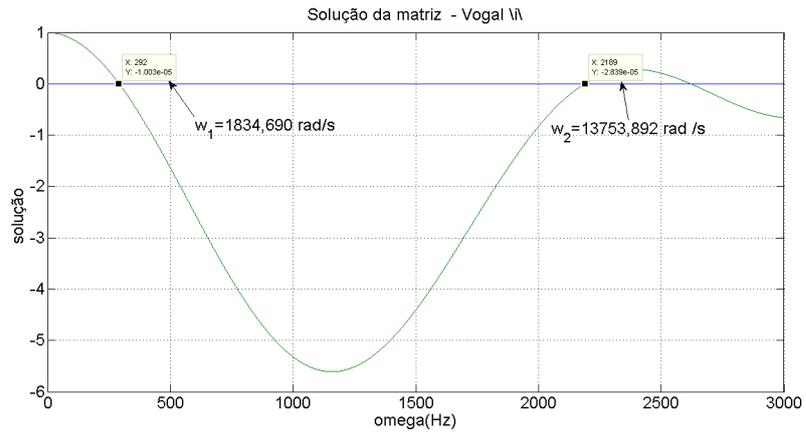


Figura 6.41: Frequência natural da vogal /i/ utilizando (MMT).

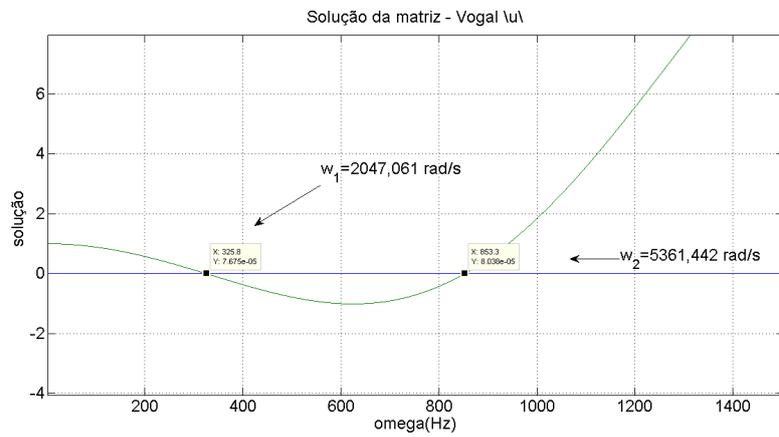


Figura 6.42: Frequência natural da vogal /u/ utilizando (MMT).

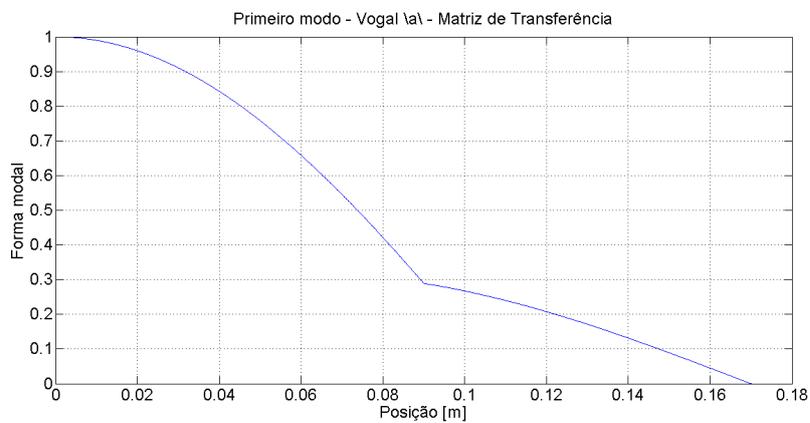


Figura 6.43: Primeiro modo vogal /a/ utilizando (MMT).

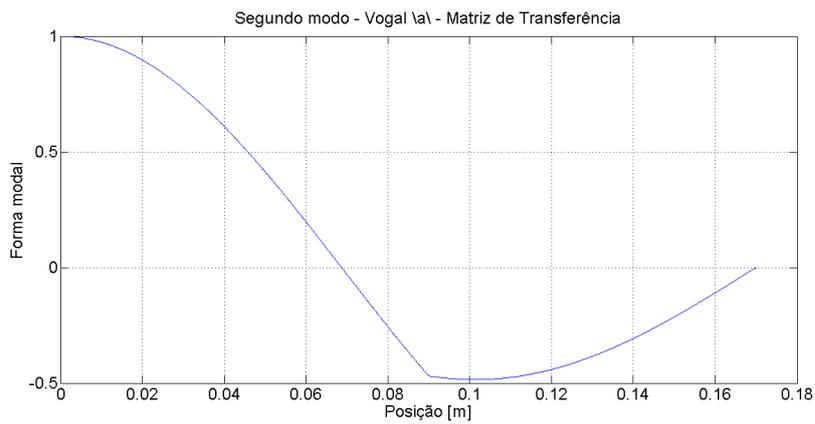


Figura 6.44: Segundo modo vogal /a/ utilizando (MMT).

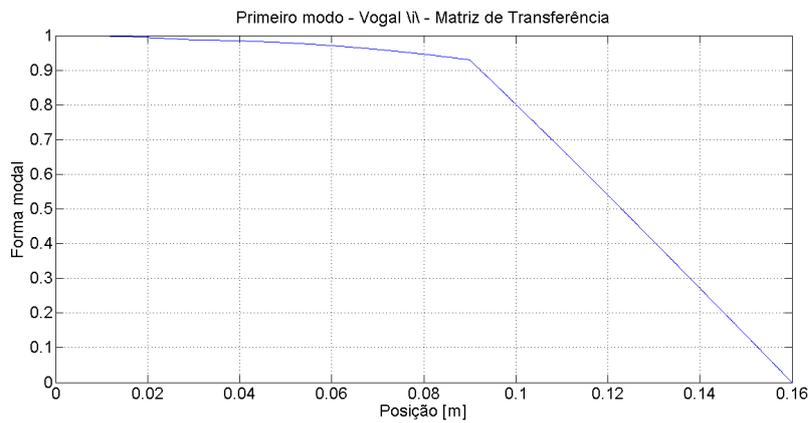


Figura 6.45: Primeiro modo vogal /i/ utilizando (MMT).

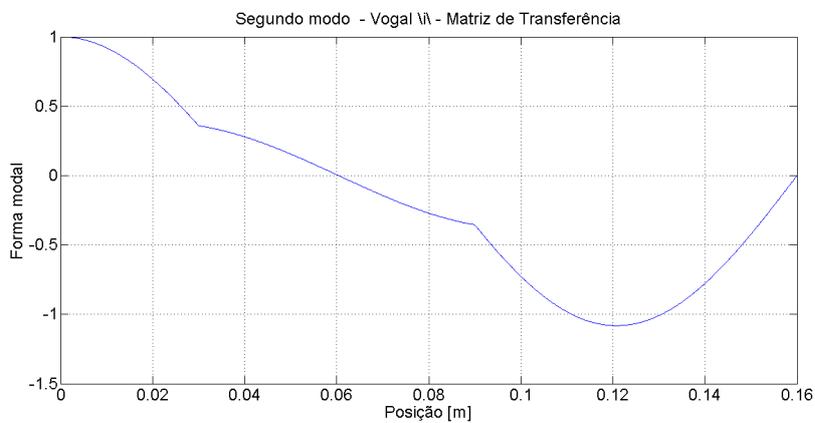


Figura 6.46: Segundo vogal /i/ modo utilizando (MMT).

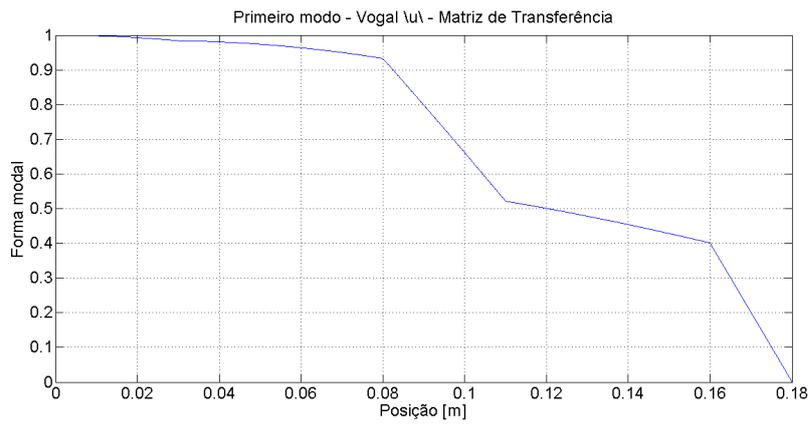


Figura 6.47: Primeiro modo vogal /u/ utilizando (MMT).

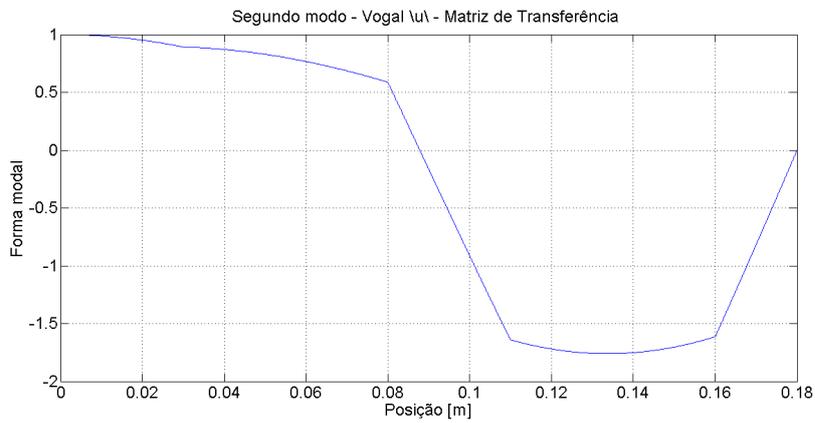


Figura 6.48: Segundo modo vogal /u/ utilizando (MMT).

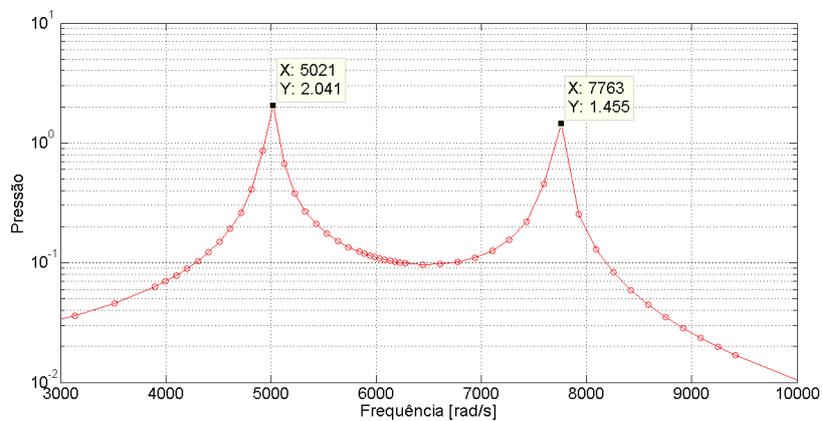


Figura 6.49: Função resposta em frequência da vogal /a/ obtida pelo MEC.

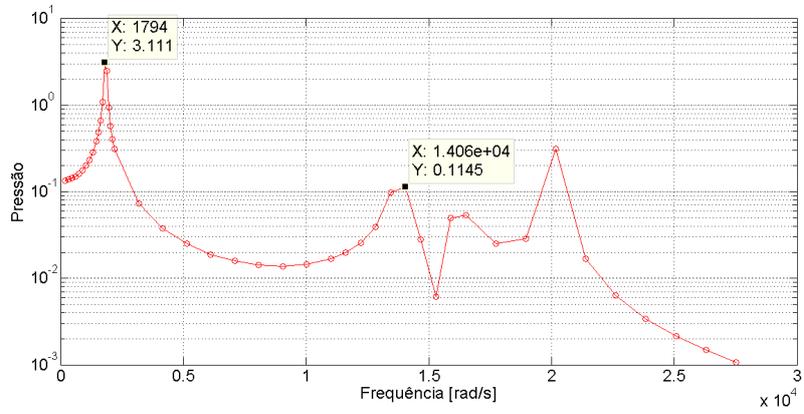


Figura 6.50: Função resposta em frequência da vogal /i/ obtida pelo MEC.

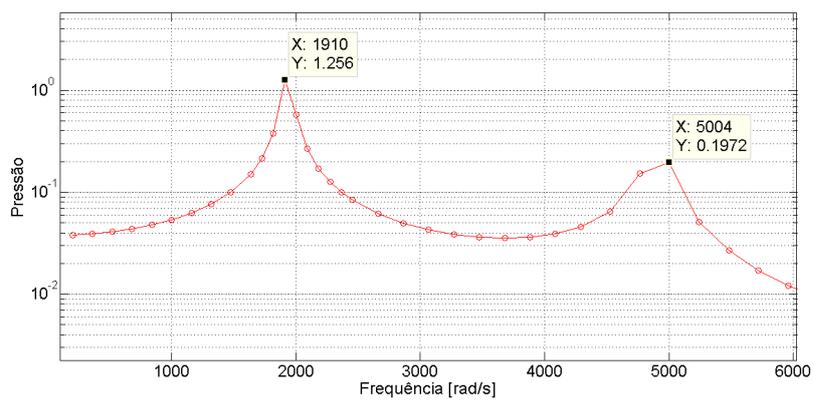


Figura 6.51: Função resposta em frequência da vogal /u/ obtida pelo MEC.

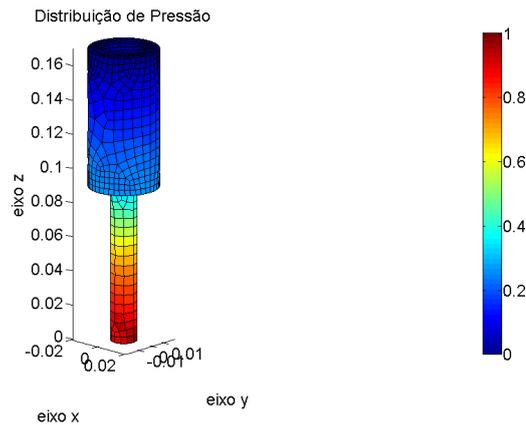


Figura 6.52: Primeiro modo vogal /a/ obtida pelo MEC.

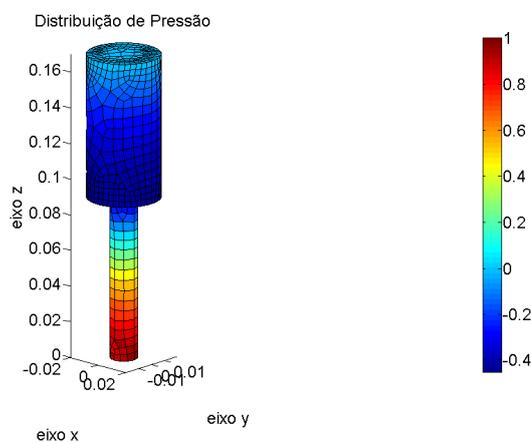


Figura 6.53: Segundo modo vogal /a/ obtida pelo MEC.

Nota-se que o gráfico da figura 6.50 oscila bastante nas proximidades da segunda frequência fundamental. O próximo passo são os modos. Agora temos as formas modais tridimensionais das figuras 6.52 até a 6.57.

Resultados dos modelos das vogais /a/, /i/ e /u/.

Os resultados da vogal /u/ se afastaram do valor calculado analiticamente. Porém se aproximou do valor encontrado no trabalho de (Urbassek, 2014). Da figura 6.58 até a 6.63 temos um comparativo de resultados das formas modais, calculados pelos dois métodos estudados.

Os resultados da vogal /u/ ficaram ruins tanto o valor da frequência quanto as formas. Ocorreu algum erro que deve ser revisto. As outras vogais tiveram resultados muito bom concordando com os valores encontrados pela MMT e com os valores disponíveis na literatura.

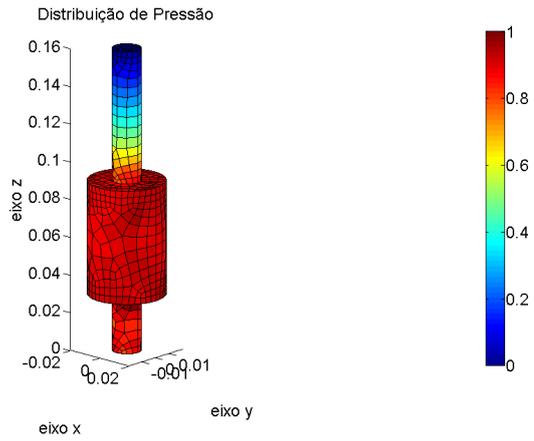


Figura 6.54: Primeiro modo vogal /i/ obtida pelo MEC.

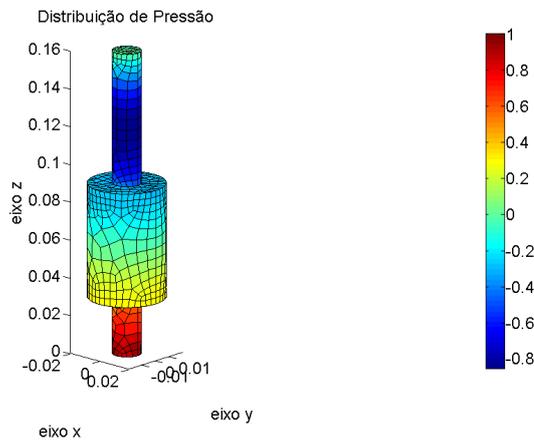


Figura 6.55: Segundo modo vogal /i/ obtida pelo MEC.

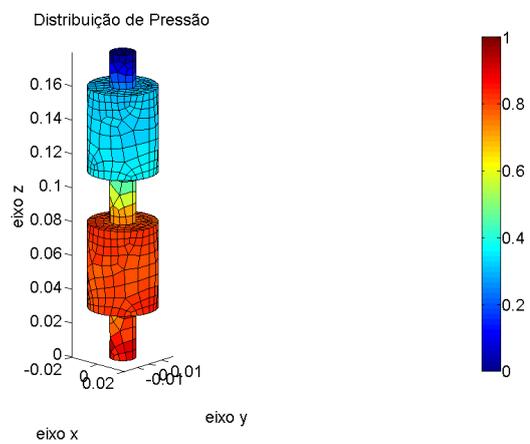


Figura 6.56: Primeiro modo vogal /u/ obtida pelo MEC.

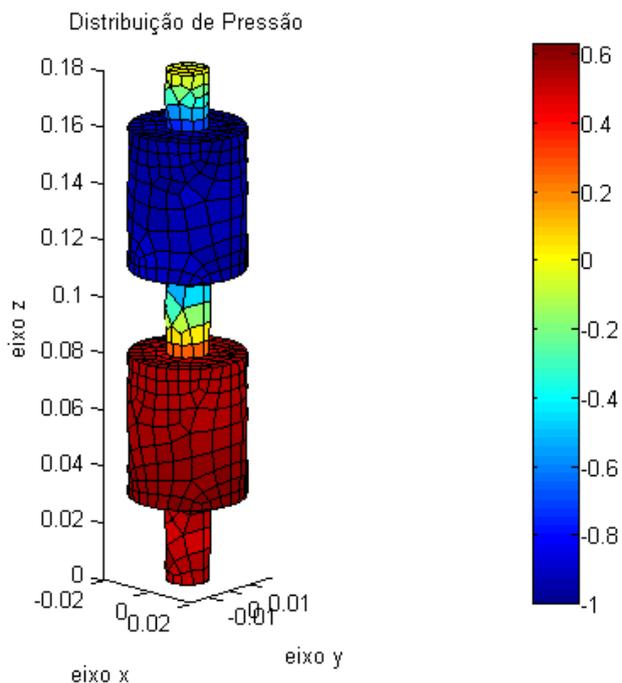


Figura 6.57: Segundo modo vogal /u/ obtida pelo MEC.

Tabela 6.4: Frequências naturais das vogais /a/, /i/ e /u/.

Vogais	/a/	/i/	/u/
MMT- ω_1 [rad/s]	4867, 583	1834, 690	2047, 061
MMT - ω_2 [rad/s]	7847, 698	13753, 892	5361, 442
MEC- ω_1 [rad/s]	5021	1799	1910
MEC - ω_2 [rad/s]	7763	14060	5004
erro- ω_1 [%]	3, 055	1, 94	6, 69
erro - ω_2 [%]	1, 07	2.17	6, 65
(Urbassek, 2014)- ω_1 [%]	4630, 707	1652, 47	1947, 787
(Urbassek, 2014) - ω_2 [%]	8015, 271	13640, 79	5365, 840

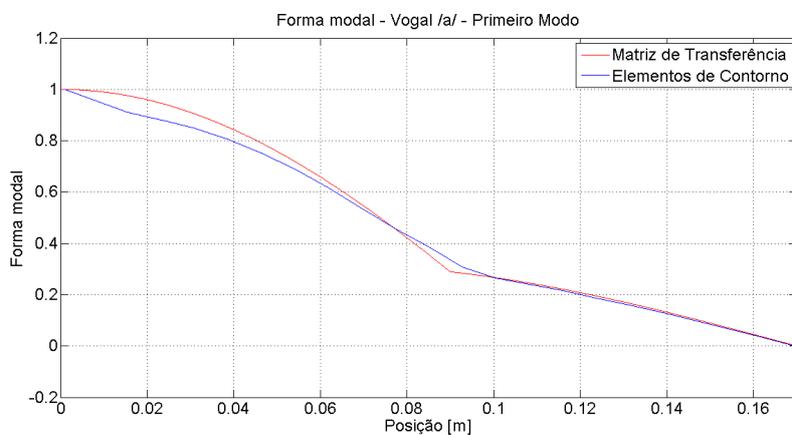


Figura 6.58: Comparação da primeira forma modal vogal/a/.

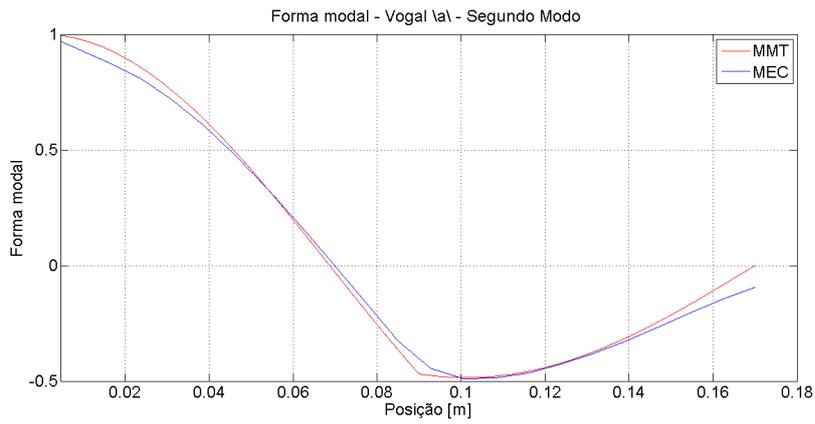


Figura 6.59: Comparação da segunda forma modal vogal/a/.

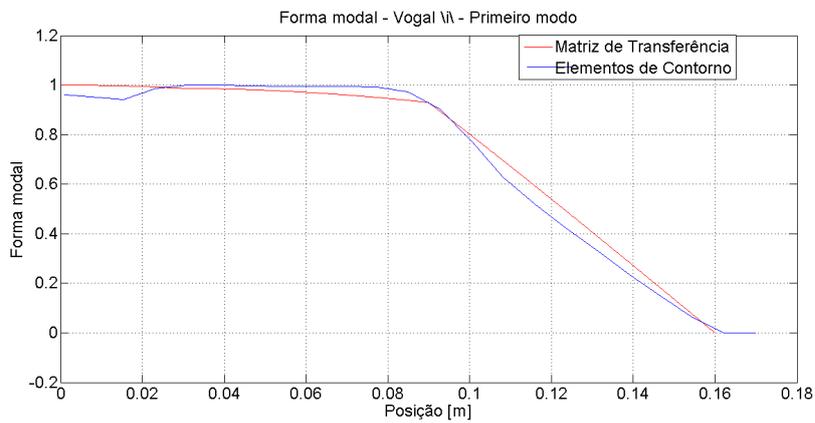


Figura 6.60: Comparação da primeira forma modal vogal/i/.

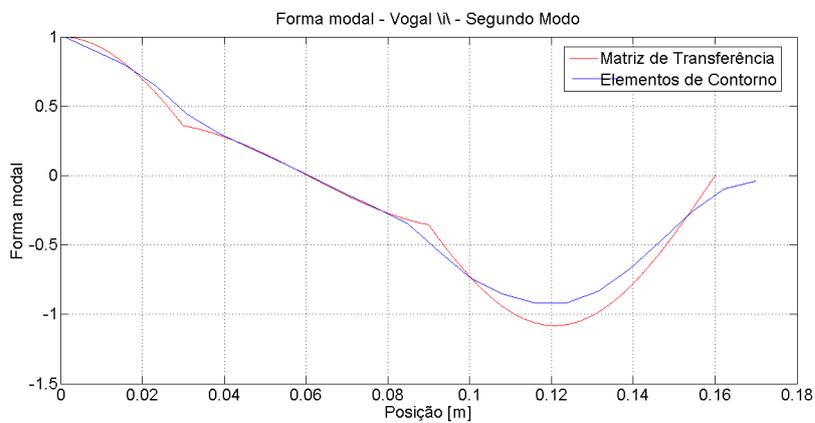


Figura 6.61: Comparação da segunda forma modal vogal/i/.

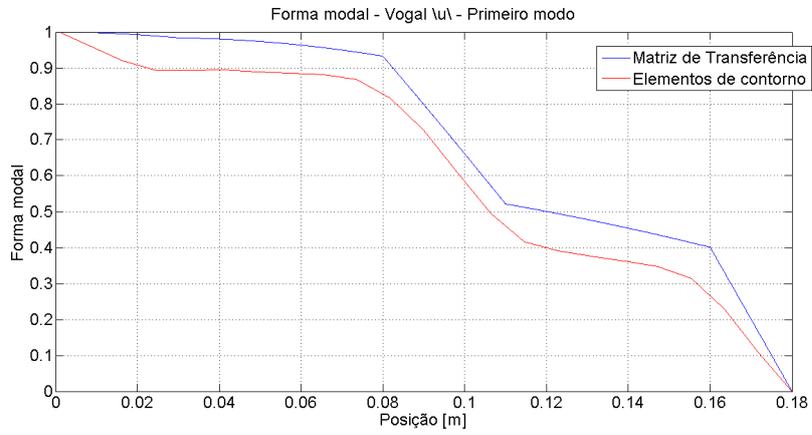


Figura 6.62: Comparação da primeira forma modal vogal/u/.

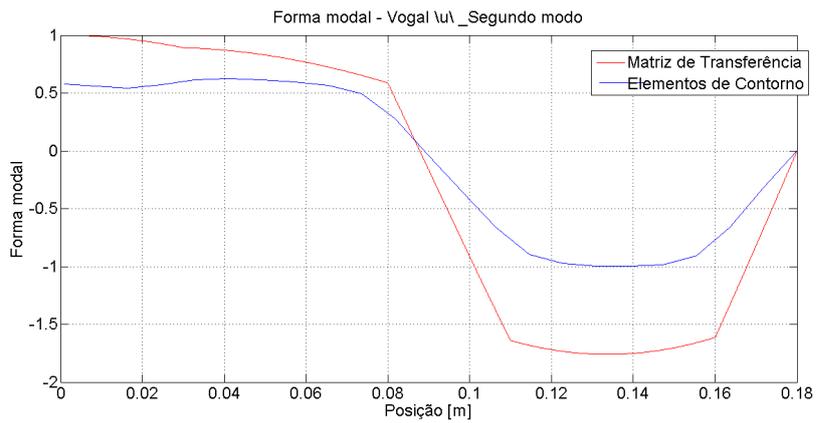


Figura 6.63: Comparação da segunda forma modal vogal/u/.

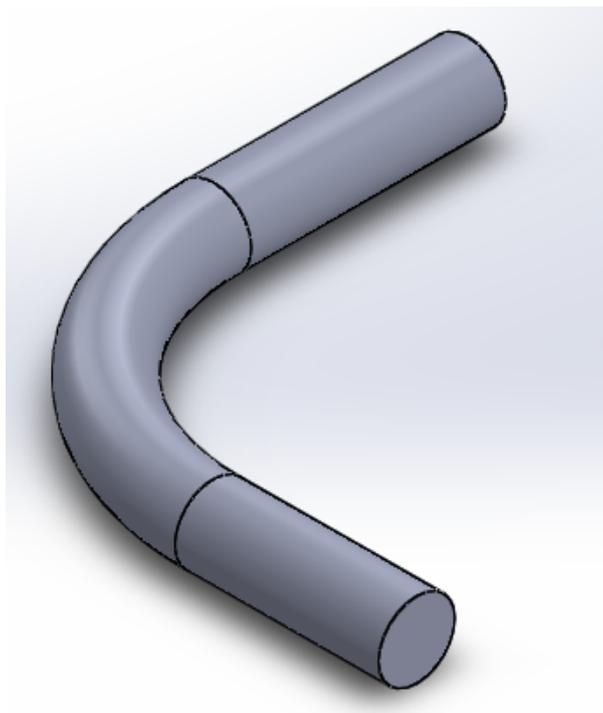


Figura 6.64: Modelo tridimensional do tubo curvo.

6.3 Análise da curvatura

Para estudar o efeito que a curvatura do trato vocal pode causar, foi estudado um modelo de um tubo curvo de seção constante ao qual seus resultados serão confrontados com o tubo retilíneo de seção constante. Os dados geométricos do tubo são mostrados nas figuras 6.64 e 6.65. Onde as dimensões mostradas estão todas em mm . A malha está representada na figura 6.66 com seus dados na tabela 6.5.

Tabela 6.5: Parâmetros da malha do tubo curvo com seção constante.

geometria	Tamanho do elemento $[m]$	Quantidade de elementos	Quantidade de
Tubo curvo com seção uniforme	0,006	980	

A figura 6.67 nos mostra a função resposta em frequência o valor da excitação de ambos foram iguais porém vimos que o primeiro formante do tubo curvo é bem maior do que no tubo reto. Os valores da frequência estão próximas assim notamos que a mesma não é influenciada pela curvatura. A tabela 6.6 sintetiza os valores das frequências para ambos os casos. O diferença é feita com o resultado analítico.

Tem-se representado nas figuras 6.68 e 6.69 as formas modais do modelo tridimensional do

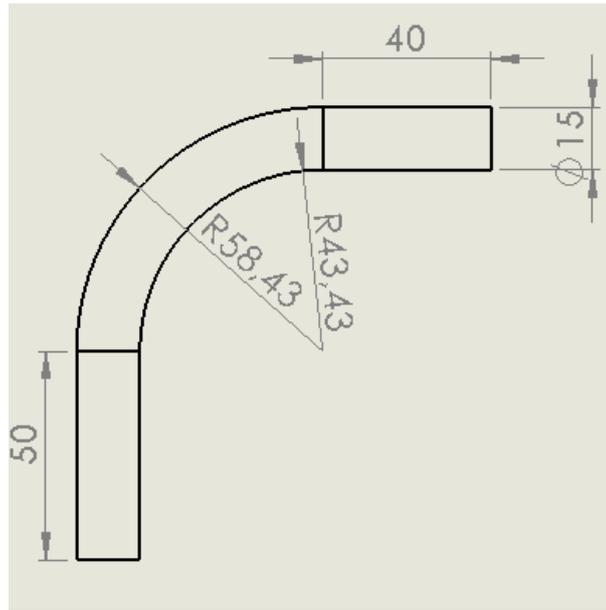


Figura 6.65: Dimensões do tubo curvo em *mm*.

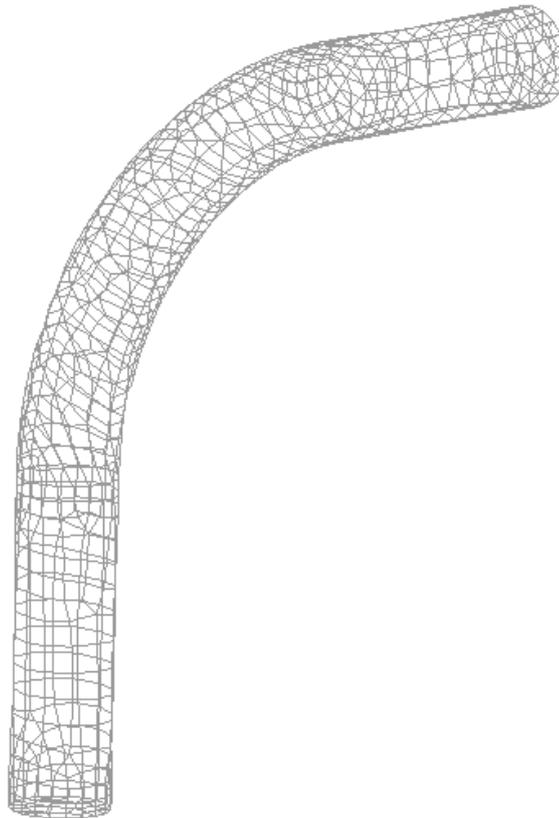


Figura 6.66: Malha gerada pelo programa GiD do tubo curvo com seção constante.

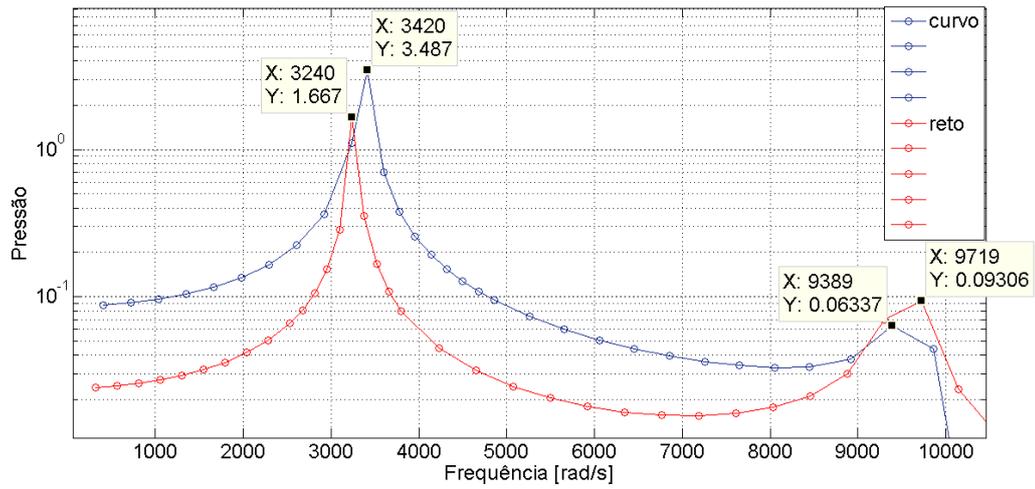


Figura 6.67: Gráfico FRF dos tubos retilíneo e curvo ambos com seção transversal constante.

Tabela 6.6: Frequência fundamentais para um tubo unidimensional e para um tubo curvo com seção constante obtidas pelo MEC.

	$\omega_1(rad/s)$	$\omega_2(rad/s)$	erro ω_1 [%]	erro ω_2 [%]
MMT - Tubo Reto	3168,610	9512,742	—	—
MEC - Tubo Curvo	3420	9389	7.35	1,30
MEC - Tubo Reto	3240,000	9719,000	—	—

tubo curvo.

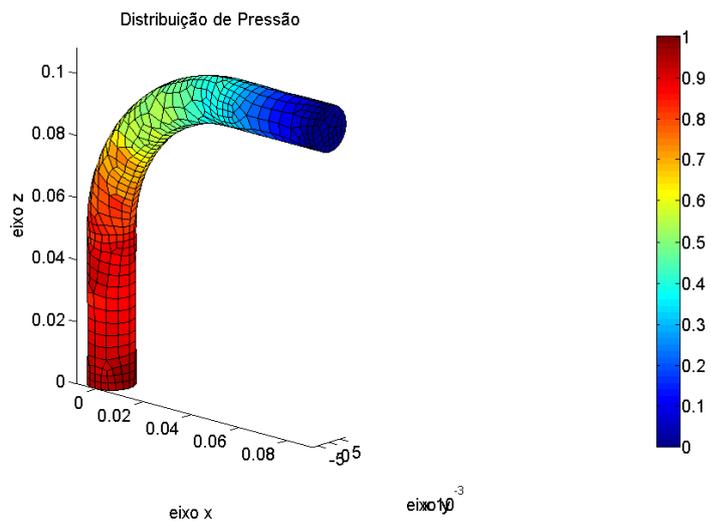


Figura 6.68: Primeiro modo modelo tridimensional tubo curvo.

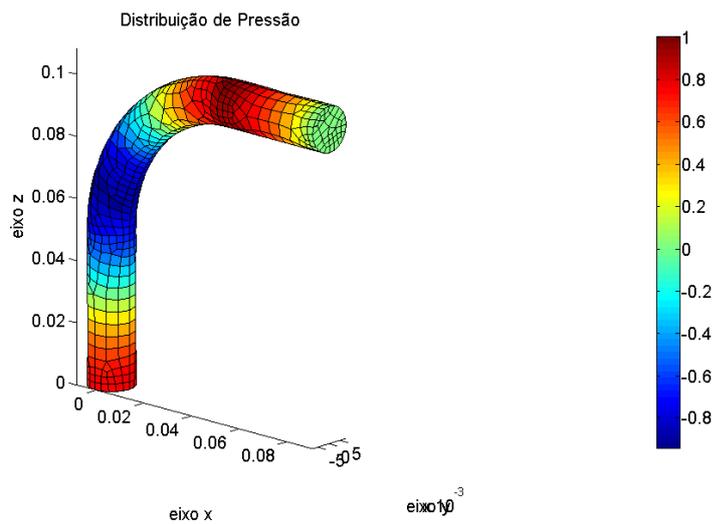


Figura 6.69: Segundo modo modelo tridimensional tubo curvo.

Capítulo 7 CONCLUSÕES PARCIAL E PERSPECTIVAS

O projeto iniciou uma metodologia para a criação de um método numérico na modelagem do trato vocal, utilizando o método de elementos de contorno é o método da matriz de transferência, criando uma ferramenta onde o trato vocal. Estudou-se tubos concatenados que representam as vogais [a], [i] e [u] utilizando a técnica da matriz de transferência e o método de elementos de contorno. Foi feita uma revisão bibliográfica sobre os conceitos básicos e modelos matemáticos do trato vocal. Desenvolveu-se a equação da onda e sua solução para cavidades retangular, cilíndricas para um tubo unidimensional utilizando a técnica da matriz de transferência. Utilizou-se o método de elementos de contorno para os cálculos numéricos com os programas fornecido pelo GDS em linguagem Matlab. Foi iniciado o estudo com um tubo unidimensional uniforme. A análise foi estendida para a modelagem das vogais [a], [i] e [u] com um modelo de seção transversal circular, e ainda um estudo sobre o efeito da curvatura. Os resultados não foram satisfatórios quando comparamos os resultados do método da matriz de transferência com o MEC vimos que não estão em perfeita concordância. Uma possível causa deste problema é que a excitação está a apenas em um ponto no espaço tornando o modelo tridimensional assim a hipótese imposta de para problemas unidimensionais não foi respeitada. A solução que deve ser testada é colocar a excitação do problema em toda a face fechada simulando assim as pregas vocais e tornando o problema unidimensional. Como os resultados dos tubo lineares não estão na concordância aceitável não se pode afirmar nada sobre os resultados do tubo curvo pois o mesmo não tem solução analítica. Uma proposta para trabalhos futuros é refazer as simulações colocando a excitação como proposta neste conclusão. Assim o trabalho deu um passo para a modelagem acústica do trato vocal humano porém ainda não está conclusivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, E. L. (2009). Introdução ao método dos elementos de contorno. *Universidade de Brasília*.
- Azevedo, C. A. C. (2007). Formulação alternativa para análise de domínios não homogêneos e inclusões anisotrópicas via mec. Master's thesis, Escola de Engenharia de São Carlos.
- Behlau, M., Azevedo, R., and Madazio, G. (1995). Anatomia da laringe e fisiologia da produção vocal. *Lovise*.
- Bergen, B., Pluymers, B., Genechten, B. V., Vandepitte, D., and Desmet, W. (2012). A trefftz based method for solving helmholtz problems in semi-infinitedomains. *Engineering Analysis with Boundary Elements* 36, pp. 30 a 38.
- Bistafa, S. R. (2006). *Acústica Aplicada Ao Controle de Ruído*. EDITORA EDGARD BLUCHER.
- Brandão, A. D. S. (2011). Modelagem acustica da producao da voz utilizando tecnicas de visualizacao de imagens medicas associadas a metodos numericos. Master's thesis, Universidade Federal Fluminense.
- Cataldo, E., Sampaio, R., and Nicolato, L. (2004). Uma discussÃo sobre modelos mecânicos de laringe para síntese de vogais. *ENGEVISTA*, v. 6, n. 1, p. 47-57.
- de Almeida, M. F. V. (2014). Análise numérica por modelos dissipativos de cavidades acústicas estreitas. Master's thesis, Universidade de Brasília.
- de Castro, A. J. B. (2004). Sintetizador texto-voz com autômatos adaptativos. Master's thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Dominguez, J. (1993). *Boundary Elements in Dynamics*. Escuela Superior de Ingenieros Industriales Universidad de Sevilla, Av. Reina Mercedes, s/n, 41012 Seville, Spain.
- Fant, G. (1970). The acoustic theory of speech production. *Mouton, The Hague*.
- Ferreira, A. C. (2012). Comparação analítica numérica de cavidades acústicas e vibro-acústicas. Technical report, Projeto de Graduação. Brasília: Departamento de Engenharia Mecânica (UnB/FT/EnM).
- Flanagan, J. (1968). Self-oscillating source for vocal-tract synthesizers. *IEEE Trans. On Audio and Electroacoustics*, Vol. 16, pp. 57-64.
- Gerges, S. N. Y. (2001). *Ruídos e Vibrações Veiculares*. Samir Nagi Yousri Gerges.
- Gibert, R. J. (1988). *Vibrations des structures - Interactions avec les fluides - Sources d'excitation aléatoires*. Eyrolles.
- Hannukainen, A., Lukkari, T., Malinen, J., and Palo, P. (2007). Vowel formants from the wave equation. *JASA Express Letters*.
- Hironori Takemotoa, Parham Mokhtari, T. K. (2010). Acoustic analysis of the vocal tract during vowel production by finite-difference time-domain method. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 128, No. 06.

- Huckvale, M. (2008). Make your own vowel resonator. Speech, Hearing & Phonetic Sciences University College London. <https://www.phon.ucl.ac.uk/home/mark/vowels/>. [Online; accessed 18-Junho-2015].
- Ishizaka, K. and Flanagan, J. (1972). Synthesis of voiced sounds from two-mass model of the vocal cords. *Bell Syst. Tech. Journal*, Vol. 51, pp. 1233-1268.
- Kirkup, S. M. (2007). *The Boundary Element Method in Acoustics*. Integrated Sound Software.
- Lucero, J., Hermant, K. L. N., Hirtum, A. V., and Pelorson, X. (2012). Effect of source tract acoustical coupling on the oscillation onset of the vocal folds. *Journal of the Acoustical Society of America*.
- M Valdan, L M Gratton, G. Z. and Oss, S. (2014). The speed of sound in singing tubes. *Physics Department, University of Trento, I-38123 Povo (Trento), Italy*.
- Morais, M. V. G. (2000). Modelagens numéricas pelo método dos elementos finitos em problemas de interação fluido-estrutura. Master's thesis, Universidade de Brasília.
- Pedroso, J., Tinawi, R., and Léger, P. (2000). On the prospects of computational fluid dynamics in concrete dam engineering. *Conférence annuelle de la Société 134 canadienne de Computational Fluid Dynamic*.
- Sader, R. C. M. and Hanayama, E. M. (2004). Considerações teóricas sobre a abordagem acústica da voz infantil. *CEFAC*.
- Savioja, L. (2000). Modeling techniques for virtual acoustics. Master's thesis, Helsinki University of Technology.
- Silverio, K. C. (2013). A importância da saúde vocal para profissionais. *Revista Espaço Aberto, USP*.
- Titze, I. (2001). Acoustic interpretation of resonant voice. *Journal of Voice*.
- Urbassek, H. M. (2014). Acoustic tube model of the human vocal tract: formants and vowels. *European Journal of Physics*.