

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

BRENNO LOBO NETTO PEIXOTO

ESTUDO DO MÉTODO DAS GUIAS DE ONDAS DIGITAIS NA ACÚSTICA

GOIÂNIA - GO

2019

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação Tese
 Monografia

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

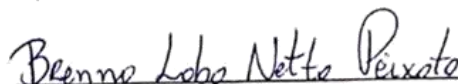
Nome completo do autor: Brenno Lobo Netto Peixoto

Título do trabalho: ESTUDO DO MÉTODO DAS GUIAS DE ONDAS DIGITAIS NA ACÚSTICA

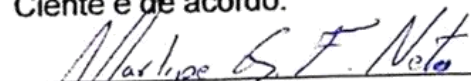
3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do(a) autor(a)²

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 04 / 07 / 19

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² A assinatura deve ser escaneada.

BRENNO LOBO NETTO PEIXOTO

ESTUDO DO MÉTODO DAS GUIAS DE ONDAS DIGITAIS NA ACÚSTICA

Projeto Final de curso, apresentado à
Universidade Federal de Goiás, como
parte das exigências para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia
Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto

GOIÂNIA
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Lobo Netto Peixoto, Brenno
ESTUDO DO MÉTODO DAS GUIAS DE ONDAS DIGITAIS NA
ACÚSTICA [manuscrito] / Brenno Lobo Netto Peixoto. - 2019.
f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de
Computação (EMC), , Goiânia, 2019.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, algoritmos,
lista de figuras, lista de tabelas.

1. Equação da onda. 2. Guia de ondas digitais. 3. Onda sonora. I.
Garcia Fagundes Neto, Marlipe , orient. II. Título.

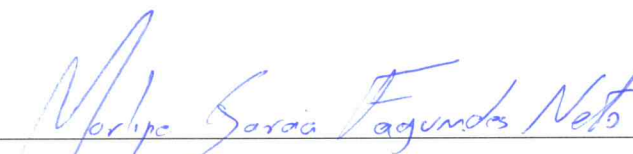
CDU 534

BRENNO LOBO NETTO PEIXOTO

ESTUDO DO MÉTODO DAS GUIAS DE ONDAS DIGITAIS NA ACÚSTICA

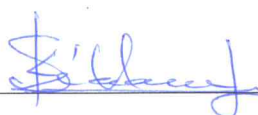
Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito para a conclusão do curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação.

Trabalho aprovado. Goiânia, 15 de julho de 2019



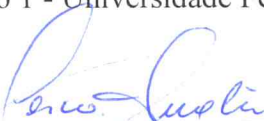
Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto

Orientador - Universidade Federal de Goiás



Prof. Dr. Sigeo Kitatani Júnior

Convidado 1 - Universidade Federal de Goiás



Prof. Dr. Marco Aurélio Brazão Costa Badan

Convidado 2 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

GOIÂNIA - GO

2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, que me deu o dom da vida e me abençoa todos os dias com o seu amor infinito, força de vontade e resiliência.

Aos meus pais, Edimar e Jaqueline, por terem me proporcionado acesso à educação e pelos exemplos de vida, retidão, caráter, honra e trabalho que tento seguir em minha vida. Além disto agradeço pela paciência ou tentativa de serem pacientes com minhas impicâncias diárias.

Ao meu irmão que é uma das únicas pessoas que me faz chorar de preocupação, mas que é minha base e me apoia em todas as minhas decisões.

Aos meus familiares mais próximos e amigos por trazerem alegria ao meu dia-a-dia e me mostrarem o significado de cumplicidade e confiança, provando que nunca estamos sozinhos em nossa caminhada, independente do caminho a ser seguido.

Ao meu orientador, Professor Marlipe, primeiramente pela didática e paciência para transmitir conhecimento, pelo suporte desde a Iniciação Científica e em todas as dificuldades pelo caminho seja no âmbito acadêmico ou profissional.

Agradeço aos mentores que tive até então, pela oportunidade de aprender experiências, receber puxões de orelha e buscarem me fazer ser uma pessoa melhor.

Ao destino por ter me proporcionado situações ímpares em minha vida, as quais me fizeram tomar decisões importantes sobre meu presente e futuro.

"O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia sim, e no outro dia também."
Robert Collier

RESUMO

Uns dos quesitos importantes da acústica é o conforto acústico, desta forma na busca por qualidade acústica objetivo desse trabalho é realizar o estudo do método de guia de ondas digitais para a solução da onda unidimensional e bidimensional. A primeira abordagem do trabalho foca-se na compreensão do método de simulação e das condições de contorno. Com a fundamentação inicial estabelecida para os parâmetros unidimensionais, foca-se no caso bidimensional com testes na modelagem com utilização da série de Taylor e verificações dos erros de dispersão na fronteira de um ambiente. No processo de implementação a percepção da influência da impedância acústica também foi uma variável de suma importância para o trabalho, visto que a energia ou pressão de um nó ou junta é influenciado pela vizinhança. Comparando o método numérico de estudo com método analítico percebe-se que a relação de frequência de simulação sobre a frequência de excitação da fonte deve ser no mínimo 10 para que apresente resultados confiáveis. Além disto, verificou-se que quando esta condição é atendida, a direção preferencial para haver menor erro de dispersão para uma onda sonora ocorre a 45° .

Palavras-chave: Equação da onda. Guia de ondas digitais. Onda sonora.

ABSTRACT

One of the important aspects of acoustics is acoustic comfort. In this way, in the quest for acoustic quality, the objective of this work is to study the digital waveguide method for the one-dimensional and two-dimensional wave solution. The first approach of the work focuses on the understanding of the simulation method and the boundary conditions. With the initial rationale established for the one-dimensional parameters, it focuses on the two-dimensional case with modeling tests using the Taylor series and checks for dispersion errors at the border of an environment. In the implementation process, the perception of the influence of the acoustic impedance was also a very important variable for the work, since the energy or pressure of a node or joint is influenced by the neighborhood. Comparing the numerical method of study with analytical method it is realized that the relation of frequency of simulation on the frequency of excitation of the source must be at least 10 so that it presents reliable results. In addition, it was verified that when this condition is met, the preferred direction to have the lowest dispersion error for a sound wave occurs at 45°.

Key words: Wave equation. Digital waveguide. Sound wave.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Propagação do som em ambiente com obstáculos.	14
Figura 2 – Formando a impedância mapeada / u / vogal DWM: (a) função de seção transversal; (b) malha retilínea com mapa de impedância.	17
Figura 3 – Estrutura de Malha Tetraédrica 3-D.....	18
Figura 4– Propagação livre de ondas acústicas, sem a presença de obstáculos.	18
Figura 5 – Representação genérica de guia de ondas digitais para formarem uma malha triangular.....	19
Figura 6 – Visualização dos métodos Waveguide e Diferenças Finitas (2D) em 0,292s.....	20
Figura 7 – Diagrama de partículas em um meio com áreas alternadas de compressão e rarefação.	21
Figura 8– Reflexão e transmissão de onda sonora, em incidência normal.....	23
Figura 9 – Representação de uma Guia de Ondas Digitais.	24
Figura 10 – Representação esquemática de uma junta de dispersão.	25
Figura 11 – Malha unidimensional do método DWG (As caixas representam os nós da malha vizinha).	26
Figura 12 – Malha bidimensional do método DWG (As caixas representam os nós da malha vizinha).	27
Figura 13 – Desenho esquemático do posicionamento dos nós na malha SDWG (As caixas representam a malha vizinha).	27
Figura 14 – Configuração de fronteira DWG 1-D.....	28
Figura 15 – Terminação de uma malha de guia de ondas devido a um limite resultando em uma reflexão.	29
Figura 16 – Junção de limite PJ e junções conectadas de Pi com valores de pressão associados a Pi (n-i + 1) usados em uma aproximação da Série Taylor para o valor de junção PJ (n + 1).	30
Figura 17 – Fonte de excitação impulsiva com amplitude unitária (1-D) ao longo do espaço e tempo.	33
Figura 18 – Ambiente de simulação bidimensional com cotas e posicionamento da fonte indicado pela seta.....	34
Figura 19 – Fonte de excitação harmônica com amplitude unitária (2D).	34
Figura 20 – Planos de amostragem dos valores temporais de pressão (figura ilustrativa).	35
Figura 21 – Propagação de onda 1-D	36
Figura 22 – Influência do uso das Ordens de Taylor (1-D).....	37
Figura 23 – Influência do uso das ordens da série de Taylor (2-D).	38
Figura 24 – Propagação sonora ao longo da borda.	39
Figura 25 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 45° - fs=3200Hz/fa=80Hz	40
Figura 26 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 26°/fs=3200Hz/fa=80Hz	40
Figura 27 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 0°/fs=3200Hz/fa=80Hz	40
Figura 28 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 45°/fs=3200Hz/fa=160Hz	41
Figura 29 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 26° - fs=3200Hz/fa=160Hz	41
Figura 30 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 0° - fs=3200Hz/fa=160Hz	42
Figura 31 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 45° - fs=3200Hz/fa=320Hz	42
Figura 32 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 26°/fs=3200Hz/fa=320Hz	43
Figura 33 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 0° - fs=3200Hz/fa=320Hz	43
Figura 34 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 45° - fs=3200Hz/fa=480Hz	44
Figura 35 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 26° - fs=3200Hz/fa=480Hz	44
Figura 36 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 0° - fs=3200Hz/fa=480Hz	44
Figura 37 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 45° - fs=3200Hz/fa=640Hz	45

Figura 38 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 26° - fs=3200Hz/fa=640Hz	45
Figura 39 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 0° - fs=3200Hz/fa=640Hz	46
Figura 40 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 45° - fs=6400Hz/fa=80Hz	46
Figura 41 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 26° - fs=6400Hz/fa=80Hz	47
Figura 42 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 0° - fs=6400Hz/fa=80Hz	47
Figura 43 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 45° - fs=6400Hz/fa=160Hz	48
Figura 44 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 26° - fs=6400Hz/fa=160Hz	48
Figura 45 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 0° - fs=6400Hz/fa=160Hz	48
Figura 46 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 45° - fs=6400Hz/fa=320Hz	49
Figura 47 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 26° - fs=6400Hz/fa=320Hz	49
Figura 48 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 0° - fs=6400Hz/fa=320Hz	50
Figura 49 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 45° - fs=6400Hz/fa=480Hz	50
Figura 50 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 26° - fs=6400Hz/fa=480Hz	51
Figura 51 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 0° - fs=6400Hz/fa=480Hz	51
Figura 52 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 45° - fs=6400Hz/fa=640Hz	52
Figura 53 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 26° - fs=6400Hz/fa=480Hz	52
Figura 54 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 0° - fs=6400Hz/fa=640Hz	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Direções preferenciais baseado nas frequências de simulação de 3200 Hz e algumas frequências de excitação da fonte sonora.	53
Tabela 2 – Direções preferenciais baseado nas frequências de simulação de 6400Hz e algumas frequências.....	53
Tabela 3 – Comparativo entre Bessel e DWG – 0°,fs=3200Hz,fa=640Hz.....	66
Tabela 4 – Comparativo entre Bessel e DWG – 0°,fs=3200Hz,fa=480Hz.....	67
Tabela 5 – Comparativo entre Bessel e DWG – 0°,fs=3200Hz,fa=480Hz.....	67
Tabela 6 – Comparativo entre Bessel e DWG – 0°,fs=3200Hz,fa=160Hz.....	67
Tabela 7 – Comparativo entre Bessel e DWG – 0°,fs=3200Hz,fa=80Hz.....	67
Tabela 8 – Comparativo entre Bessel e DWG – 26°,fs=3200Hz,fa=640Hz.....	68
Tabela 9 – Comparativo entre Bessel e DWG – 26°,fs=3200Hz,fa=480Hz.....	68
Tabela 10 – Comparativo entre Bessel e DWG – 26°,fs=3200Hz,fa=480Hz.....	69
Tabela 11 – Comparativo entre Bessel e DWG – 26°,fs=3200Hz,fa=160Hz.....	69
Tabela 12 – Comparativo entre Bessel e DWG – 26°,fs=3200Hz,fa=80Hz.....	69
Tabela 13 – Comparativo entre Bessel e DWG – 45°,fs=3200Hz,fa=640Hz.....	70
Tabela 14 – Comparativo entre Bessel e DWG – 45°,fs=3200Hz,fa=480Hz.....	71
Tabela 15 – Comparativo entre Bessel e DWG – 45°,fs=3200Hz,fa=320Hz.....	71
Tabela 16 – Comparativo entre Bessel e DWG – 45°,fs=3200Hz,fa=160Hz.....	72
Tabela 17 – Comparativo entre Bessel e DWG – 45°,fs=3200Hz,fa=80Hz.....	72
Tabela 18 – Comparativo entre Bessel e DWG – 0°,fs=6400Hz,fa=640Hz.....	72
Tabela 19 – Comparativo entre Bessel e DWG – 0°,fs=6400Hz,fa=480Hz.....	73
Tabela 20 – Comparativo entre Bessel e DWG – 0°,fs=6400Hz,fa=320Hz.....	73
Tabela 21 – Comparativo entre Bessel e DWG – 0°,fs=6400Hz,fa=160Hz.....	73
Tabela 22 – Comparativo entre Bessel e DWG – 0°,fs=6400Hz,fa=80Hz.....	73
Tabela 23 – Comparativo entre Bessel e DWG – 26°,fs=6400Hz,fa=640Hz..	74
Tabela 24 – Comparativo entre Bessel e DWG – 26°,fs=6400Hz,fa=480Hz.....	74
Tabela 25 – Comparativo entre Bessel e DWG – 26°,fs=6400Hz,fa=320Hz.....	75
Tabela 26 – Comparativo entre Bessel e DWG – 26°,fs=6400Hz,fa=160Hz.....	75
Tabela 27 – Comparativo entre Bessel e DWG – 26°,fs=6400Hz,fa=80Hz.....	75
Tabela 28 – Comparativo entre Bessel e DWG – 45°,fs=6400Hz,fa=640Hz.....	76
Tabela 29 – Comparativo entre Bessel e DWG – 45°,fs=6400Hz,fa=480Hz.....	76
Tabela 30 – Comparativo entre Bessel e DWG – 45°,fs=6400Hz,fa=320Hz..	77
Tabela 31 – Comparativo entre Bessel e DWG – 45°,fs=6400Hz,fa=160Hz..	77
Tabela 32 – Comparativo entre Bessel e DWG – 45°,fs=6400Hz,fa=80Hz.....	77

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

PIVIC	Programa Institucional de Voluntariado em Iniciação científica
CREEM	Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
CONPEEX	Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão
FDM	Método de diferenças finitas
DWG	Guias de Onda Digitais
DWN	Redes digitais de guias de onda
TLM	Método de matriz de linha de transmissão
WDFs	Filtros digitais de ondas
SDWG	Malha de guia de ondas digitais quadrada
TDWG	Malha de guia de ondas digitais triangular
1-D	Unidirecional
2-D	Bidirecional
3-D	Tridimensional
ABCs.	Condições de Limite Absorvedoras

LISTA DE SIMBOLOS

∂	Derivada parcial
Σ	Somatório
h_1 e h_2	Parcelas da função da onda viajando ao longo do espaço
t	Tempo de análise
Amp	Amplitude
q	Ordem do polinômio Analítico
J	Polinômio Analítica de ordem m
k	Comprimento de onda
N	N é o número de vizinhos conectados a uma junta
m	Variável numérica que representa o tempo
θ	Direção de propagação da onda sonora
dt	Discretização temporal
dx	Discretização espacial
DIM	Número de dimensões espaciais ou número de dimensões de guias das ondas que se cruzam em cada junta
fs	Frequência de simulação
fa	Frequência de excitação da fonte
Z	Impedância acústica específica do meio
A^{-m}	Função de transferência qualquer
P	Pressão sonora
P^+	Pressão sonora da onda incidente
P^-	Pressão sonora da onda refletida
P^{tr}	Pressão sonora da ondas transmitida de um meio para outro
c	Velocidade de propagação sonora no ar
ρ	Densidade do meio de propagação sonoro
R	Reflexão sonora
T	Transmissão sonora
ii	Posição atual das abcissas no eixo cartesiano

jj

Posição atual das ordenadas no eixo cartesiano

J

Junta/nó de dispersão

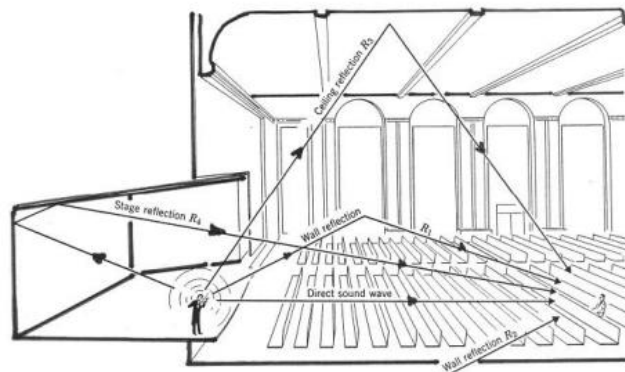
Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	MOTIVAÇÃO.....	15
1.2	JUSTIFICATIVA.....	15
1.3	OBJETIVO.....	15
1.4	ESTRUTURA.....	16
	Capítulo II.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
	Capítulo III.....	21
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
3.2	EQUAÇÃO DA ONDA UNIDIMENSIONAL.....	21
3.2	EQUAÇÃO DA ONDA BIDIMENSIONAL.....	22
3.3	IMPEDÂNCIA ACÚSTICA ESPECÍFICA.....	22
3.4	COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO E REFLEXÃO.....	23
3.5	MÉTODO DAS GUIA DE ONDAS DIGITAIS.....	24
3.6	FRONTEIRAS UNIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL.....	28
	Capítulo IV.....	32
4	METODOLOGIA.....	32
4.1	ESTUDO UNIDIMENSIONAL.....	32
4.2	ESTUDO BIDIMENSIONAL.....	33
4.3	ERRO DE DISPERSÃO DE FASE E AMPLITUDE.....	34
	Capítulo V.....	36
5	RESULTADOS.....	36
5.1	UNIDIMENSIONAL.....	36
5.2	BIDIMENSIONAL.....	37
5.2.1	ORDENS DA SÉRIE DE TAYLOR.....	37
5.2.2	ANÁLISE COM AS FREQUÊNCIA DE SIMULAÇÃO.....	39
5.2.2.1	ANÁLISE COM FREQUÊNCIA DE SIMULAÇÃO DE 3200 Hz.....	39
5.2.2.2	ANÁLISE COM FREQUÊNCIA DE SIMULAÇÃO DE 6400 Hz.....	46
5.3	QUANTIFICAÇÃO DO ERRO DE DISPERSÃO.....	53
	Capítulo VI.....	55
6	CONCLUSÃO.....	55
6.1	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	55
	Capítulo VII.....	57
7	REFERÊNCIAS.....	57
	Capítulo VIII.....	59
8	APÊNDICE A.....	59
9	APÊNDICE B.....	66
10	APÊNDICE C.....	78

1 INTRODUÇÃO

A acústica é a ciência que estuda os sons e/ou ruídos e sua propagação em diferentes meios, bem como sua interação com o ser humano. O som pode ser definido de duas maneiras. Fisicamente, é a vibração mecânica ou movimento oscilatório de um meio elástico, através do qual a energia é transferida para fora da fonte mediante ondas sonoras progressivas; e genericamente segundo Silva (1971), pode ser definido como uma variação de pressão que gera uma excitação do mecanismo auditivo, resultando na percepção do som. Ao se propagarem, as ondas sonoras podem encontrar obstáculos, os quais podem ser compreendidos como superfícies geométricas sólidas, como barreiras ou anteparo, conforme Fig. 1.

Figura 1 – Propagação do som em ambiente com obstáculos.



Fonte: Ferreira, 2010.

Uns dos quesitos importantes da acústica é o conforto acústico. O conforto acústico tornou-se uma variável relevante no desenvolvimento de soluções construtivas devido ao fato de, nos dias de hoje, a sociedade se encontrar muito mais sensibilizada relativamente ao ruído. Segundo Gerges (1992), a concepção de ambientes como salas de aula, salas de teatro, igrejas e auditórios com as características de conforto acústico passaram exigir para cada projeto particularidades, como questões de cálculos na geometria e propagação do som. Neste contexto, em geral, o estudo de fenômenos acústicos e como influenciam a qualidade acústica é de suma importância. Para a qualidade acústica de ambientes, tem-se o emprego dos métodos de modelagem acústicas para uma leitura fiel dos sinais acústicos (Moura, 2005) podendo ser classificados em analítica, experimental e numérica. A modelagem de forma analítica apresenta elevada confiabilidade, entretanto, possui elevadas restrições quanto a geometria e aos fenômenos físicos. A modelagem experimental apresenta ampla aplicação e abrangência. No entanto exige expressivo custo monetário devido à necessidade de equipamentos para instrumentação, além de não se tratar de um tipo previewal de modelagem. A modelagem numérica possui grande possibilidade de estudos com geometrias variadas e a característica previewal que oferecem uma compreensão completa da situação. Entretanto, o método de modelagem numérica possui dependência de pessoas especializadas, computadores com algum *software* de simulação instalado e modelagem matemática com discretizações.

Neste trabalho, tem como foco principal a modelagem numérica visto que suas aplicações na acústica de salas variam desde o projeto de auditórios até o

desenvolvimento de equipamentos musicais e a criação de ferramentas para síntese e manipulação de sons. Com auxílio da técnica numérica método de Guia de Ondas Digitais, este trabalho foi desenvolvido para estudar o comportamento de variação de parâmetros como frequência em ambiente fechado e assim possibilitar estudos mais avançados na acústica.

1.1 MOTIVAÇÃO

O interesse por esse estudo surgiu mediante a participação de um projeto de pesquisa, na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, como voluntário do programa de iniciação científica – PIVIC, cuja derivações de pesquisa versava sobre a modelagem e simulação do campo sonoro de salas via método das guias de ondas digitais.

Essa linha de pesquisa subsidiou a elaboração do projeto e apresentação de artigos científicos em dois congressos nacionais (CREEM e CONPEEX). Nestes expôs-se comparação entre o método clássico de diferenças finitas e o método de guia de ondas digitais.

Desta forma, o programa iniciação científica – PIVIC – que serviu de motivação para o trabalho, no qual faz parte do projeto “Acústica de Salas: Influência e modelagem da posição de materiais de absorção sonora na característica acústica de salas de aula”, necessita de aprofundamentos no estudo previsual das características acústicas do ambiente com variação dos parâmetros sonoros.

Portanto, o trabalho propõe dar prosseguimento a pesquisa realizada no PIVIC de modo a analisar a influência da variação de parâmetros na modelagem do método de guia de ondas digitais de modo a aprimorar os modelos numéricos, verificando limitações e suas aplicações.

1.2 JUSTIFICATIVA

Um dos principais problemas encontrados nas simulações, durante a iniciação científica, foi o erro de dispersão. Isso se deu devido a discretização necessária para a modelagem do problema e parâmetros utilizados nas simulações. Diante desta complexibilidade no ambiente estudado juntamente com o aprendizado adquirido, verificou-se a necessidade de focar no estudo do método de guia digitais e compreender como se comporta o erro de dispersão com a variação de parâmetros como frequência de excitação de fonte, frequência de simulação e condição de transmissibilidade total.

1.3 OBJETIVO

Realizar estudo do método das guias de ondas digitais para a solução da equação da onda sonora. Propõe-se estudar e aplicar o método para obter resultados em ambientes como salas, verificando a influência e limitação do erro de dispersão e assim compreender parâmetros para qualidade acústica.

Além disto, busca-se constatar o estado da arte da acústica de ambientes fechados juntamente com a implementação de guia de ondas digitais. Após

implementação da modelagem matemática no software Matlab, foca-se em simulações e algumas análises dos parâmetros que envolvem o método, como por exemplo frequência.

1.4 ESTRUTURA

A estruturação do trabalho será organizado através de capítulos, de modo a auxiliar na compreensão do método das guias de ondas digitais e parâmetros envolvidos.

O Capítulo II consiste na revisão bibliográfica, de modo a ser a base que sustenta qualquer pesquisa científica. Em seguida, o Capítulo III ampara tecnicamente e teoricamente o trabalho com a fundamentação teórica.

Após toda a base fundamentada e amparada por questões técnicas, tem-se posteriormente o Capítulo IV expõe a metodologia utilizada no trabalho com os procedimentos e abordagens. Em sequência, o Capítulo V apresenta os resultados obtidos acompanhado das análises realizadas. Por fim, o Capítulo VI explicita as conclusões que foram absorvidas do trabalho

Os capítulos seguintes apresentam as referências do trabalho, os apêndices com as simulações desenvolvidas, figuras e tabelas que serviram de base para o trabalho, além do plano de trabalho elaborado.

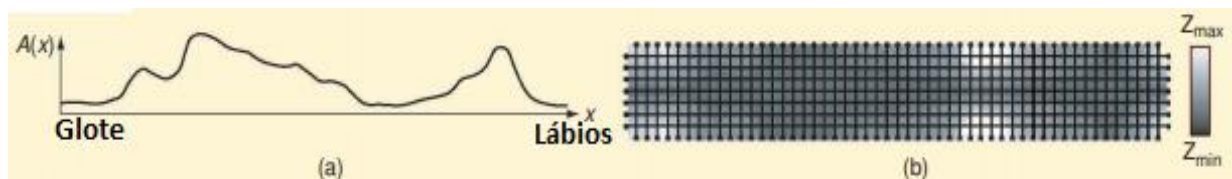
Capítulo II

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com os objetivos traçados para este trabalho, foram pesquisados diversos trabalhos com tema em estudos de guia de ondas digitais, cujos envolvem artigo, trabalhos de conclusão de curso, dissertações, teses e livros, de modo a orientar a respeito do que já é existente e o que pode ser melhorado nesta linha.

As guias de ondas digitais caracterizam o meio de propagação são dispositivos que guiam o movimento da onda. O método de guias digitais de ondas (DWG) é considerado simples devido a operação em regime unidirecional das guias digitais de ondas, ponto a ponto, ao longo de todo o espaço analisado. O guia de onda digital unidimensional (1-D) é baseado na discretização do tempo e do espaço da solução d'Alembert para a equação de onda sonora. Esta abordagem da acústica foi utilizada no modelo Kelly-Lochbaum (1962) no trato vocal humano para a síntese de fala, Fig. 2, e tem paralelos com outros paradigmas de modelagem de espalhamento de variáveis de onda mais geralmente aplicados, como o método de matriz de linha de transmissão (TLM) e filtros digitais de ondas (WDFs), segundo Johns e Buerle (1971).

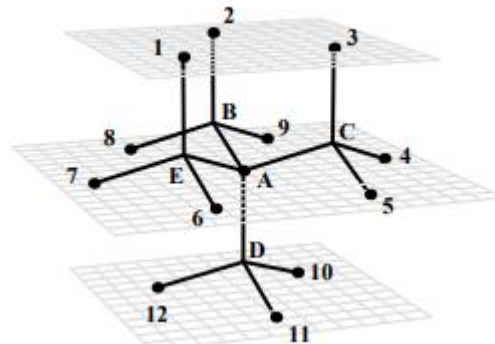
Figura 2 – Formando a impedância mapeada / u / vogal DWM: (a) função de seção transversal; (b) malha retilínea com mapa de impedância.



Fonte: Modificado de Kelly-Lochbaum (1962)

O primeiro a utilizar esta técnica foi Smith (1985) para a simulação da reverberação de salas. Posteriormente, o autor também avaliou o método para a sintetização do som e aplicações na música (Smith, 1987). Além disso, a malha bidimensional de guias de ondas digitais foi utilizada para a modelagem de membranas de tambores, pratos, gongos, dentre outros (Van Duyne e Smith, 1993). Posteriormente, malhas tetraédricas foram propostas para a solução de problemas acústicos tridimensionais, Fig. 3, em substituição das malhas cúbicas (Van Duyne e Smith, 1995).

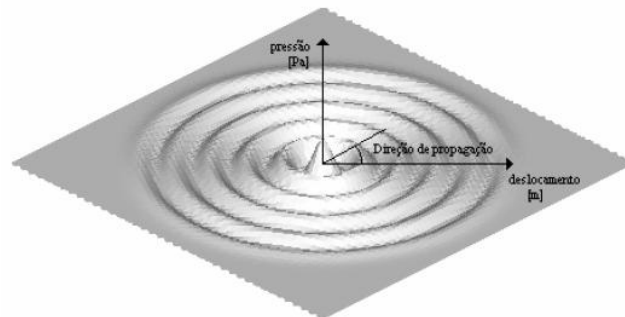
Figura 3 – Estrutura de Malha Tetraédrica 3-D.



Fonte: Van Duyne e Smith, 1995.

Segundo Speed, Murphy e Howard (2013) e Chobeau et al. (2017), o método de guias de onda digitais é popular para geração de som realista e de alta qualidade em tempo real, e são implementados com sucesso em modelagem física de síntese de som. A DWG foi utilizada por Moura (2005) no estudo da equação da onda em campo livre em um ambiente sem estudo das condições de contorno, Fig.4. Expõem-se que há boa correlação entre os valores obtidos em função da direção de propagação com o tipo de malha analisado, denominado erro de dispersão. Por sua vez, Boaventura (2009), discute a modelagem de salas em um ambiente com reflexão total, na qual a autora apresentou diversas situações da técnica na presença ou ausência de barreiras, ilustrando que a ferramenta permite observar o efeito da difração. Ainda, a autora analisou o uso da DWG para auralização de salas, a qual mostrou-se promissora.

Figura 4– Propagação livre de ondas acústicas, sem a presença de obstáculos.



Fonte: Moura, 2005.

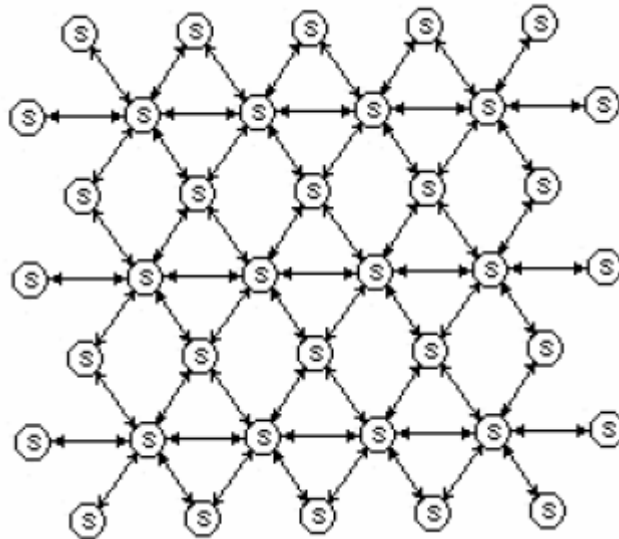
Segundo Karjalainen, Huang, e Smith (2005), técnicas para simular espaços acústicos podem ser divididas em algumas categorias principais: métodos geométricos (métodos de fonte de imagem e métodos baseados em raios), métodos baseados em elementos ou malhas (método de elementos finitos, método de elementos de contorno, guias ou malhas digitais), bem como métodos estatísticos e algoritmos de reverberação para reverberação tardia. A ideia original de guias de onda digitais (DWG) e redes digitais de guias de onda (DWN) era simular a reverberação da sala (Smith, 1985). No entanto, as principais aplicações da abordagem foram na modelagem baseada em física de instrumentos musicais e, surpreendentemente, pouco foi publicado sobre seu uso no domínio da aplicação original.

O foco principal da tese de Speed, Murphy e Howard.(2013) foi a aplicação da técnica DWG no trato vocal, e comparação de seu desempenho com abordagens

de menor dimensionalidade. Para permitir o desenvolvimento de tais modelos, um conjunto de dados foram coletados a partir de imagens de ressonância para estruturação dos dados eficientes e adequar para simulação. A técnica de simulação foi validada usando uma combinação de técnicas de medição / inversão sob medida e determinação analítica de comportamentos de baixa frequência. Finalmente, a síntese de voz baseada em cada modelo numérico foi comparada com gravações acústicas dos sujeitos envolvidos e com simulações equivalentes de métodos de menor dimensionalidade.

A malha bidimensional de guias digitais de ondas pode ser simulada por malha quadrada (SDWG) ou triangular (TDWG). A malha SDWG tem-se a sobreposição de guias regularmente espaçadas e formação de ângulos retos entre elas (VAN DUYNÉ e SMITH III, 1993) enquanto a malha TDWG, segundo Moura (2005), trata-se de uma tentativa de aprimoramento da malha SDWG, visto que há a adição de mais direções de propagação da onda, Fig. 5. Na malha retilínea (SDWG), as junções não limítrofes têm, cada uma, 4 guias de onda de conexão, ao contrário das junções não limítrofes na malha triangular que têm 6 guias de onda de conexão.

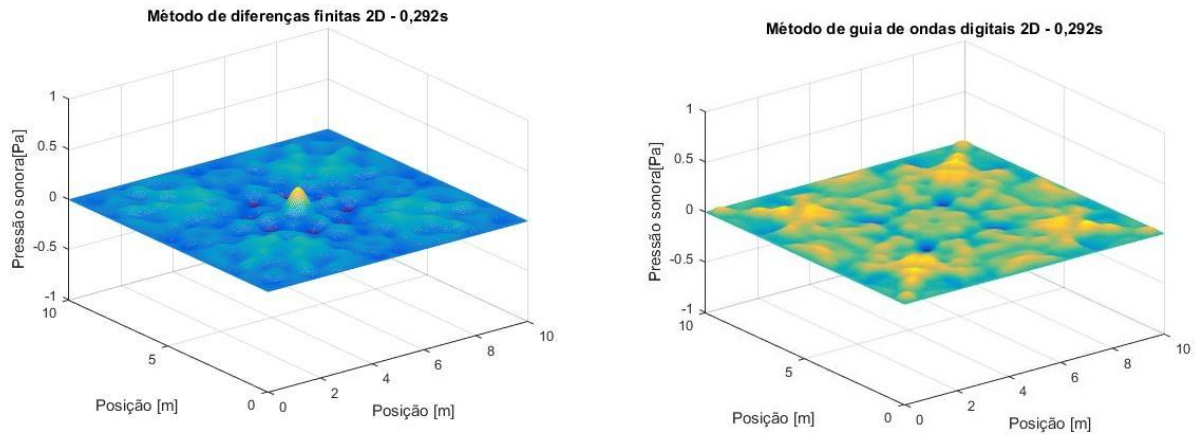
Figura 5 – Representação genérica de guia de ondas digitais para formarem uma malha triangular.



Fonte: Moura, 2005.

O foco principal do artigo de Peixoto e Fagundes Neto (2018) visou representar os fenômenos básicos de interação das ondas e seus efeitos na superfície das paredes em uma sala com os métodos numérico de diferenças finitas (FDM) e guia de ondas digitais. Os resultados obtidos pelos métodos no estudo unidimensional mostraram-se satisfatórios, de modo a destacar o fator estabilidade. Os resultados mostraram-se equivalentes no caso bidimensional nas iterações iniciais, onde o número de reflexões nos obstáculos é baixo, porém com o aumento das reflexões, observa-se divergência como ilustrado na Fig. 6. Tais divergências tem como explicação o aumento do erro de dispersão no caso do método de guias digitais.

Figura 6 – Visualização dos métodos Waveguide e Diferenças Finitas (2D) em 0,292s.



Fonte: Peixoto e Fagundes Neto, 2018.

Fundamentado nos trabalhos e pesquisas desenvolvidas no tópico do método de Guia de Ondas Digitais, nota-se moderada evolução destacando a modelagem no trato vocal humano para a síntese da fala, reverberação de salas, aplicações na música e instrumentos musicais, geração de som de alta qualidade, estudo de propagação sonora em campo livre e modelagem de salas com reflexão total

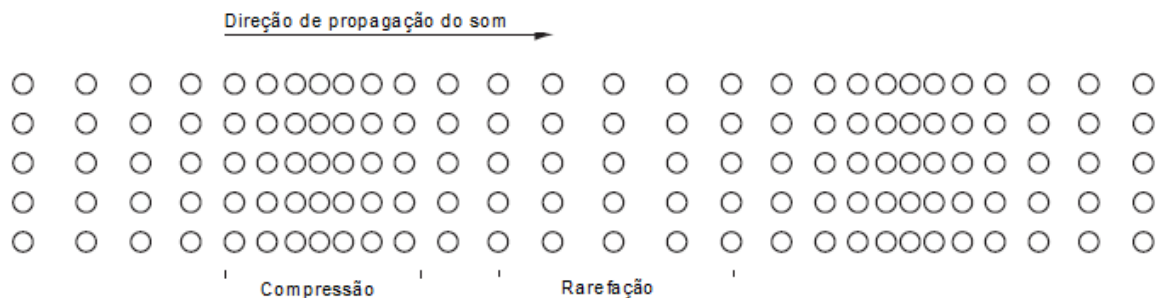
Capítulo III

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Antes de retratar aspectos do método de Guia de Ondas Digitais, é necessário recorrer à teoria acústica e compreender alguns conceitos pertinentes à propagação sonora. Blackstock (2000) define uma onda como sendo o movimento de um distúrbio ou de uma informação que vai de um meio a outro via um meio de propagação, com exceção às ondas eletromagnéticas. Em outras palavras, uma onda transmite informação através de energia, sem transportar matéria. Quanto à natureza, as ondas podem ser classificadas em dois tipos: mecânicas e eletromagnéticas. As ondas mecânicas precisam de um meio material para propagar, que é o caso das ondas acústicas, e em contrapartida, as eletromagnéticas não precisam de um meio para se propagar.

Segundo Hall (1980), Howard e Angus (1996), áreas dentro do meio que se tornam mais densas, quando as partículas são movidas mais próximas umas das outras do que seriam em seu estado natural, são chamadas de compressões, já áreas que se tornam menos densas, quando as partículas são separadas umas das outras, são chamadas de rarefações. A Fig.7 ilustra o diagrama de partículas em um meio com áreas alternadas de compressão e rarefação onde é possível observar a propagação do som.

Figura 7 – Diagrama de partículas em um meio com áreas alternadas de compressão e rarefação.



Fonte: Modificado de Shelley(2007).

3.2 EQUAÇÃO DA ONDA UNIDIMENSIONAL

O ponto de partida para o desenvolvimento da equação da onda baseia-se na solução unidimensional, representada por ondas planas. Convenientemente, analisa-se o movimento das ondas planas ao longo do eixo cartesiano x , sem influência das demais coordenadas. A Eq.(1) representa a equação da onda unidimensional, em que P representa a pressão dependente do espaço x e tempo t , c é a velocidade de propagação sonora no meio.

$$c^2 \frac{\partial^2 P}{\partial^2 x} - \frac{\partial^2 P}{\partial^2 t} = 0 \quad (1)$$

A solução mais geral da equação da onda unidimensional (1-D) pode ser escrita na forma da Eq.(2). Nota-se que os sinais indicam que a solução geral da onda é composta pelo movimento de ondas acústicas de duplo sentido em cada direção (Blackstock, 2000).

$$P = h_1(x - ct) + h_2(x + ct) \quad (2)$$

Onde h_1 e h_2 são funções de caráter senoidal.

Considerando que cada uma das parcelas verificadas na Eq. (2) represente uma onda viajando ao longo do eixo x com uma velocidade c , é possível dizer que esta equação representa um somatório de ondas, que trafegam no mesmo sentido, porém em direções opostas. Esta equação também é conhecida por solução de d'Alembert para a Equação Unidimensional da Onda Acústica (Blackstock, 2000).

3.2 EQUAÇÃO DA ONDA BIDIMENSIONAL

Um exemplo para a propagação bidimensional de ondas pode ser visualizada, em sua forma mais simples, em uma membrana flexível. Este efeito pode ser observado em diversos outros sistemas acústicos similares, tais como tambores, microfones do tipo diafragma, placas vibrantes, bem como a análise da propagação de ondas cilíndricas no espaço.

A Eq.(3) apresenta a solução modelada pelo produto de uma função senoidal dado pela função analítica de ordem q , em que J é o termo que descreve tal (Hall, 1987). Tem-se além disso, o comprimento de onda, expresso pela variável k , o raio da membrana expresso pela variável r , a variável θ representa o ângulo de análise, entretanto o polinômio analítico é simétrico para todas as direções, e Amp refere-se a amplitude da onda gerada.

$$h(r, \theta) = Amp. \cos(q. \theta) . J(k. r) \quad (3)$$

A ordem do polinômio foi definida em zero em função dos modos de vibração impostos ao sistema.

3.3 IMPEDÂNCIA ACÚSTICA ESPECÍFICA

Segundo Gerges (1992), a caracterização do movimento da onda e as interações com os obstáculos estão relacionados com a impedância acústica específica do meio representada por (Z), que depende do tipo de onda presente e da densidade do meio ambiente de propagação. Sendo a pressão acústica maior que a força acústica, tem-se que a impedância específica do meio pode ser definida como razão da pressão (P) pela velocidade de propagação da onda sonora (c), em um fluido de transporte, conforme a Eq.(4).

$$Z = \frac{P}{c} \quad (4)$$

Segundo Moura (2005), a impedância fornece uma ideia sobre a resposta de cada sistema, decorrente de uma perturbação seja na mecânica clássica, na eletrônica ou acústica. Desta forma, é possível identificar a dependência da densidade do meio de propagação (ρ) e da velocidade de propagação sonora. Rescrevendo a Eq.(4) tem-se a Eq.(5).

$$Z = \rho . c \quad (5)$$

Segundo Boaventura (2009), há fenômenos intrínsecos à propagação das ondas acústicas quando há sobreposição de ondas em uma mesma região no espaço, ou quando atravessam meios com diferentes propriedades, a exemplo de paredes em um ambiente fechado. Segundo Gerges (1992), interação entre ondas acústicas e obstáculos relacionam-se com as impedâncias e possibilitam propriedades de: transmissibilidade e refletibilidade. Em geral estas propriedades são quantizadas por coeficientes que são função da energia acústica incidente refletida e transmitida pelos obstáculos.

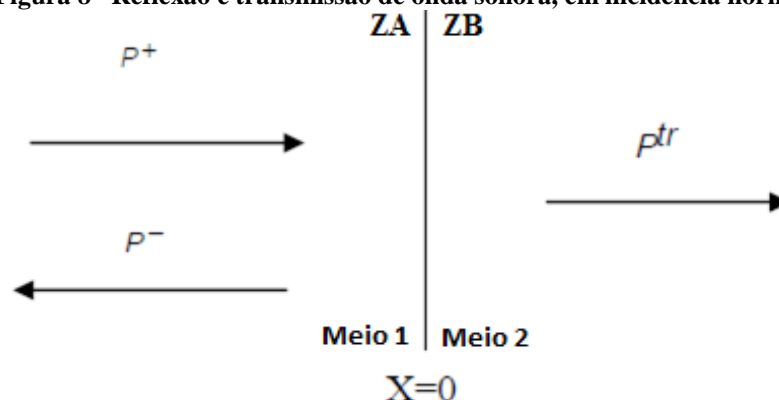
Segundo Gerges (1992), modelos mais sofisticados apresentam o efeito dessas propriedades sendo influenciadas por inúmeras variáveis, como, por exemplo, porosidade e outros fatores estruturais. Entretanto, neste trabalho utilizou-se coeficientes constantes, em função da impedância acústica do meio e dos contornos modelados.

Esta impedância deve ser, então, utilizada para caracterizar as fronteiras da modelagem. Ressalta-se que a impedância acústica, segundo Moura(2005), é função não apenas da densidade do material em que a onda está sendo propagada, mas também da velocidade de propagação das ondas no meio. Nota-se, também, que a mudança no valor de impedância do meio, durante o movimento de propagação da onda acústica de um meio para outro, ocasiona as reflexões e transmissões.

3.4 COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO E REFLEXÃO

Reflexão e transmissão são ilustradas na Fig. 8 que mostram a incidência das ondas acústicas em uma interface que separa dois meios elásticos ideais. Uma onda incide normalmente contra a superfície em $X=0$, que separa os meios, caracterizados pelas impedâncias Z_A e Z_B . Os sinais de pressão sonora serão representados por P^+ , P^- e P^{tr} respectivamente atribuídos às ondas incidentes, refletidas e transmitidas.

Figura 8– Reflexão e transmissão de onda sonora, em incidência normal.



Fonte: Modificado de Boaventura (2009).

O coeficiente de reflexão sonora traduz a razão da energia da pressão sonora refletida pela energia da pressão sonora incidente. Por sua vez, o coeficiente de transmissão sonora entre dois meios é dado pela razão entre a energia da pressão sonora transmitida pela energia da pressão sonora incidente. Assim, o coeficiente de reflexão da onda sonora R e de transmissão T são identificados nas Eqs.(6) e.(7), respectivamente.

$$R = \frac{P^-}{P^+} \quad (6)$$

$$T = \frac{P^{tr}}{P^+} \quad (7)$$

Admitindo as pressões acústicas em ambos lados da superfície iguais, velocidade das partículas normais a interface iguais e aplicando relação de impedâncias expressa na Eq. (4) tem-se o rearranjo das Eqs. (6) e (7) para Eqs. (8) e (9).

$$R = \frac{ZB - ZA}{ZB + ZA} \quad (8)$$

$$T = \frac{2 \cdot ZB}{ZB + ZA} \quad (9)$$

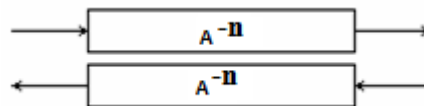
As variações de impedâncias, desta forma, representam condições de contorno dos problemas internos e externos devido a modelagem de geometria do meio.

3.5 MÉTODO DAS GUIA DE ONDAS DIGITAIS

3.5.1 GUIAS DE ONDAS

As guias de ondas digitais caracterizam o meio de propagação, e como o próprio nome sugere, são dispositivos que guiam o movimento da onda, construídos de forma a representar a solução de d'Alembert para a Eq. (2) segundo Moura (2005). As Guias Digitais de Ondas fornecem uma implementação digital desta solução, através de um atraso linear bi-direcional, ilustrado na Fig. 9.

Figura 9 – Representação de uma Guia de Ondas Digitais.



Fonte: Modificado de Moura, 2005.

Na Fig. 9 o termo A^{-n} simboliza uma função de transferência qualquer, aplicada ao transporte das propriedades de onda, de uma das extremidade à outra. A letra m representa o atraso temporal do sistema, ou seja, o número de passos temporais necessários para que tais propriedades sejam transferidas através da guia. Já, as setas indicam o duplo sentido de movimento.

Segundo Moura (2005), o método DWG é constituído de elementos lineares bidirecionais com caráter unitário, e tem-se que os valores de entrada em uma junta atual, em um instante n , são os mesmos valores de saída das juntas vizinhas, em um instante imediatamente anterior, $n-1$. Considerando o meio homogêneo, as guias de

ondas digitais possuem um mesmo valor de impedância em toda a vizinhança dos nós (juntas de dispersão), se homogêneas a pressão sonora n e $n-1$ nas guias são iguais.

Prosseguindo com a solução das guias digitais de ondas, é importante considerar que, ao se trabalhar dentro de um “domínio digital”, é necessário amostrar as amplitudes das ondas em intervalos de dt segundos correspondente a uma frequência de simulação (taxa de amostragem) f_s , conforme a Eq. (10). Além disto, no caso de modelagens numéricas, segundo Gerges (1992), a frequência de simulação deve ser mínimo 10 vezes maior que a frequência de excitação de uma fonte estudada para promover uma análise mais assertiva dos fenômenos acústicos.

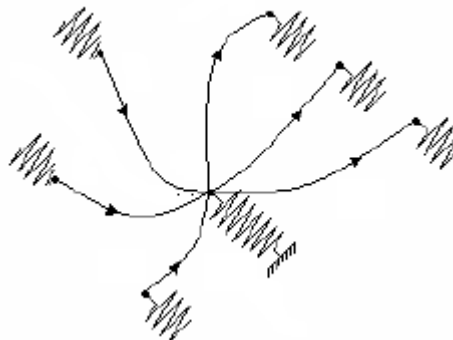
$$dt = \frac{1}{f_s} \quad (10)$$

3.6,1 INTERCONEXÃO DAS GUIAS DE ONDAS: JUNTAS DE DISPERSÃO

Segundo Saviola et al (1995), as malhas de guias digitais de ondas são matrizes de pontos discretamente espaçados por guias digitais de ondas unidimensionais, sendo estas, arranjadas ao longo de dimensões perpendiculares. As guias, por sua vez, são conectadas em suas extremidades pelas juntas de dispersão, formando a malha. Depois de formuladas, as juntas podem ser arranjadas de forma a modelar às geometrias do problema.

As juntas de dispersão são os pontos gerados para fazer a amostragem temporal do fenômeno de distúrbio analisado. Neste caso específico, as juntas de dispersão estão associadas com os valores da pressão acústica e da das partículas do meio. Para efeito de visualização, a Fig. 10 esquematiza uma junta de dispersão.

Figura 10 – Representação esquemática de uma junta de dispersão.



Fonte: Modificado de Moura (2005)

Segundo Moura (2005), para melhor visualização essas juntas são desenvolvidas sobre um sistema físico composto por um conjunto de molas flexíveis através de guias digitais de onda. Nesta formulação desenvolvida tem-se que a força transversal necessária para provocar deslocamento em um nó pode ser expressa em função da impedância característica da onda e da velocidade de deslocamento do mesmo. A pressão na junta J é calculada pela Eq. (11), sendo que N é o número de nós vizinhos conectados a junta, Z_i refere-se a impedância da Guia de Onda Digital entre o nó e a junta e P_{ji}^+ é a pressão sonora de entrada da junta.

$$P_j = 2 \frac{\sum_{i=1}^N \frac{P_{j,i}^+}{Z_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{Z_i}} \quad (11)$$

3.5.2.1 MALHA UNIDIMENSIONAL

O método de Guia de Ondas Digitais unidimensional (1-D) tem o espaçamento entre os dois nós da malha é dado pela Eq. (12) e a atualização temporal é dada pela Eq. (10). Para garantir estabilidade e convergência do método na modelagem uma importante característica é a velocidade nominal de propagação do som no meio e o número de dimensões espaciais DIM, ou seja, o número de dimensões de guias das ondas que se cruzam em cada junta (Savioja et al, 1996) que no caso 1-D é igual a 1.

$$dx = \frac{c \cdot \sqrt{\text{DIM}}}{fs} \quad (12)$$

Sendo o meio homogêneo, o método DWG é constituído de elementos lineares bidirecionais com caráter unitário, tem-se nas Eqs. (13) e (14) a pressão sonora em um instante temporal n em função das pressões sonoras no instante temporal $n - 1$.

$$P_{\text{atual}}^{\text{Posterior}}(n) = P_{\text{Posterior}}^{\text{Anterior}}(n - 1) \quad (13)$$

$$P_{\text{atual}}^{\text{Anterior}}(n) = P_{\text{Anterior}}^{\text{Posterior}}(n - 1) \quad (14)$$

A Fig. 11 representa conjunto da malha unidimensional, de modo a ter todos as guias de ondas e as juntas de dispersão.

Figura 11 – Malha unidimensional do método DWG (As caixas representam os nós da malha vizinha).

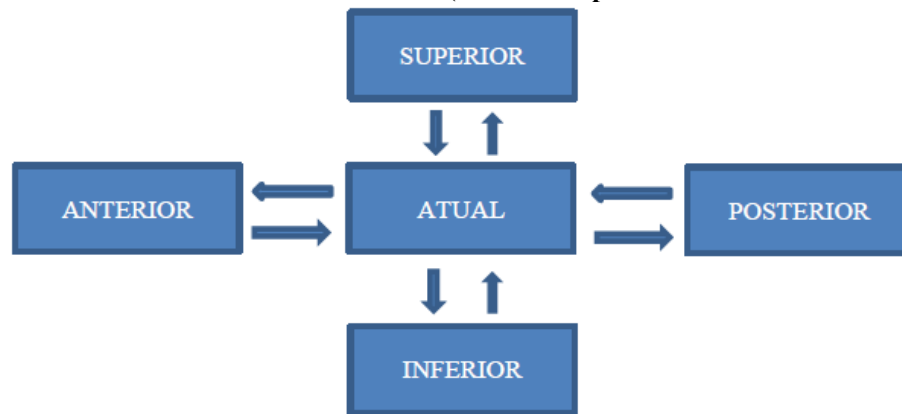


Fonte: Próprio autor.

3.5.2.2 MALHA BIDIMENSIONAL

O caminho mais simples de formar malhas bidimensionais está na superposição de duas guias regularmente espaçadas e formando ângulo reto entre elas (VAN DUYNE e SMITH III, 1993), Para análise bidimensional, optou-se pela malha quadrada (SDWG – originalmente Square Digital Waveguide), tendo a Fig. 12 para representar conjunto da malha bidimensional, contendo todos as guias de ondas e as juntas de dispersão.

Figura 12 – Malha bidimensional do método DWG (As caixas representam os nós da malha vizinha).



Fonte: Próprio autor.

Nesse tipo de malha bidimensional, cada nó é conectado por 4 juntas de dispersão vizinhas via dois atrasos temporais bidirecionais ao longo do eixo X e eixo Y (Campos, 2006). Na Fig. 12, os nós da malha são representados por caixas e devido a bidirecionalidade do método DWG, a presença do duplo sentido das setas.

Sendo o meio homogêneo, o método DWG é constituído de elementos lineares bidirecionais com caráter unitário, tem-se nas Eqs. (15) a (18) a pressão sonora em um instante temporal n em função das pressões sonoras no instante temporal $n - 1$.

$$p_{atual}^{Superior}(n) = p_{Superior}^{Inferior}(n - 1) \quad (15)$$

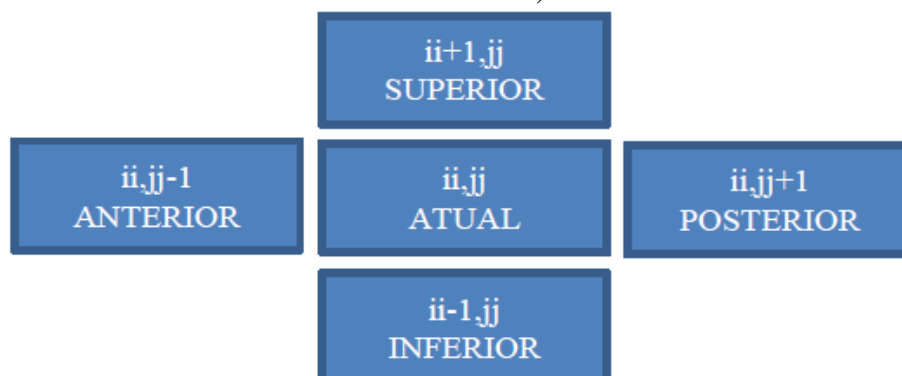
$$p_{atual}^{Posterior}(n) = p_{Posterior}^{Anterior}(n - 1) \quad (16)$$

$$p_{atual}^{Inferior}(n) = p_{Inferior}^{Superior}(n - 1) \quad (17)$$

$$p_{atual}^{Anterior}(n) = p_{Anterior}^{Posterior}(n - 1) \quad (18)$$

O Fig. 13 apresenta de forma esquemática o posicionamento dos nós no interior da malha quadrada do método de Guia de Ondas Digitais.

Figura 13 – Desenho esquemático do posicionamento dos nós na malha SDWG (As caixas representam a malha vizinha).



Fonte: Próprio autor.

Na Fig. 13, ii representa a posição atual das abcissas no eixo cartesiano e jj representa a posição atual das ordenadas. As derivações com “+1” ou “-1”

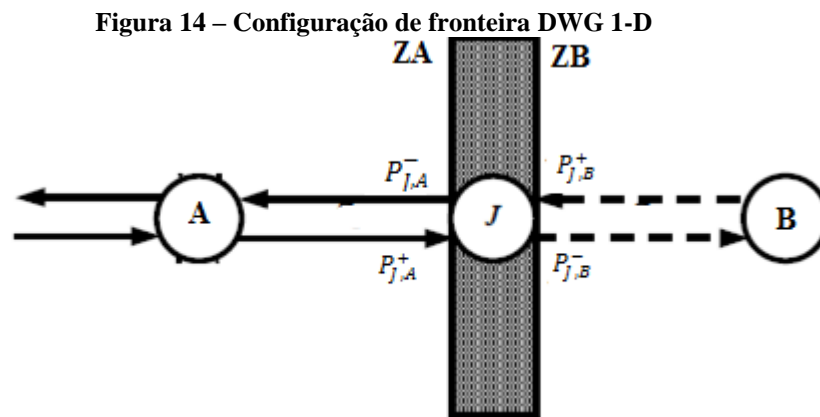
representam as posições vizinhas (SUPERIOR, POSTERIOR, INFERIOR, ANTERIOR).

O método DWG bidimensional (2-D) apresenta equações similares as Eqs. (10) e (12). Nota-se que por se tratar da situação 2-D, há espaçamento entre os nós da malha no eixo das abcissas (dx) e das ordenadas (dy) e estas podem ser contempladas pela Eq. (12). Além disto, DIM é igual a 2 na situação bidimensional, devido às direções da disposição dos nós na malha SDWG.

3.6 FRONTEIRAS UNIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL

3.6.1 FRONTEIRAS PARA A SITUAÇÃO UNIDIMENSIONAL

Considera-se a guia de ondas 1-D, no caso mais simples, que a condição de fronteira é derivada usando uma junção de limite J conectada a uma única junção vizinha B, como ilustrado na Fig. 14.



Fonte: Modificado de Murphy e Mullen, 2002.

Na Fig. 14, apresenta os termos $P_{J,A}^+$, $P_{J,A}^-$, $P_{J,B}^-$ e $P_{J,B}^+$ que expressam respectivamente a pressão sonora de incidência da onda do meio A na junta J, pressão sonora de refletida da onda do meio A na junta J, pressão sonora de incidência da onda da junta J para o meio B e pressão sonora de incidência da onda do meio B para a junta J.

A junção vizinha atua apenas para absorver energia do sistema após a reflexão na junção J e sua saída é forçada a zero, portanto $P_{J,B}^+ = 0$. Neste caso, a impedância característica na guia de ondas conectando a junção limite à junção simulada é ZB e a impedância na guia de ondas conectando a junção limite ao restante é ZA. A condição de absorção de contorno é controlada por um coeficiente de reflexão R, definido pela Eq. (8)

Dado que $P_{J,B}^+ = 0$, a partir da junção vizinha B e realizando ajustes algébricos com a Eq.(11) tem-se que a pressão sonora para a junção da fronteira pode ser calculada como uma função da pressão sonora das ondas incidentes dependendo de tempos anteriores (n-1 e n-2), dado pela Eq.(19) ou Eq.(20)

$$P_J = (1 + R) \cdot P_{J,1}^+ \quad (19)$$

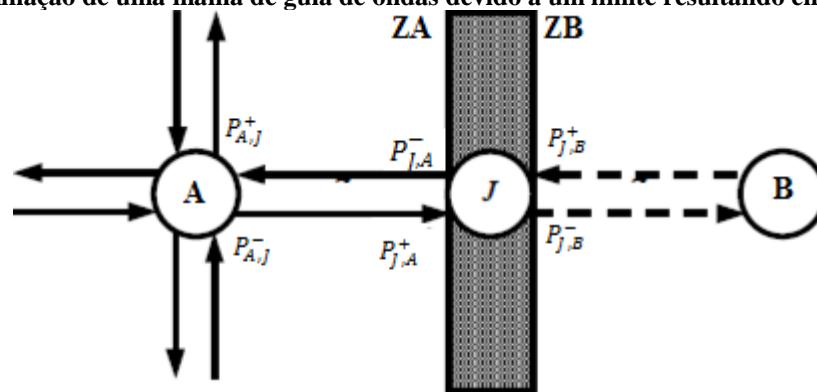
$$P_J = (1 + R) \cdot P_1(n - 1) - R \cdot P_J(n - 2) \quad (20)$$

Definir $R = 1$ ($Z_B = \infty$) resulta em reflexão total na fronteira e a fase das ondas de entrada é preservada, modelando efetivamente uma fronteira fixa. Definir $R = -1$ ($Z_B = 0$) resulta em reflexão de inversão de fase total no limite, modelando um limite livre (como a borda de uma haste de vibração não fixada, por exemplo). Os valores de R estabelecidos entre esses dois extremos resultam em absorção parcial no limite, com valores positivos resultando em preservação de fase e valores negativos resultando em reversão de fase. A absorção total é alcançada no limite configurando $R = 0$.

3.6.2 FRONTEIRAS PARA A SITUAÇÃO BIDIMENSIONAL

No limite de uma estrutura de malha ocorre uma interação entre a junção de terminação (geralmente no próprio limite ou no próprio limite) e seu vizinho imediato (dentro do corpo principal da estrutura de malha). Em geral, uma junção de fronteira é definida como tendo apenas um outro vizinho - a interação só é permitida entre a junção limite e junções dentro da malha, com junções adjacentes situadas no limite que não têm influência direta uma sobre a outra. O efeito de um limite em uma sala real é produzir uma reflexão de uma onda sonora incidente, geralmente com alguma absorção dependente de frequência da energia da onda no próprio limite. Em uma estrutura de guia de onda digital, uma reflexão é causada por uma mudança na impedância do guia de onda. Isso pode ser conceituado conectando-se uma junção simulada no outro lado da junção limite, essencialmente dentro do próprio limite, como na Fig.1. Os guias de onda de conexão em ambos os lados do limite terão diferentes impedâncias características, Z_A e Z_B , respectivamente.

Figura 15 – Terminação de uma malha de guia de ondas devido a um limite resultando em uma reflexão.



Fonte: Modificado de Murphy e Mullen, 2002.

Uma indicação do comportamento de uma estrutura de malha particular e seus limites associados pode ser obtida tentando-se modelar condições anecóicas, já que toda a energia de onda de propagação dentro da malha deve ser absorvida conforme ela chega ao limite. Um limite anecóico ideal (seja o material físico real ou o equivalente modelado computacionalmente) é projetado para simular a radiação de campo livre de modo que o meio acústico se estenda ao infinito, sendo idealmente transparente para todas as ondas acústicas incidentes (Murphy e Mullen, 2002).

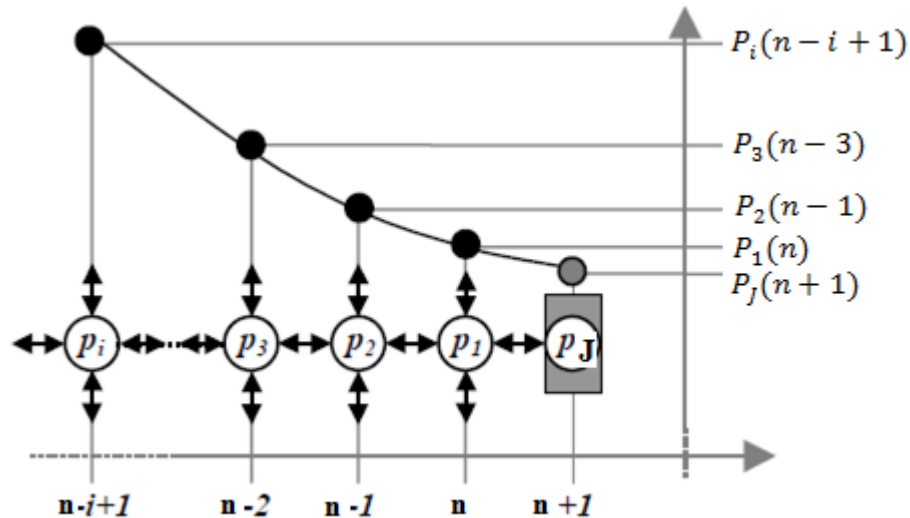
Segundo Murphy, Newton e Howard (2001) é impraticável modelar numericamente um limite anecóico ao longo das mesmas linhas em que são construídos fisicamente. Diante disso, um domínio deve ser definido de tal forma que a propagação numérica de ondas em todas as direções possa ser modelada com sucesso, juntamente com uma condição de contorno que permita a propagação

externa dessa onda simulada como se o domínio computacional fosse uma extensão infinita. Esse limite também deve suprimir reflexões da onda de saída, algo que os limites atualmente implementados não são capazes de alcançar (Murphy, Newton e Howard, 2001). Um esforço considerável foi gasto examinando este problema eletrodinâmica computacional (Tavlove, 1995) e esses tipos de condições de contorno são geralmente denominadas Condições de Limite Absorvedoras (ABCs – originalmente Absorbers Boundaries Condition). Os problemas nessa área geralmente fazem uso de uma solução algorítmica de diferenças finitas para as equações de onda de Maxwell no domínio interior. Como a malha digital de guia de ondas tem uma formulação equivalente de diferenças finitas, é apropriado procurar soluções ABC adequadas a partir desta área de assunto relacionada. Um desses métodos usados em um contexto acústico, faz uso de uma expansão da série de Taylor sobre a junção de fronteira, e foi implementado com sucesso para modelar a extremidade aberta do trato vocal (El-Masri et al, 1996).

- **Série de Taylor ABC**

Considerando uma junta de limite PB e uma sequência de valores de pressão P_i ($n-i + 1$) para posições de junções P_i ao longo de uma linha reta perpendicular a este limite, sendo ambas equidistantes no tempo e no espaço, como na Fig.16.

Figura 16 – Junção de limite PJ e junções conectadas de P_i com valores de pressão associados a P_i ($n-i + 1$) usados em uma aproximação da Série Taylor para o valor de junção PJ ($n + 1$).



Fonte: Modificado de Murphy e Mullen, 2002.

Uma aproximação para o valor de junção atualizada, $P_J(n + dt)$, é necessária. Tem-se que na Fig.16, como no algoritmo de malha de guia de ondas, assume-se $\Delta t = 1$, desta forma tem-se o conjunto de equações resumidos na Eq. (21)

$$\begin{aligned}
 P_J &= P_J(n - 1) \\
 P_1 &= P_1(n) \\
 P_2 &= P_2(n - 1) \\
 P_3 &= P_3(n - 2) \\
 P_i &= P_i(n - i + 1)
 \end{aligned} \tag{21}$$

Assumindo que a função definida por esses pontos da Fig.15 é contínua, e como o valor $P_1(t)$ é conhecido (calculado no interior do domínio da malha) então é possível aproximar o ponto $P_B(t + 1)$ como uma expansão da série de Taylor. Usando esta expressão da série de Taylor, é possível derivar o valor de pressão em PB em termos dos valores de pressão P_i para o tempo $t = t+1$ com ordens crescentes de precisão: Ordem 0 – Eq.(22); Ordem 1 – Eq.(23); Ordem 2 – Eq.(24); Ordem 3- Eq.(25).

$$P_J(n + 1)_0 = P_1(n) \quad (22)$$

$$P_J(t + 1)_1 = P_J(n + 1)_0 + \nabla^1 P_1 = 2P_1(n) - P_2(n - 1) \quad (23)$$

$$P_J(n + 1)_2 = P_J(n + 1)_1 + \frac{1}{2} \nabla^2 P_1 = \frac{5}{2} P_1(n) - 2P_2(n - 1) + \frac{1}{2} P_3(n - 2) \quad (24)$$

$$P_J(t + 1)_3 = P_J(n + 1)_2 + \frac{1}{6} \nabla^3 P_1 = \frac{8}{3} P_1(n) - \frac{5}{2} P_2(n - 1) + P_3(n - 2) - \frac{1}{6} P_4(n - 3) \quad (25)$$

É válido ressaltar que para a Eq.(22), termo de ordem zero, é equivalente à Eq (20) com $R = 0$, sendo o limite anecóico implementado atualmente e, como tal, tem-se um erro considerável com essa implementação na fronteira, fator que deve ser melhorado usando uma solução de ordem superior. Além disto, no caso bidimensional (2-D), há necessidade de implementação nas quatro fronteiras para a situação de um ambiente quadrado.

Capítulo IV

4 METODOLOGIA

Neste capítulo apresentam-se os parâmetros de estudo da malha de guia de ondas digitais. Para tanto, divide-se a análise em unidimensional e bidimensional com suas características geométricas e configurações de simulação. Depois apresentam-se os parâmetros da fonte de excitação e as condições de contorno do problema. Os códigos utilizados para realizar o estudo estão presentes no Apêndice A.

Utiliza-se na acústica duas condições de contorno usualmente: condição de paredes rígidas, onde o coeficiente de reflexão é unitário significando que as ondas incidentes são totalmente refletidas, e a condição de campo livre, onde o coeficiente de reflexão é nulo e o de transmissão unitário significando que as ondas incidentes são transmitidas com sua totalidade entre os meios. No trabalho em questão optou-se por utilização e estudo da condição de contorno de campo livre por demandar menor custo computacional.

Para melhor caracterizar o estudo do método DWG, tem-se a propagação de onda no caso unidimensional em um tubo sonoro aberto e no caso bidimensional a planta baixa de um ambiente fechado. A elaboração do tema deste trabalho partiu da necessidade de continuidade dentro de uma pesquisa anterior num projeto de iniciação científica, em que o cerne do trabalho era modelar e simular o método de guia de ondas digitais.

Para cada implementação de limite, o coeficiente de transmissão T é 1 e coeficiente de reflexão é 0, de modo que nenhuma reflexão de contorno é modelada. As discretizações temporal e espacial ocorrerão conforme as Eqs. (10) e (12), sendo DIM igual a 1 para caso 1 unidimensional e igual a 2 para o caso bidimensional.

4.1 ESTUDO UNIDIMENSIONAL

Será realizado a verificação de um ambiente ausente de reflexão, abordando a compreensão das condições de contorno, além disto análise com utilização da série de Taylor ABC, erros de dispersão na região de fronteira. Conforme elucidado no capítulo III, por se tratar de um ambiente sem reflexão e total transmissão de energia acústica, as impedâncias são iguais ao longo do meio de análise.

Para a análise da utilização da série de Taylor ABC fez-se uso de uma fonte sonora impulsiva de amplitude unitária com frequência de excitação f_a , dada pela Eq. 26, acionada por um determinado intervalo de tempo (t). Já as demais análises fez-se o comparativo com parâmetros analíticos (polinômio analítico de ordem zero) utilizou-se a fonte harmônica. Verifica-se que a diferença da implementação de uma fonte de excitação impulsiva ou harmônica difere no fato de a primeira ter um intervalo de tempo de ocorrência enquanto a segunda não apresenta.

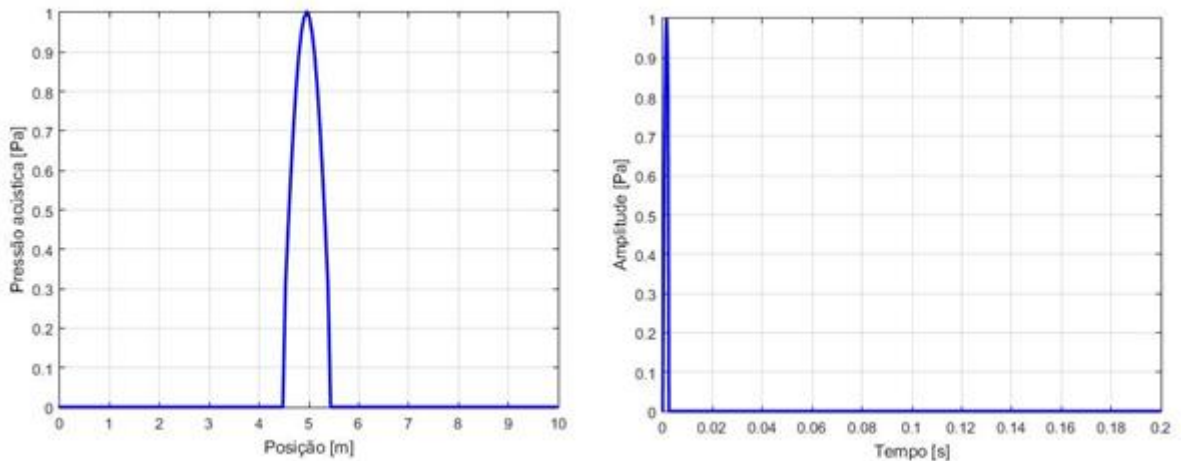
$$P = \text{Amp. sen}(2. f_a. \pi. t) \quad (26)$$

Foram utilizados, para análise 1-D, as frequências para a fonte sonora de 80 Hz, 160 Hz e 320 Hz para 1-D. Estas frequências para a fonte sonora foram escolhidas por apresentarem baixo custo computacional.

No caso 1-D considerou-se que o espaço de simulação é igual a 10 m, onde a fonte de excitação é posicionada no nó central, isto é, a 5 m das fronteiras, conforme

ilustrado na Fig. 17, sendo também possível verificar também o comportamento da fonte de excitação da fonte ao longo do ao tempo com a frequência de 160 Hz.

Figura 17 – Fonte de excitação impulsiva com amplitude unitária (1-D) ao longo do espaço e tempo.



Fonte: Próprio autor.

A frequência de simulação selecionada por definição de atualização temporal (dt) é igual a 3200 Hz, o tempo de simulação igual a 0,2 s e ambiente sem reflexão. A frequência de simulação de 3200 Hz teve sua seleção baseada em parâmetros de visualização, sendo este a relação frequência de simulação por frequência de excitação da fonte de mínimo 10, conforme mencionado por Moura (2005).

4.2 ESTUDO BIDIMENSIONAL

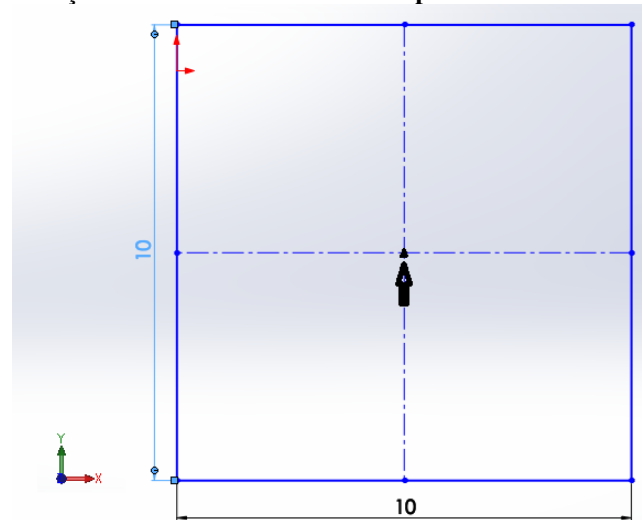
Será realizado alguns estudos quanto do método de guia de ondas digitais em malha quadrada, tendo análise com utilização da série de Taylor ABC, erros de dispersão na região de fronteira.

Para a análise da utilização da série de Taylor ABC fez-se uso de uma fonte sonora impulsiva de amplitude unitária acionada por um determinado intervalo de tempo. Já as demais análises que fez-se o comparativo com parâmetros analíticos (polinômio analítico de ordem zero) utilizou-se a fonte de forma harmônica de forma contínua.

Foram utilizados, neste trabalho, as frequências para a fonte sonora de 80 Hz, 160 Hz, 320 Hz, 480 Hz e 640 Hz para 2-D. Estas frequências para a fonte sonora foram escolhidas para abranger uma faixa considerável de frequência da fala humana. Além do fato, segundo Moura (2005), de ser um método destinado para baixas frequências em vista do custo computacional.

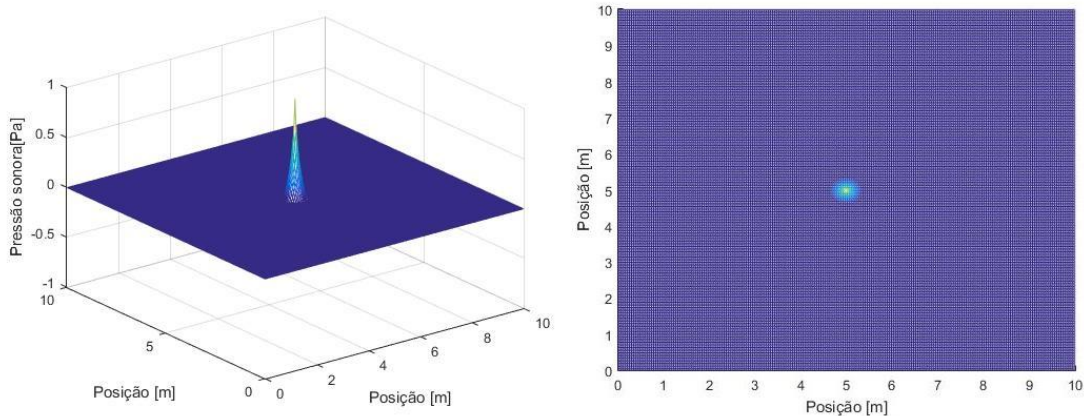
No caso bidimensional, considerou-se que tanto no eixo das abcissas como das ordenadas do plano de simulação, o comprimento é de 10 m, cuja a fonte, também, é posicionada no nó central de ambas as direções, conforme Fig. 18. Na Fig. 19 nota-se a fonte de excitação harmônica com amplitude unitária no ambiente de simulação bidimensional (sala). O tempo de simulação de 0,2 s assemelha à simulação em 1-D, entretanto com frequências de simulação de 3200 Hz e 6400 Hz por definição dado pela atualização temporal (dt), além de ambiente ausente de reflexão.

Figura 18 – Ambiente de simulação bidimensional com cotas e posicionamento da fonte indicado pela seta.



Fonte: Próprio autor.

Figura 19 – Fonte de excitação harmônica com amplitude unitária (2D).



Fonte: Próprio autor,

Para que uma condição de campo livre fosse representada, nenhuma influência do campo reverberante poderia ser notada no conjunto dos pontos amostrados. Por esse motivo, o processo de amostragem foi realizado exclusivamente sobre o conjunto de pontos oriundos da fonte sonora.

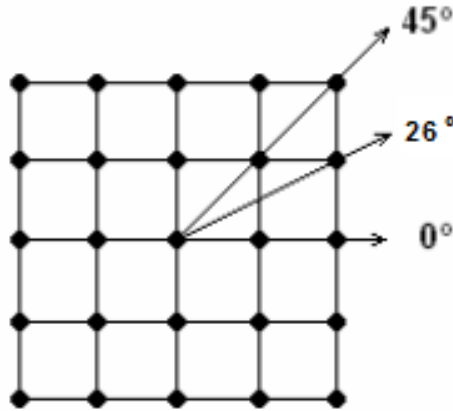
4.3 ERRO DE DISPERSÃO DE FASE E AMPLITUDE

É importante mencionar que as simulações geram uma superfície tridimensional, definida pelas variáveis X , Y e P , sendo P dependente de das ordenadas, abcissas e tempo. Deste modo, a amostragem dos pontos foi realizada em planos perpendiculares ao plano XY , que contenham a fonte sonora, conforme a Fig. 20. Tais planos foram estabelecidos ao longo das direções 0° , 26° e 45° baseados a partir da região central. No caso de 0° é estabelecido que Y é fixo e há a análise ao longo de X , em $26,56^\circ$ tem-se a análise de forma que para cada duas unidades deslocando em X tem-se uma em Y , já em 45° a análise ocorre sendo para cada uma unidade deslocando em X tem-se uma em Y .

A escolha destas direções deve-se a necessidade da compreensão do comportamento da propagação sonora e a influência dos raios sonoros em relação

aos contornos do problema, além da discretização da malha quadrada escolhida para o estudo.

Figura 20 – Planos de amostragem dos valores temporais de pressão (figura ilustrativa).



Fonte: Modificado de Moura,2005.

A utilização dos planos XY nas direções selecionadas terá como base análises na comparação da função analítica com o método de Guia de Ondas Digitais quanto a amplitude e fase (erro de dispersão).

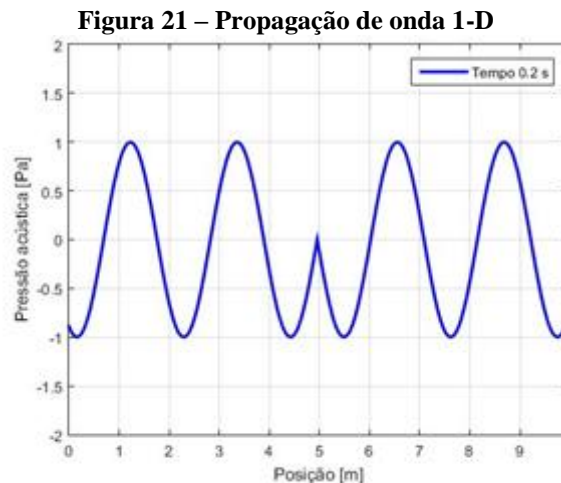
Capítulo V

5 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados da aplicação do método numérico acústico estudado. Dentre as ferramentas empregadas, aplica-se a análise unidimensional (1D) e a bidimensional (2D) para atingir os objetivos de interesse, utiliza-se o software MATLAB 7 em um computador Intel Core i5-2410M, 6GB RAM, 640GB HDD.

5.1 UNIDIMENSIONAL

Na Fig. 21, utilizou-se uma fonte harmônica com amplitude unitária no domínio do espaço estabelecido do capítulo IV para averiguar a condição imposta de ambiente sem reflexão.

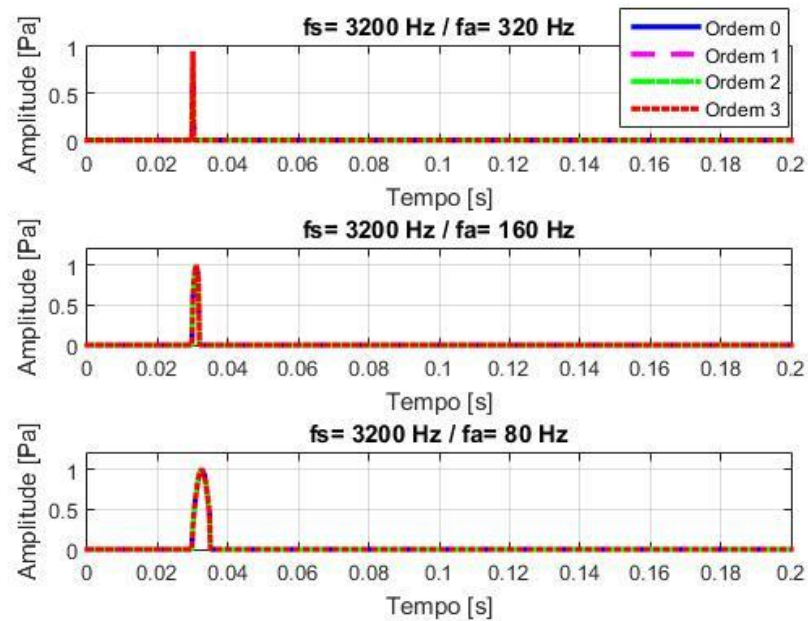


Fonte: Próprio autor.

Verifica-se na Fig. 21 que a propagação da onda ao longo do domínio do espaço nas regiões de fronteira apresenta total transmissão, ou seja ausência de reflexão. Desta forma a condição imposta é validada para o método de Guia de Ondas Digitais.

Na Fig. 22 observa-se a simulação em uma das fronteiras do domínio unidirecional para averiguar a influência da ordem da série de Taylor no método de Guia de Ondas Digitais. Tem-se a excitação com fonte impulsiva no nó central do domínio, ou seja, na posição referente à 5 metros.

Figura 22 – Influência do uso das Ordens de Taylor (1-D).



Fonte: Próprio autor.

Na Fig. 22, tem-se que todas as ordens da série da Taylor se sobrepõe, indicando que é possível obter resultados plausíveis com a menor ordem e conforme o problema abordado com menor custo matemático e computacional.

Identifica-se que independente da frequência de excitação da fonte ou ordem da série de Taylor a pressão sonora após o estímulo é zerada, significando a não existência de erros de dispersão no caso 1-D.

Na condição unidimensional impôs-se um ambiente ausente de reflexão, logo com fronteira transmitindo toda energia acústica, logo não apresentou problemas de contorno.

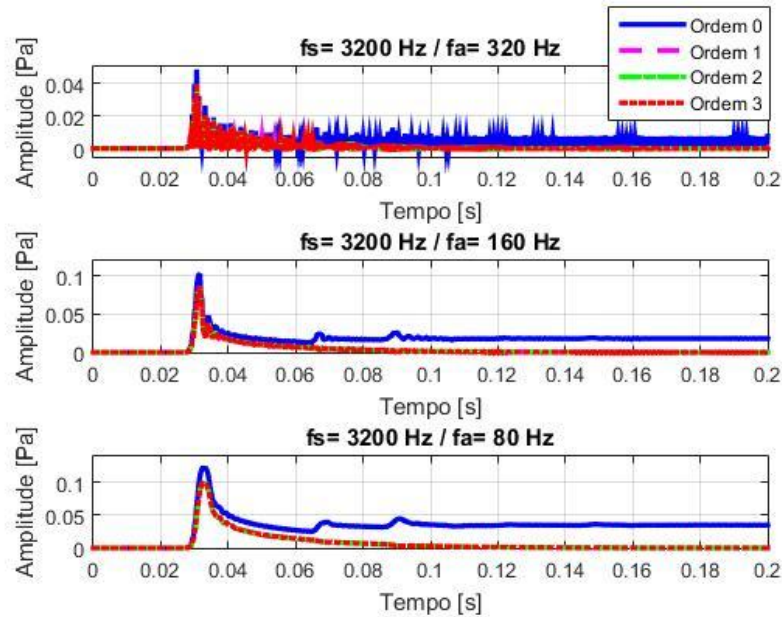
5.2 BIDIMENSIONAL

O segundo problema ocorre na condição bidimensional, sendo a verificação da influência das ordens da série de Taylor no estudo das fronteiras e a existência do erro de dispersão com base no ângulo de incidência da pressão acústica na fronteira. Além disto, os resultados foram submetidos a análises de erros para observar a precisão em relação aos resultados analíticos.

5.2.1 ORDENS DA SÉRIE DE TAYLOR

Na Fig. 23 observa-se a simulação em uma das fronteiras do domínio da malha quadrada.

Figura 23 – Influência do uso das ordens da série de Taylor (2-D).



Fonte: Próprio autor.

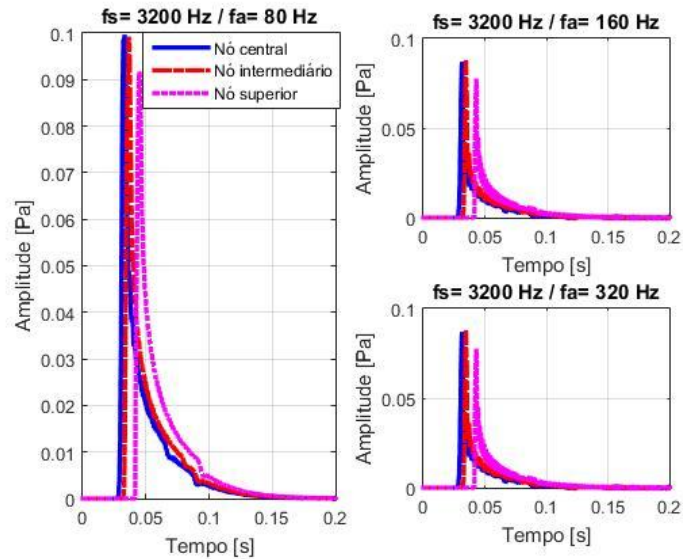
Na Fig. 23 utilizou-se como fonte de excitação uma fonte impulsiva. Nota-se que devido a análise em questão ocorrer na fronteira da malha quadrada, há um intervalo inicial que a pressão na fronteira é zero. Quando a onda sonora encontra a fronteira de análise, verifica-se que a amplitude é menor que a imposta na fonte que pode ser explicada fisicamente pela perda de energia ao longo do espaço.

Nota-se que com a utilização da ordem 0 da série de Taylor no caso 2-D, independente da frequência de excitação da fonte, a pressão sonora após o estímulo não tem tendência a ser reduzida a zero, ou seja, não ocorre de fato a transmissão total. Durante o estudo, também percebeu-se que o mesmo fato ocorre independente da frequência de simulação.

Na Fig. 23, tem-se que a ordem 1 da série da Taylor é sobreposta sobre as de ordem maior, indicando que é possível obter resultados aceitáveis com menor custo matemático e computacional. Desta forma, os demais estudos e resultados tiveram utilização da ordem 1 da série de Taylor.

O aspecto a ser avaliado na Fig. 24 refere-se ao comportamento a onda sonora ao longo do tempo no contorno selecionado (contorno direito ou borda direita do domínio 2-D) com uso de ordem 1 da série de Taylor. Tem-se nesta abordagem que o nó central da fronteira, nó intermediário entre o central e o do vértice da malha, e o nó localizado no vértice da malha quadrada.

Figura 24 – Propagação sonora ao longo da borda.



Fonte: Próprio autor.

Pela Fig. 24, observa-se que inicialmente há um intervalo de tempo até a onda sonora atingir a borda. Após atingir o contorno, há um decaimento da energia/onda sonora. Nota-se também que ao longo da borda, tem-se primeiro que a onda atinge a região central, posteriormente o nó intermediário, por fim a região superior indicando que as ondas sonoras não atingem uma mesma superfície ao mesmo tempo e com a mesma intensidade. Além disso, é possível observar que independente da frequência simulada que a tendência de comportamento é similar.

Este atraso temporal observado ocorre devido a propagação sonora ser circular, ou seja, inicialmente na região central do contorno, depois na parte intermediária e por fim na seção superior. Além disso, a diferença de amplitudes é devido a distância do nó até a fonte sonora, isto é, o nó superior possui o maior raio comparado ao nó central.

5.2.2 ANÁLISE COM AS FREQUÊNCIA DE SIMULAÇÃO

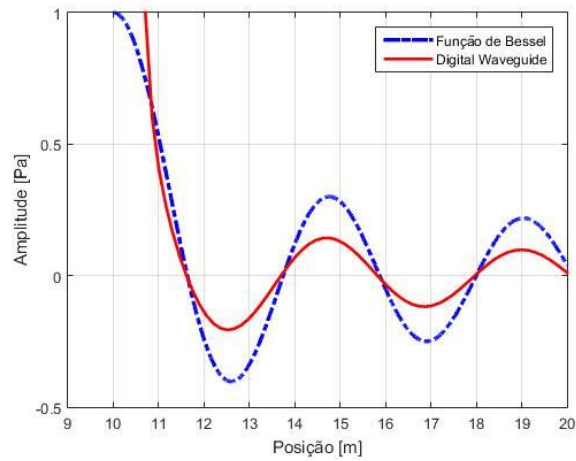
Visando analisar a influência da frequência de excitação da fonte com a frequência de simulação são apresentados a propagação sonora ao longo do espaço para as frequências de 80, 160, 320, 480 e 640 Hz. Para tanto estudam-se duas frequências de simulação 3200 e 6400 Hz. Além disso, deseja-se observar a propagação sonora em três direções 0° , 26° e 45° , para observar o erro de dispersão.

5.2.2.1 ANÁLISE COM FREQUÊNCIA DE SIMULAÇÃO DE 3200 Hz

- **FREQUÊNCIA DE EXCITAÇÃO DA FONTE: 80 Hz**

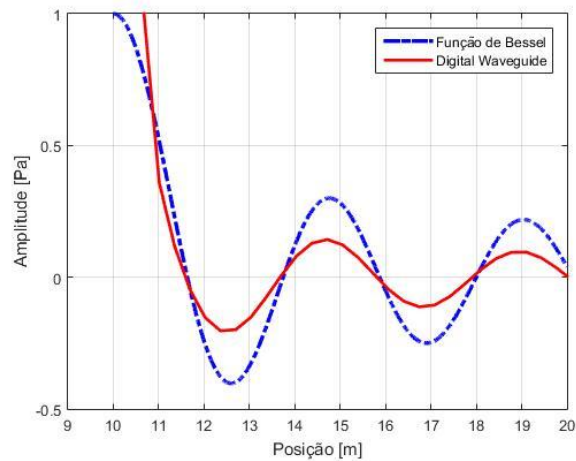
As Figs. 25 a 27 apresentam simulações da pressão sonora em função do espaço.

Figura 25 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 45° - $f_s=3200\text{Hz}/f_a=80\text{Hz}$



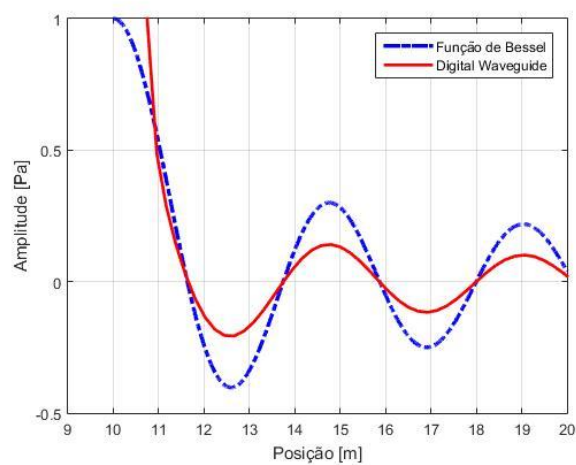
Fonte: Próprio autor.

Figura 26 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 26°/ $f_s=3200\text{Hz}/f_a=80\text{Hz}$



Fonte: Próprio autor.

Figura 27 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 0°/ $f_s=3200\text{Hz}/f_a=80\text{Hz}$



Fonte: Próprio autor.

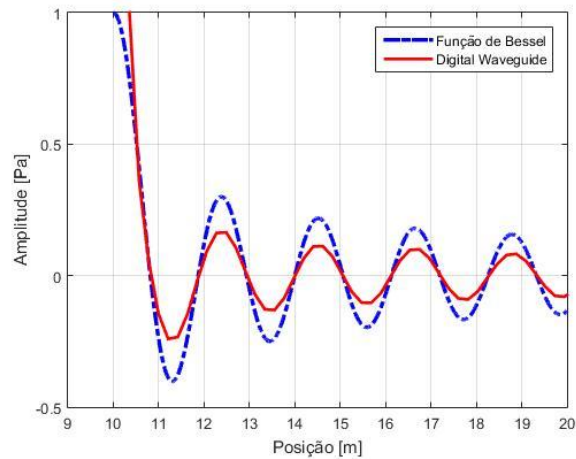
Nota-se nas Figs. 25 a 27 que a propagação sonora analítica e numérica não possuem erro de fase ou atraso temporal entre os picos e vales, porém aponta-se

diferença na amplitude da onda sonora. Adiciona-se que tais observações independem da direção de análise da propagação sonora.

- **FREQUÊNCIA DE EXCITAÇÃO DA FONTE: 160 Hz**

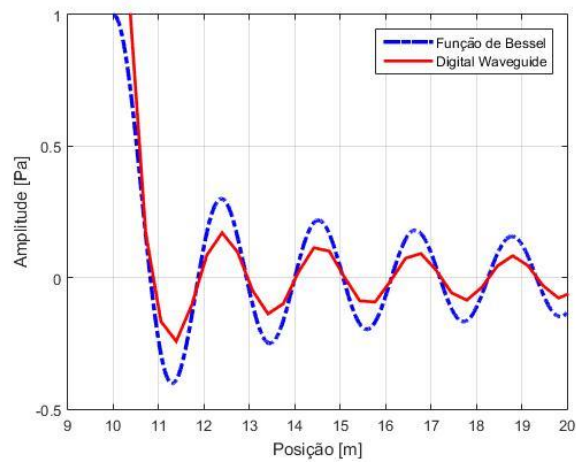
As Fig. 28 a 30 apresentam simulações da pressão sonora em função do espaço.

Figura 28 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 45° /fs=3200Hz/fa=160Hz



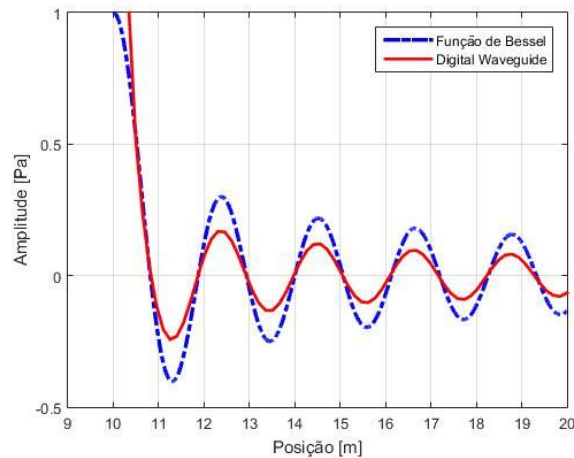
Fonte: Próprio autor,

Figura 29 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 26° - fs=3200Hz/fa=160Hz



Fonte: Próprio autor,

Figura 30 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 0° - $f_s=3200\text{Hz}/f_a=160\text{Hz}$



Fonte: Próprio autor,

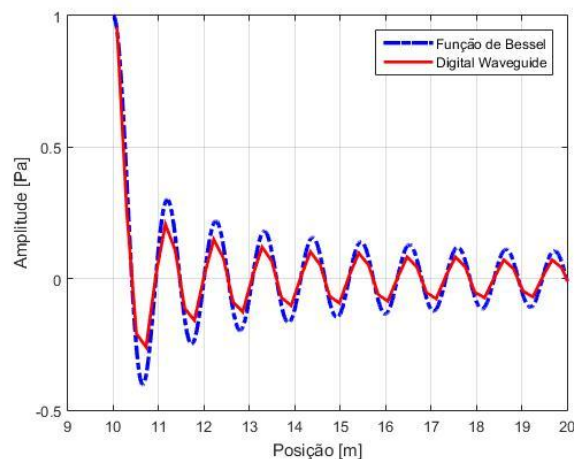
Nota-se nas Figs. 28 a 30 que a propagação sonora analítica e numérica não possuem erro de fase ou atraso temporal entre os picos e vales, porém aponta-se diferença na amplitude da onda sonora, independente da direção de análise da propagação sonora.

Através da análise das figuras que a quantidade de pontos para 0° permite visualização completa das ondas de forma suave, ou seja, relação entre frequência de simulação e de excitação da fonte é maior que 10. Em 45° esta suavização já não é tão evidente, e com 26° verifica-se a refinamento na modelagem.

- **FREQUÊNCIA DE EXCITAÇÃO DA FONTE: 320 Hz**

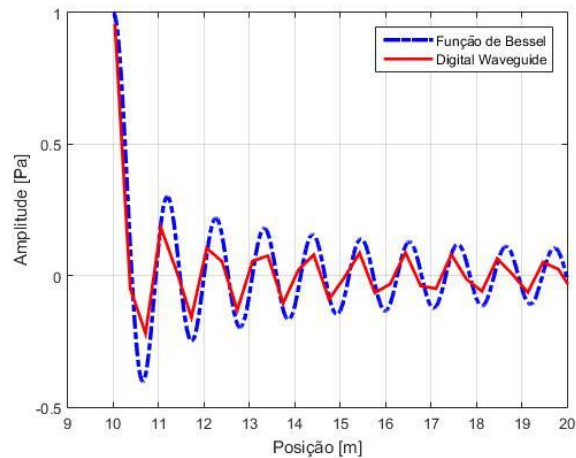
As Fig. 31 a 33 apresentam simulações da pressão sonora em função do espaço.

Figura 31 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 45° - $f_s=3200\text{Hz}/f_a=320\text{Hz}$



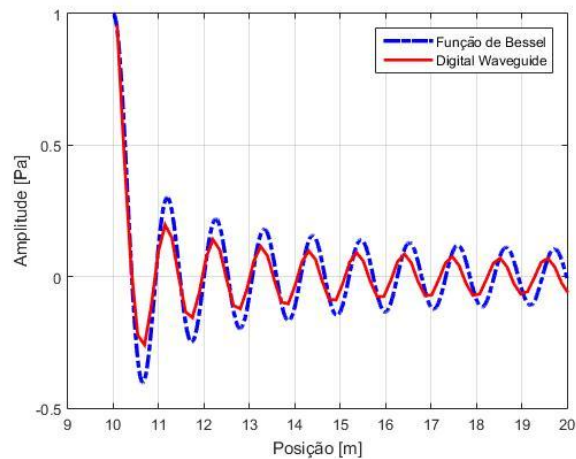
Fonte: Próprio autor.

Figura 32 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 26° /fs=3200Hz/fa=320Hz



Fonte: Próprio autor.

Figura 33 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 0° - fs=3200Hz/fa=320Hz



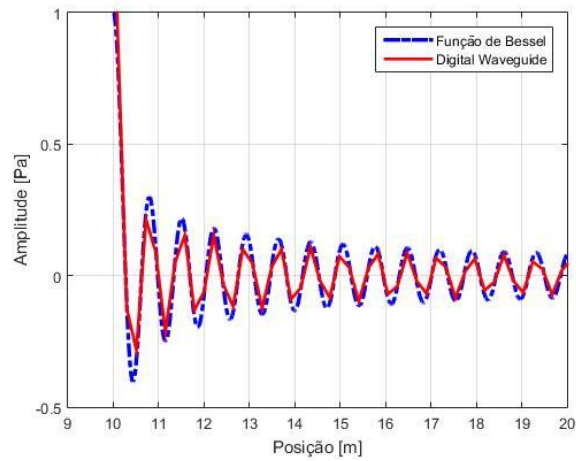
Fonte: Próprio autor,

Nota-se através da análise das Figs. 31 a 33 que a modelagem apresenta a relação frequência de simulação sobre frequência de excitação da fonte no limite de modo a apresentar ondas não suavizadas. Observa-se também que para a frequência simulada, pequeno erro de fase na direção de 45° , entretanto expressivo erro de fase ou atraso temporal entre os picos e vales com 26° e 0° na análise comparativa com o método DWG e a função analítica (Bessel). Além disto, percebe-se que diferença na amplitude da onda sonora, independente da direção de análise da propagação sonora.

- **FREQÜÊNCIA DE EXCITAÇÃO DA FONTE: 480 Hz**

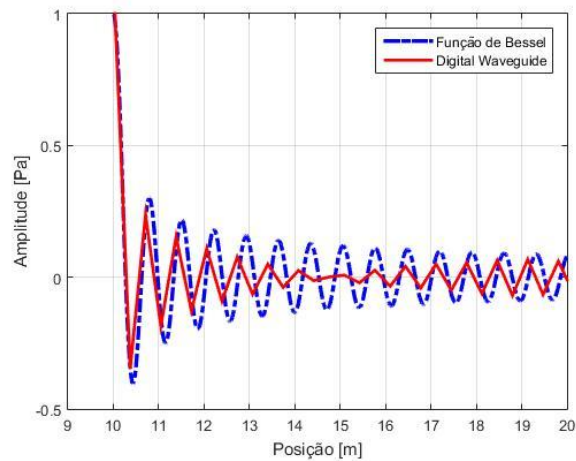
As Fig. 34 a 36 apresentam simulações da pressão sonora em função do espaço.

Figura 34 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 45° - $f_s=3200\text{Hz}/f_a=480\text{Hz}$



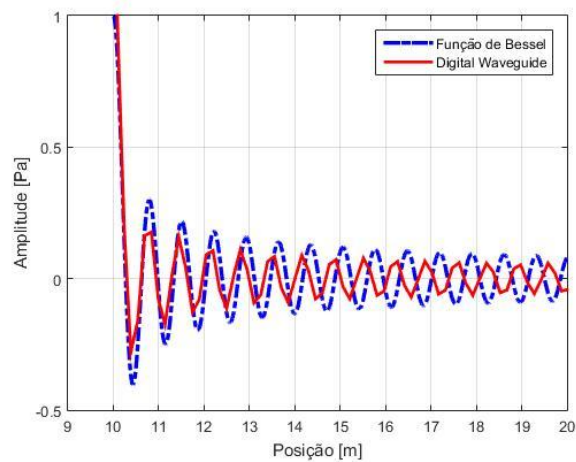
Fonte: Próprio autor.

Figura 35 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 26° - $f_s=3200\text{Hz}/f_a=480\text{Hz}$



Fonte: Próprio autor.

Figura 36 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 0° - $f_s=3200\text{Hz}/f_a=480\text{Hz}$



Fonte: Próprio autor,

Nota-se através da análise das Figs. 34 a 36 que a modelagem apresenta relação de frequência de simulação sobre frequência de excitação da fonte menor que 10, apresentando desta forma ondas não suavizadas. Observa-se também que para a

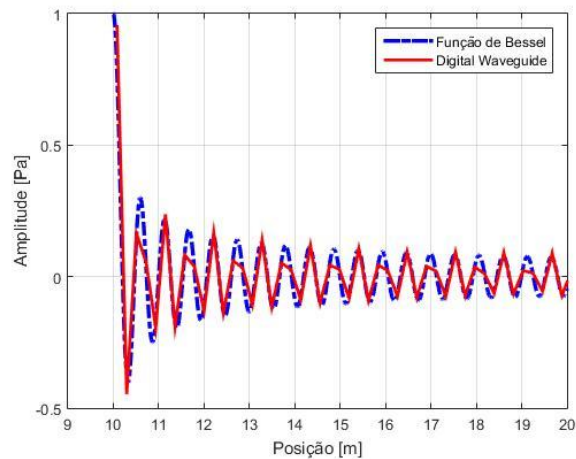
frequência simulada, pequeno erro de fase com a direção de 45° , entretanto expressivo erro de fase ou atraso temporal entre os picos e vales com 26° e 0° na análise comparativa com o método DWG e a função analítica (Bessel).

Além disto, percebe-se que diferença na amplitude da onda sonora, independente da direção de análise da propagação sonora.

- **FREQUÊNCIA DE EXCITAÇÃO DA FONTE: 640 Hz**

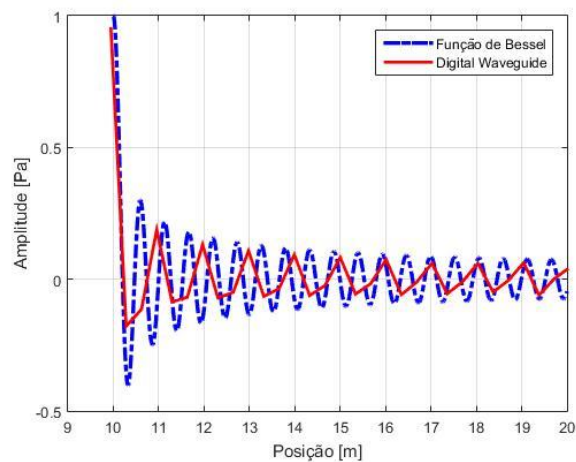
As Fig. 37 a 39 apresentam simulações da pressão sonora em função do espaço.

Figura 37 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 45° - $f_s=3200\text{Hz}/f_a=640\text{Hz}$



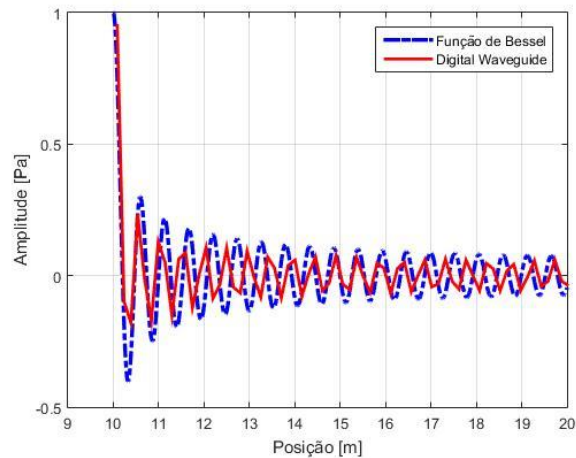
Fonte: Próprio autor.

Figura 38 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 26° - $f_s=3200\text{Hz}/f_a=640\text{Hz}$



Fonte: Próprio autor.

Figura 39 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 0° - $f_s=3200\text{Hz}/f_a=640\text{Hz}$



Fonte: Próprio autor.

Nota-se através da análise das Figs. 37 a 39 que a modelagem apresenta relação de frequência de simulação sobre frequência de excitação da fonte menor que 10, apresentando desta forma ondas não suavizadas, semelhante ao que ocorre com 480 Hz. Observa-se também que para a frequência simulada, pequeno erro de fase na direção de 45°, entretanto expressivo erro de fase ou atraso temporal entre os picos e vales com 26° e 0° na análise comparativa com o método DWG e a função analítica (Bessel).

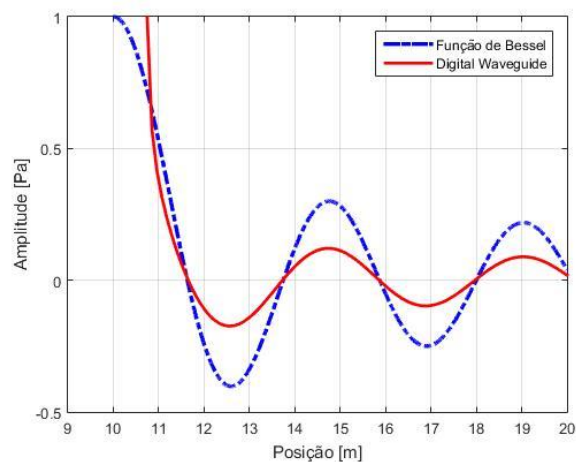
Além disto, percebe-se que diferença na amplitude da onda sonora, independente da direção de análise da propagação sonora.

5.2.2.2 ANÁLISE COM FREQUÊNCIA DE SIMULAÇÃO DE 6400 Hz

- **FREQUÊNCIA DE EXCITAÇÃO DA FONTE: 80 Hz**

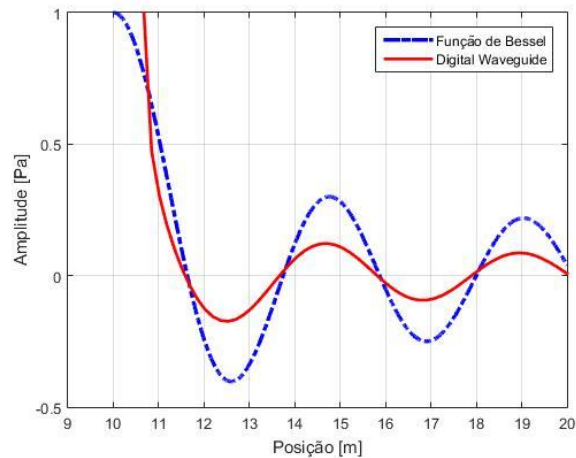
As Fig. 40 a 42 apresentam simulações da pressão sonora em função do espaço.

Figura 40 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 45° - $f_s=6400\text{Hz}/f_a=80\text{Hz}$



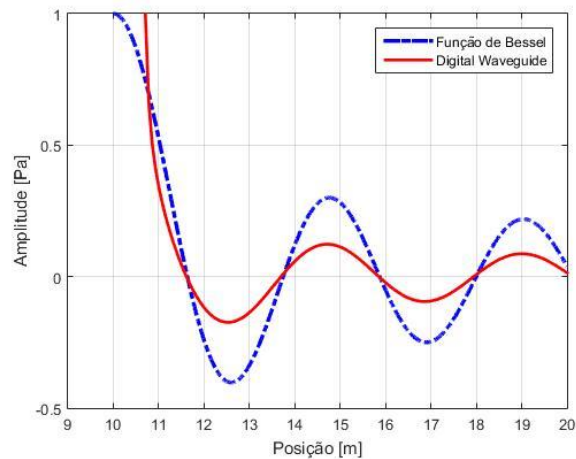
Fonte: Próprio autor.

Figura 41 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 26° - $f_s=6400\text{Hz}/f_a=80\text{Hz}$



Fonte: Próprio autor.

Figura 42 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 0° - $f_s=6400\text{Hz}/f_a=80\text{Hz}$



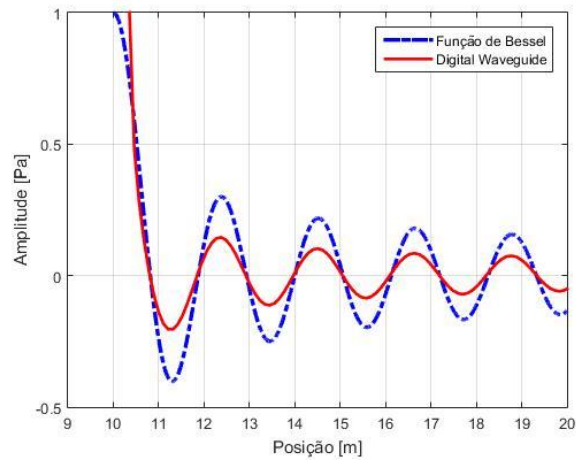
Fonte: Próprio autor.

Nota-se nas Figs. 40 a 42 que a propagação sonora analítica e numérica não possuem erro de fase ou atraso temporal entre os picos e vales, porém aponta-se diferença na amplitude da onda sonora. Adiciona-se que tais observações independem da direção de análise da propagação sonora. Através da análise das Figs. 40 a 42 percebe-se que a quantidade de pontos para a simulação permite visualização completa das ondas de forma suave, ou seja, relação frequência de simulação sobre frequência de excitação é maior que 10.

- **FREQUÊNCIA DE EXCITAÇÃO DA FONTE: 160 Hz**

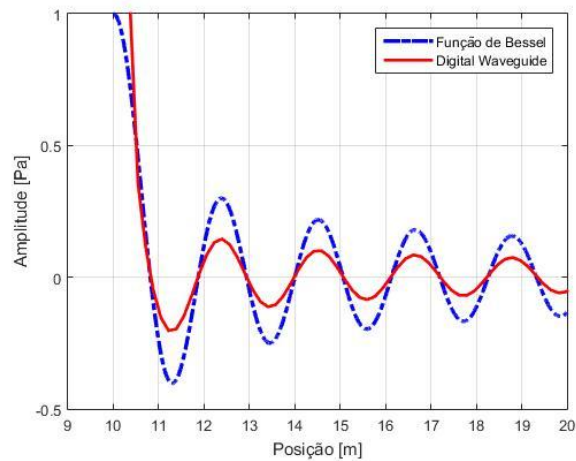
As Fig. 43 a 45 apresentam simulações da pressão sonora em função do espaço.

Figura 43 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 45° - $f_s=6400\text{Hz}/f_a=160\text{Hz}$



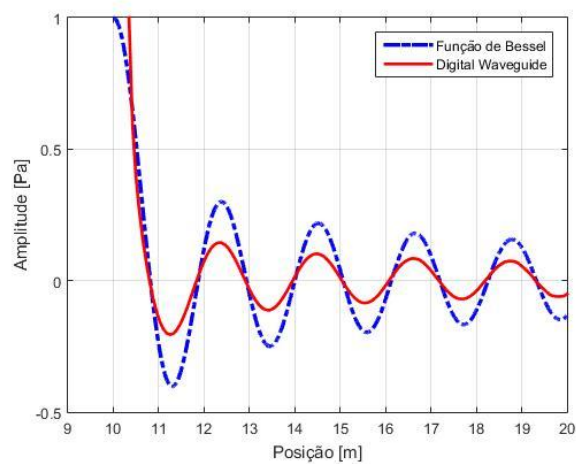
Fonte: Próprio autor.

Figura 44 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 26° - $f_s=6400\text{Hz}/f_a=160\text{Hz}$



Fonte: Próprio autor.

Figura 45 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 0° - $f_s=6400\text{Hz}/f_a=160\text{Hz}$



Fonte: Próprio autor.

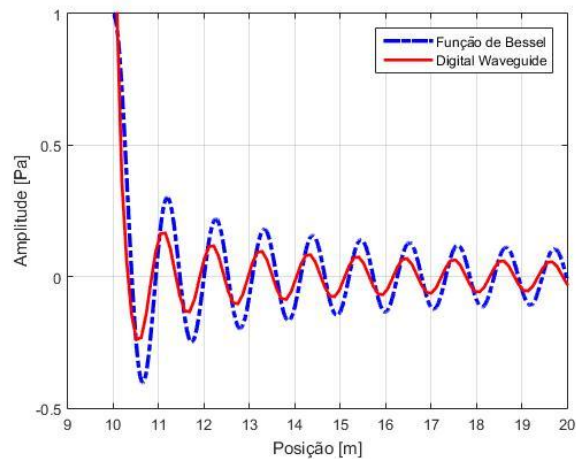
Nota-se nas Figs. 43 a 45 que a propagação sonora analítica e numérica não possuem erro de fase ou atraso temporal entre os picos e vales independente do

ângulo de análise, porém aponta-se diferença na amplitude da onda sonora assim como ocorre para simulação com a frequência de excitação da fonte de 80 Hz.

- **FREQUÊNCIA DE EXCITAÇÃO DA FONTE: 320 Hz**

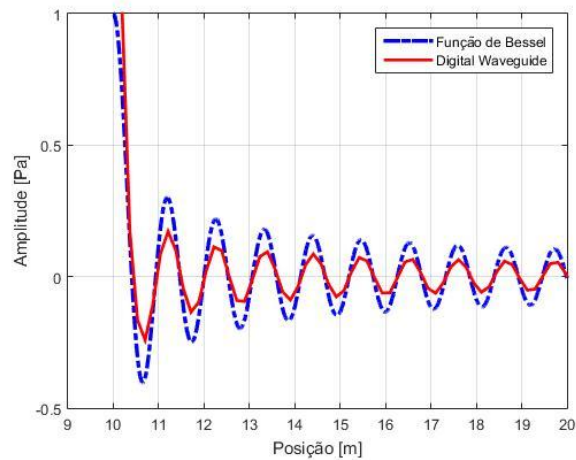
As Fig. 46 a 48 apresentam simulações da pressão sonora em função do espaço.

Figura 46 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 45° - $f_s=6400\text{Hz}/f_a=320\text{Hz}$



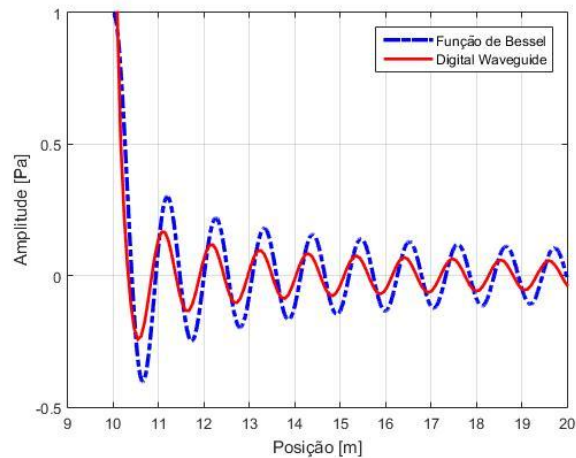
Fonte: Próprio autor.

Figura 47 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 26° - $f_s=6400\text{Hz}/f_a=320\text{Hz}$



Fonte: Próprio autor.

Figura 48 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 0° - $f_s=6400\text{Hz}/f_a=320\text{Hz}$



Fonte: Próprio autor.

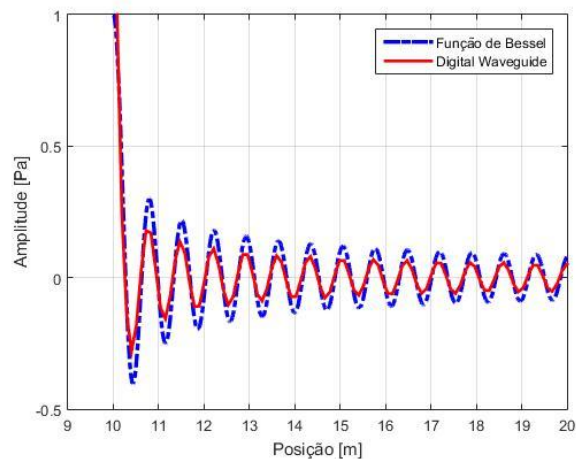
Nota-se através da análise das Figs. 46 a 48 que a modelagem apresenta relação de frequência de simulação sobre frequência de excitação da fonte maior que 10, apresentando desta forma ondas suavizadas. Observa-se também que para a frequência simulada que não há erro de fase na direção de 45°, entretanto expressivo erro de fase ou atraso temporal entre os picos e vales com 26° e 0° na análise comparativa com o método DWG e a função analítica (Bessel).

Além disto, percebe-se que diferença na amplitude da onda sonora, independente da direção de análise da propagação sonora.

- **FREQUÊNCIA DE EXCITAÇÃO DA FONTE: 480 Hz**

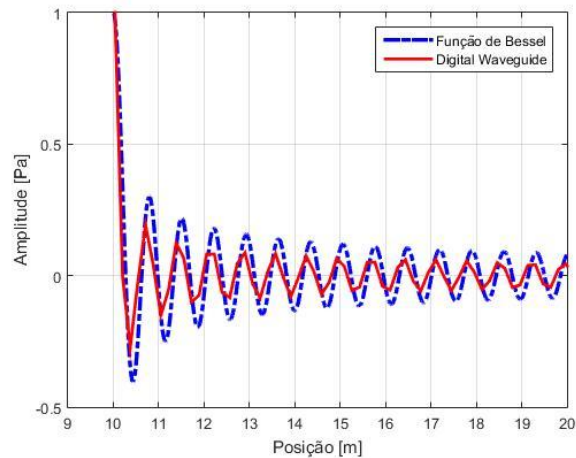
As Fig. 49 a 51 apresentam simulações da pressão sonora em função do espaço.

Figura 49 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 45° - $f_s=6400\text{Hz}/f_a=480\text{Hz}$



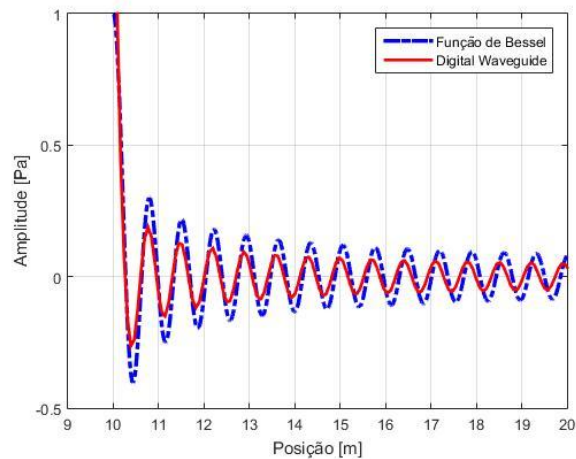
Fonte: Próprio autor.

Figura 50 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 26° - $f_s=6400\text{Hz}/f_a=480\text{Hz}$



Fonte: Próprio autor.

Figura 51 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 0° - $f_s=6400\text{Hz}/f_a=480\text{Hz}$



Fonte: Próprio autor.

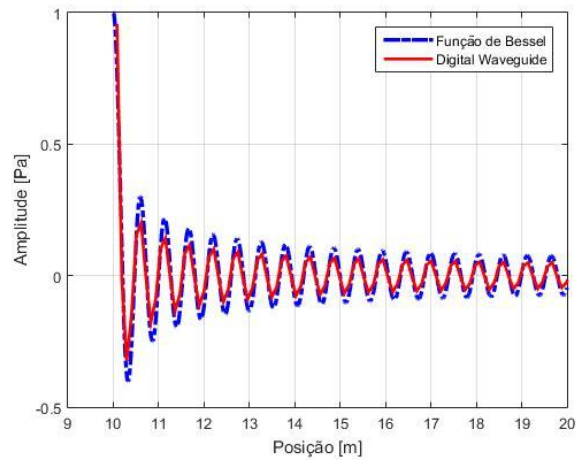
Nota-se através da análise das Figs. 49 a 51 a quantidade de pontos da modelagem para 0° e 45° permite visualização completa das ondas de forma suave, ou seja, frequência de simulação é no mínimo 10 vezes maior que a frequência de excitação da fonte, entretanto para 26° isto não ocorre. Observa-se também que para a frequência simulada que há pequeno erro de fase na direção de 45°, entretanto expressivo erro de fase ou atraso temporal entre os picos e vales com 26° e 0° na análise comparativa com o método DWG e a função analítica (Bessel).

Além disto, percebe-se que diferença na amplitude da onda sonora, independente da direção de análise da propagação sonora.

- **FREQUÊNCIA DE EXCITAÇÃO DA FONTE: 640 Hz**

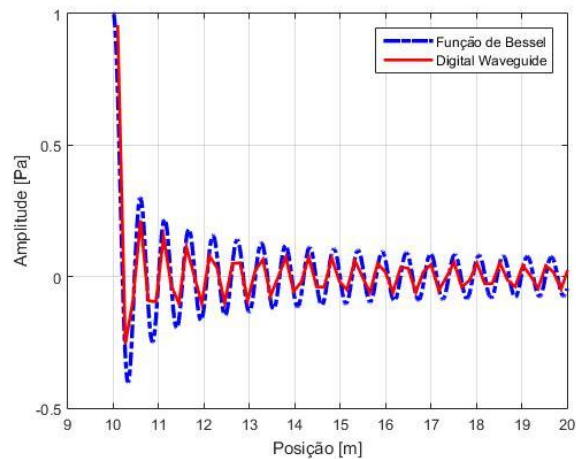
As Fig. 52 a 54 apresentam simulações da pressão sonora em função do espaço.

Figura 52 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 45° - $f_s=6400\text{Hz}/f_a=640\text{Hz}$



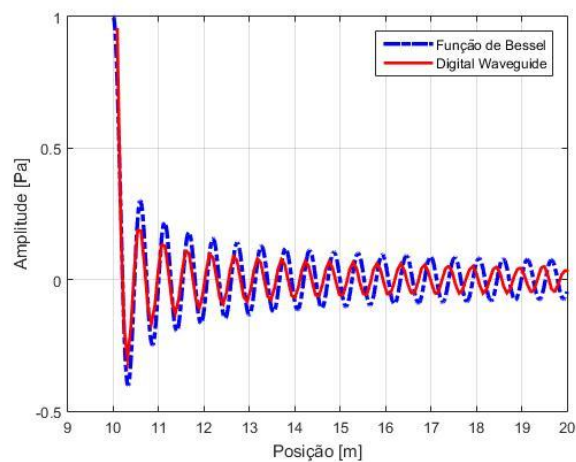
Fonte: Próprio autor.

Figura 53 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 26° - $f_s=6400\text{Hz}/f_a=480\text{Hz}$



Fonte: Próprio autor.

Figura 54 – Comparativo entre Função Analítica e DWG - 0° - $f_s=6400\text{Hz}/f_a=640\text{Hz}$



Fonte: Próprio autor.

Nota-se através da análise das Figs. 52 a 54 que a modelagem apresenta a relação frequência de simulação sobre frequência de excitação da fonte no limite de modo a apresentar ondas não suavizadas. Observa-se também que para a frequência

simulada que há pequeno erro de fase na direção de 45°, entretanto expressivo erro de fase ou atraso temporal entre os picos e vales com 26° e 0° na análise comparativa com o método DWG e a função analítica.

Além disto, percebe-se que diferença na amplitude da onda sonora, independente da direção de análise da propagação sonora.

5.3 QUANTIFICAÇÃO DO ERRO DE DISPERSÃO

As Tabs. 1 e 2 apresentam as médias das frequências de simulação e de excitação da fonte ao longo das direções de propagação sonora programadas utilizadas, acompanhado da real frequência da fonte devido a existência ou não do erro de dispersão. No Apêndice B, estão dispostos todos os valores de frequência coletados para cada erro de fase e amplitude.

Na Tab.1 verifica-se que a utilização da frequência de simulação de 3200 Hz e a variação das frequências de excitação da fonte ao longo das direções de propagação sonora.

Tabela 1 – Direções preferenciais baseado nas frequências de simulação de 3200 Hz e algumas frequências de excitação da fonte sonora.

Simulação	Fonte	0°	26°	45°
3200 Hz	640 Hz	714,56 Hz	337,32 Hz	661,37 Hz
	480 Hz	513,48 Hz	493,89 Hz	488,87 Hz
	320 Hz	323,25 Hz	318,58 Hz	320,01 Hz
	160 Hz	158,03 Hz	162,63 Hz	160,00 Hz
	80 Hz	80,81 Hz	80,00 Hz	79,67 Hz

Fonte: Próprio autor.

Nota-se que para relações de frequência de simulação sobre frequência de excitação da fonte maiores ou igual a 10 há aumento significativo do erro de dispersão. Verifica-se também que a direção de propagação acústica preferencial ocorre à 45°, visto que as frequências encontradas aproximam de fato da frequência de excitação da fonte (menores erros de dispersão).

Na Tab.2 verifica-se que a utilização da frequência de simulação de 6400 Hz e a variação das frequências de excitação da fonte ao longo das direções de propagação sonora.

Tabela 2 – Direções preferenciais baseado nas frequências de simulação de 6400Hz e algumas frequências.

Simulação	Fonte	0°	26°	45°
6400 Hz	640 Hz	646,45 Hz	639,63 Hz	640,02 Hz
	480 Hz	487,34 Hz	493,89 Hz	482,55 Hz
	320 Hz	320,56 Hz	321,26 Hz	320,01 Hz*
	160 Hz	159,77 Hz	162,17 Hz	160,00 Hz
	80 Hz	79,39 Hz	80,95 Hz	79,02 Hz

Fonte: Próprio autor.

Nota-se, semelhante ao que ocorre na análise da Tab.1, a medida que a relação das frequências é maior do que 10 há também o aumento do erro de dispersão. Outra

semelhança verificou-se quanto a direção de propagação sonora preferencial, visto que também ocorre à 45° .

Observa-se, com base nas frequências de simulação trabalhadas, que quanto maior é a relação das frequências de simulação e de excitação da fonte menores serão os erros de dispersão.

Capítulo VI

6 CONCLUSÃO

Posterior a todas as simulações realizadas nesse trabalho e as devidas análises do método de Guia de Ondas Digitais com ambiente ausente de reflexão, tendo análise com utilização da série de Taylor ABC, erros de dispersão na região de fronteira é possível concluir que foi possível observar as propriedades sonoras.

O estudo 1-D mostrou-se satisfatório, visto que independente da ordem da série de Taylor, frequência de simulação ou frequência de excitação da fonte, há total transmissão da onda sonora sem erros de dispersão.

No estudo 2-D, na análise de uma das fronteiras do domínio da malha, verificou-se ser vantajoso em um ambiente com transmissão total a utilização na modelagem da série de Taylor de primeira ordem independente da frequência utilizada, visto que tende a reduzir erros de dispersão e custos computacionais. A aproximação de primeira ordem da série de Taylor ofereceu desta forma uma melhoria significativa em relação ao caso de ordem zero, demonstrando maior transmissão da energia da onda incidente. Aproximações de segunda e terceira ordem tenderam conforme análise a não oferecer nenhuma melhoria significativa no caso de primeira ordem, embora a análise dos dados numéricos mostre que algumas pequenas melhorias podem ser evidentes, o que é digno de investigação adicional.

Comparando o método numérico de estudo com método analítico percebe-se a comprovação da literatura ao verificar que a relação de frequência de simulação sobre a frequência de excitação da fonte dever no mínimo 10 para que apresente resultados confiáveis para serem analisados.

As contribuições deste trabalho, em relação aos demais expostos na revisão bibliográfica, refere-se ao estudo inicial do método de Guia de Ondas Digitais com apresentação e análise de regiões críticas como fronteiras de ambientes fechados. Além disto, nota-se que quando a relação ótima das frequências de simulação e excitação da fonte é atendida, a direção preferencial para haver menor erro de dispersão para uma onda sonora no ambiente de estudo é a 45° .

6.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Do ponto de vista da modelagem acústica de ambientes, um ABC anecóico preciso é de uso limitado. No entanto, este trabalho tem uma série de vantagens no campo da modelagem digital de malha de guia de ondas. Claramente, existem paralelos com os campos comparáveis de diferenças finitas e modelagem de linha de transmissão, e este estudo mostra que as soluções de fronteira, conforme implementadas para esses algoritmos similares, podem ser aplicadas com algum sucesso em uma malha de guia de ondas digital. Isso indicaria, portanto, que outros modelos de fronteira semelhantes poderiam valer a pena investigar mais. Além disso, uma aproximação numérica, tendo sido bem-sucedida neste caso em particular, pode revelar-se uma abordagem válida para modelar uma junção de contorno geral com uma abordagem mais realistas características de reflexão / absorção.

Também é válido sugerir para futuros trabalhos o estudo de outros tipos de fonte de excitação, que consigam excitar uma faixa de frequência e não apenas uma única frequência. Além destas possibilidades de sugestões acrescenta-se o estudo de guias

de ondas digitais triangulares de forma a comparar com o a forma retangular e verificação da influência nos erros de fase, amplitude e dispersão.

Capítulo VII

7 REFERÊNCIAS

- BOAVENTURA, A. P. F. V., “**Computational Modeling of Wave Propagation from Multifrequencial Source Using Mesh Digital Waveguide.**” 2009. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.
- BLACKSTOCK, D.T., “**Fundamentals of Physical Acoustic**”, J. Wiley, USA, 2000
- CAMPOS, G., “**Modelação Acústica 3D por Malhas de Guias de Ondas Digitais**”. Associação Portuguesa de Engenharia de Áudio. - 18 de Novembro de 2006.
- CHOBEAU, P.; et al., “**A Transmission Line Matrix model for sound propagation in arrays of cylinders normal to an impedance plane**” - Journal of Sound and Vibration (2017) – pp. 454–467
- COURANT, R.; FRIEDRICHS, K; LEWY, H., “**On the Partial Difference Equations of Mathematical Physics**”, Mathematische Annalen, Vol. 100, 1928.
- EI-MASRI, S., et al. “**Vocal Tract Acoustics Using the TLM Method**”, Proceedings of the International Conference on Speech and Language Processing, Vol. 2, pp. 953-956, 1996.
- FERREIRA, L. F. “**Acústica de ambientes e salas de aula**”. Ji-Paraná: Universidade Federal de Rondônia, 2010.
- GERGES S.N.Y, “**Ruído: Fundamentos e Controle**” – Florianópolis – SC , Brasil. NR Editora, 1992.
- HALL, D. E. “**Musical Acoustic, An Introduction**”. Wadsworth, 1980.
- HALL, D. E., “**Basic Acoustics**”, California State University, New York, 1987
- HOWARD, D. M; ANGUS, J., “**Acoustics and Psychoacoustics. Focal Press**”, 1996.
- JOHNS, P.B; BUERLE R.L., “**Numerical solution of 2-dimensional scattering problems using a transmission line matrix**”, Proc. IEE, vol. 118, pp. 1203–1208, Sept. 1971.
- KARJALAINEN, M.; HUANG, P.; SMITH, J. O., “**Waveguide networks for room response modeling and synthesis**,” in Proceedings of the 118th Audio Engineering Society Convention, Barcelona, Spain, May 2005, Preprint No. 6394.
- KELLY, J.L.; LOCHBAUM, C.C., “**Speech synthesis**,” in Proc. Fourth Int. Congr. Acoustics, Copenhagen, Denmark, Sept. 1962, pp. 1–4.
- MOURA H.G. “**Simulação da Propagação de Ondas Acústicas Através de uma Malha de Guias Digitais de Ondas**”. Dissertação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia – Uberlândia, 2005

MURPHY, D.T.; MULLEN, J., “**DIGITAL WAVEGUIDE MESH MODELLING OF ROOM ACOUSTICS: IMPROVED ANECHOIC BOUNDARIES**”. Proc. of the 5th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFX-02), Hamburg, Germany, September 26-28, 2002

MURPHY, D. T.; NEWTON, C. J. C.; HOWARD, D. M., “**Digital Waveguide Mesh Modelling of Room Acoustics: Surround-sound, Boundaries and Plugin Implementation**”, Proceedings of the Cost G-6 Conference on Digital Audio Effects (DAFX-01), pp. 198-202, Limerick, Ireland, Dec. 6-8,2001.

PEIXOTO, B. L. N.; FAGUNDES NETO, M. G., “**Comparação entre métodos numéricos: Diferenças finitas e guia de ondas digitais - 1D e 2D**”. In: Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, 2018, Brasília. XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, 2018. v. 4. p. 95-10

SAVIOJA, L. et al, “**Waveguide Mesh Method for Low Frequency Simulation of Room Accoustics.**” Proceedings of the 15th International Congress on Accoustic (ICA), Trondheim, Norwa. – 26-30 de junho de 1995. – pp. 637-641.

SAVIOJA, L. et al, “**Determination of the Low Frequency Behaviour of an IEC Linstening Room**” – Helsinki: Proceedings of the Nordic Acoustical Meeting NAM’96, pg 637-641, 12-14 de June de 1996.

SHELLEY, S. B., “**Diffuse Boundary Modelling in the Digital Waveguide Mesh**” , Departament of Eletronics. York, 2007

SILVA, P. “**Acústica arquitetônica**”. Belo Horizonte: Edições Engenharia e Arquitetura, 1971.

SMITH, J. O., “**A new approach to digital reverberation using closed waveguide networks,**” in Proc. 1985 Int. Computer Music Conf., (Vancouver, Canada), pp. 47–53, 1985.

SMITH, J.O., “**Music applications of digital waveguides,**” CCRMA, Stanford Univ., Stanford, CA, Tech. Rep. STAN-M-39, 1987.

SPEED, M., Murphy, D.T., Howard, D.M., “**Three-dimensional digital waveguide mesh simulation of cylindrical vocal tract analogs**”. IEEETrans. Audio Speech, Lang. Process. 21 (2), 449–454, 2013.

TAYLOVE, A., “**Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time-Domain Method**”, Artech House, Boston,1995.

VAN DUYNE, S.; SMITH III, JO, “**Physical Modeling with the 2-D Digital Waveguide Mesh**”, Center for Computer Research in Music and Acoustic (CCRMA, Dept.of Music, Stanford University, Stanford CA, 1993

VAN DUYNE, S.; SMITH, J. O., “**The tetrahedral digital waveguide mesh**”, in Proc. IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, (New Paltz, NY), pp. 463–466, 1995.

Capítulo VIII

8 APÊNDICE A

- 1-D

```
clc;close all;clear all;
tic
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Brenno Lobo Netto Peixoto
%Modelagem de guias digitais de ondas para análise 1D

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Dados referente ao meio de propagação da onda sonora
c= 341; %Velocidade do som no ar
[m/s]
rho1= 1.21; %Densidade do ar [kg/m³]
Z1= rho1*c; %Impedância do meio 1

f= 160; %frequência [Hz]
w = 2*f*pi; %frequência [rad/s]
fs= 6400; %frequência de simulação
[Hz]

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Dados referente ao tempo [s]
dt= 1/fs; tf= 0.2; t= [0:dt:tf];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Dados referente ao espaço [m]
Dim=1; %Dimensão da propagação da
onda
dx= (c*sqrt(Dim))/fs; xf=10; x= [0:dx:xf];

xs= [1 x 1]; %Posição para a simulação
xp= round(length(xs)/2); %Posição da fonte no eixo
X

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

amp= 1; %amplitude da onda
Pin = amp*sin(w*t); %Pressão de entrada [Pa]
P = zeros (length(xs),length(t)); %Pressão inicial [Pa]
```

```

Z2=Z1; %Impedância da condição de
contorno %Impedância da condição de
contorno

coe_ref= (Z2-Z1)/(Z1+Z2); %Coeficiente de reflexão
coe_trans= (2*Z2)/(Z2+Z1); %Coeficiente de
transmissão

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Ze= (2*Z1)/(Z1 + Z2); %Impedâncias
características
Zd= Ze; %Impedâncias
características

h=waitbar(0,'Calculando...');

for n= 3:length(t)
waitbar(n/length(t),h);
for i= 2:length(xs)-1

%Cálculo da pressão no início do modelo
if i==2
P(i,n)= Ze*P(i+1,n-1) - (Ze-1)*P(i,n-2);

%Cálculo da pressão na fonte sonora
elseif i==xp
P(xp,n)= Pin(n);

%Cálculo da pressão n final do modelo
elseif i== length(xs)-1
P(i,n)= Zd*P(i-1,n-1) - (Zd-1)*P(i,n-2);

%Cálculo da pressão na fonte sonora
else
P(i,n)= 2/2*(P(i-1,n-1) + P(i+1,n-1))- P(i,n-2);
end
end
end

waitbar(1,h,'Concluido');
close(h);

toc

• 2-D

clc;close all;clear all;
tic

```

```

fprintf('Universidade Federal de Goiás\n');
fprintf('Monografia em Acústica - Brenno Lobo Netto Peixoto\n');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%% Dados do meio principal
x_Total=20;           % Comprimento da sala [m]
y=x_Total;          % Comprimento da sala [m]
rho1=1.21;          % Densidade do meio principal
                    [kg/m³]
c1=341;             % Velocidade do som no meio
principal [m/s]
Z1=rho1*c1;         % Impedância acústica do meio
principal

%% Dados dos contornos

% rho2=2600;         % Densidade da extremidade
                    [kg/m³]
% c2=3100;           % Velocidade do som na
extremidade [m/s]
% Z2=rho2*c2;       % Impedância acústica dos
contornos

%% Dados de frequência

fs=6400;            % Frequência de aquisição [Hz]
fa=320;             % Frequência de excitação [Hz]

%%
%Dados referente ao tempo [s]

dt = 1/fs;
t_max= 0.2;         % Tempo máximo [s]
t= [0:dt:t_max];   % Vetor de tempo
t=[(0-2)*dt (0-1)*dt t];
t_Fo=1/fa/2/dt ;   % Tempo de excitação [s]
%%
%Dados referente ao espaço [m]

Dim=2;              % Dimensão da propagação da onda
dx= (c1*sqrt(Dim))/fs; % Distância entre nós [m]
x= [0:dx:x_Total];
y=x;

xs= [1 x 1];       % Vetor de posição em X
ys= [1 y 1];       % Vetor de posição em Y

xF= round(length(xs)/2); % Posição da fonte de excitação em
X

```

```

yF= xF; % Posição da fonte de excitação em
Y

%%
%Dados da fonte de excitação sonora

amp= 1; % Amplitude da onda [Pa]
P_Fo = amp*sin(2*fa*pi*t); % Fonte de excitação sonora

%%
P_aux=zeros(1,length(P_Fo)); % Auxiliar
P_aux(1:t_Fo)=P_Fo(1:t_Fo); % Auxiliar - Fonte de excitação
sonora
P_aux(1:t_Fo)=P_Fo(1:t_Fo); % Auxiliar - Fonte de excitação
sonora
P_Fo=P_aux; % Fonte de excitação sonora

Pj = zeros (length(xs),length(ys),length(t)); % Matriz de pressão
- (x,y,t)

%% Transmissibilidade e reflexibilidade do sistema

Z2=Z1; % Impedância da condição de
contorno
coe_trans=2*Z1/(Z1+Z2); % Coeficiente de
transmissibilidade
coe_ref=1-coe_trans; % Coeficiente de refletividade

fprintf('Coeficiente de reflexão de %2.2f%%\n',coe_ref*100);
fprintf('Coeficiente de transmissão de %2.2f%%\n',coe_trans*100);

Tw=2*Z1/(Z1+Z2); % Transmissibilidade - oeste
Te= Tw; Ts= Tw; % Transmissibilidade - leste
Tn= Tw; % Transmissibilidade - norte
Ts= Tw; % Transmissibilidade - sul

N=4; % Número de vizinhos por nós no
meio

%%

h=waitbar(0,'Método Digital Waveguide: 0%');

% Início do loop
for n= 5:length(t)
waitbar(t(n)/max(t),h,['Método Digital Waveguide: '
num2str(t(n)/max(t)*100) '%']);
for i= 2:length(ys)-1
for j= 2:length(xs)-1

% Fonte de excitação sonora
if j==xF && i==yF && n<t_Fo + 2*dt

```

```

%         if j==xF && i==yF
%         Pj(xF,yF,n)= P_Fo(n);
%         elseif i==2

% %Borda de contorno OESTE

%         Ordem zero da série de Taylor
%         Pj(i,j,n)= Tw * Pj(i+1,j,n-1) - (Tw - 1) *
Pj(i,j,n-2);

%         Ordem um da série de Taylor
Pj(i,j,n)= 2*Pj(i+1,j,n-1) - Pj(i+2,j,n-2);

%         Ordem dois da série de Taylor
%         Pj(i,j,n)= 5/2*Pj(i+1,j,n-1) - 2*Pj(i+2,j,n-2) +
1/2*Pj(i+3,j,n-3);

%         Ordem três da série de Taylor
%         Pj(i,j,n)= 8/3*Pj(i+1,j,n-1) - 5/2*Pj(i+2,j,n-2)
+...
%         + Pj(i+3,j,n-3) - 1/6*Pj(i+4,j,n-4);

        elseif i==length(ys)-1

% %Borda de contorno LESTE

%         Ordem zero da série de Taylor
%         Pj(i,j,n)= Te * Pj(i-1,j,n-1) - (Te - 1) *
Pj(i,j,n-2);

%         Ordem um da série de Taylor
Pj(i,j,n)= 2*Pj(i-1,j,n-1) - Pj(i-2,j,n-2);

%         Ordem dois da série de Taylor
%         Pj(i,j,n)= 5/2*Pj(i-1,j,n-1) - 2*Pj(i-2,j,n-2) +
1/2*Pj(i-3,j,n-3);

%         Ordem três da série de Taylor
%         Pj(i,j,n)= 8/3*Pj(i-1,j,n-1) - 5/2*Pj(i-2,j,n-2)
+...
%         + Pj(i-3,j,n-3) - 1/6*Pj(i-4,j,n-4);

        elseif j== length(xs)-1

% %Borda de contorno SUL

%         Ordem zero da série de Taylor
%         Pj(i,j,n)= Ts*Pj(i,j-1,n-1) - (Ts - 1) *
Pj(i,j,n-2);

```

```

%          Ordem um da série de Taylor
Pj(i,j,n)= 2*Pj(i,j-1,n-1) - Pj(i,j-2,n-2);

%          Ordem dois da série de Taylor
%          Pj(i,j,n)= 5/2*Pj(i,j-1,n-1) - 2*Pj(i,j-2,n-2) +
1/2*Pj(i,j-3,n-3);

%          %Ordem três da série de Taylor
%          Pj(i,j,n)= 8/3*Pj(i,j-1,n-1) - 5/2*Pj(i,j-2,n-2)
+...
%          Pj(i,j-3,n-3) - 1/6*Pj(i,j-4,n-4);

        elseif j==2

% %Contorno do NORTE

%          %Ordem zero da série de Taylor
%          Pj(i,j,n)= Tn * Pj(i,j+1,n-1) - (Tn - 1) *
Pj(i,j,n-2);

%          %Ordem um da série de Taylor
Pj(i,j,n)= 2*Pj(i,j+1,n-1) - Pj(i,j+2,n-2);

%          %Ordem dois da série de Taylor
%          Pj(i,j,n)= 5/2*Pj(i,j+1,n-1) - 2*Pj(i,j+2,n-2) +
1/2*Pj(i,j+3,n-3);

%          %Ordem três da série de Taylor
%          Pj(i,j,n)= 8/3*Pj(i,j+1,n-1) - 5/2*Pj(i,j+2,n-2)
+...
%          Pj(i,j+3,n-3) - 1/6*Pj(i,j+4,n-4);

% %Campo de pressão sonora no Interior do Modelo
        else
Pj(i,j,n)= 2/N*(Pj(i,j-1,n-1)+ Pj(i,j+1,n-1) + Pj(i-
1,j,n-1) + ...
                + Pj(i+1,j,n-1)) - Pj(i,j,n-2);
        end
    end
end
end

waitbar(1,h,['Método das WaveGuide: ' num2str(1*100) '%']);
close(h);

toc          %Finalização da contagem do custo computacional

%%
% % Obtenção de resultados:

% t_aux=388;
%
```

```

% % Teta 0°
% aux=1;
% for ii=xF:length(xs)-1
%     pos_0(aux)=xs(ii);
%     Pj_0(aux)=Pj(ii,yF,t_aux);
%     aux=aux+1;
% end
%
% figure
% plot(pos_0,Pj_0)
% xlabel('Posição [m]')
% ylabel('Amplitude [Pa]')
% grid on
% title('Pressão sonora a 0°')
%
% Teta 45°
aux=1;
jj=yF;
for ii=xF:length(xs)-1
    if aux==1
        pos_45(aux)=xs(xF);
    else
        pos_45(aux)=pos_45(aux-1)+dx/cos(45*pi()/180);
    end
    Pj_45(aux)=Pj(ii,jj,t_aux);
    aux=aux+1;
    jj=jj+1;
end

figure
plot(pos_45,Pj_45)
xlabel('Posição [m]')
ylabel('Amplitude [Pa]')
grid on
title('Pressão sonora a 45°')

% % Teta 26,56°
%     %Valor escolhido pq a cada 1 dx deve deslocar 2 dy
% aux=1;
% jj=yF;
% for ii=xF:2:length(xs)-1
%     if aux==1
%         pos_26(aux)=xs(xF);
%     else
%         pos_26(aux)=pos_26(aux-1)+2*dx/cos(26.565*pi()/180);
%     end
%     Pj_26(aux)=Pj(ii,jj,t_aux);
%     aux=aux+1;
%     jj=jj+1;
% end
%
% figure
% plot(pos_26,Pj_26)

```

```

% xlabel('Posição [m]')
% ylabel('Amplitude [Pa]')
% grid on
% title('Pressão sonora a 26,56°')

```

9 APÊNDICE B

A primeira coluna das tabelas representa a amostragem entre os picos, por exemplo 1-2 representa a distância tanto em X como em Y dos picos da onda sonora.

- **3200 Hz – 0°**

Tabela 3 – Comparativo entre Bessel e DWG – 0°,fs=3200Hz,fa=640Hz.

fa= 640Hz					
	Bessel		DWG		F [Hz]
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	
1-2	0,0022	0,5330	-0,003	0,4521	754,2579
2-3	0,0023	0,5330	-0,0137	0,4521	754,2579
3-4	0,0026	0,5330	0,0028	0,6028	565,6934
4-5	0,028	0,5320	0,0135	0,4521	754,2579
5-6	0,0032	0,5330	0,0029	0,4521	754,2579
6-7	0,0036	0,5330	-0,0037	0,4521	754,2579
7-8	0,004	0,5330	-0,0079	0,4521	754,2579
8-9	0,0046	0,5330	-0,0033	0,6028	565,6934
9-10	0,0053	0,5330	0,0212	0,4521	754,2579
10-11	0,0063	0,5330	0,0069	0,4521	754,2579
11-12	0,0076	0,5320	-0,0049	0,4521	754,2579
12-13	0,0094	0,5330	-0,0121	0,4521	754,2579
13-14	0,012	0,5330	0,0116	0,6028	565,6934
14-15	0,0161	0,5330	0,0227	0,4521	754,2579
15-16	0,0233	0,5340	0,0116	0,4521	754,2579
16-17	0,0383	0,5330	0,0016	0,4521	754,2579
17-18	0,0818	0,5350	-0,0198	0,4521	754,2579
18-19	-	-	0,424	0,6028	565,6934
19-20	-	-	0,1045	0,4521	754,2579

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4 – Comparativo entre Bessel e DWG – 0°,fs=3200Hz,fa=480Hz.

fa= 480Hz					
	Bessel		DWG		
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	F [Hz]
1-2	0,0036	0,71100	-0,0026	0,60280	565,6934
2-3	0,004	0,71000	0,0109	0,75350	452,5547
3-4	0,0046	0,71100	-0,0047	0,60280	565,6934
4-5	0,0053	0,71000	0,0081	0,75350	452,5547
5-6	0,0063	0,71100	-0,0037	0,60280	565,6934
6-7	0,0076	0,71000	0,0151	0,75350	452,5547
7-8	0,0094	0,71100	-0,0057	0,60280	565,6934
8-9	0,012	0,71000	0,0169	0,75350	452,5547
9-10	0,0161	0,71000	-0,007	0,60280	565,6934
10-11	0,0233	0,71100	0,0258	0,75350	452,5547
11-12	0,0383	0,71200	-0,0039	0,60280	565,6934
12-13	0,0818	0,71300	0,0485	0,75350	452,5547
13-14	-	-	0,0204	0,60280	565,6934

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5 – Comparativo entre Bessel e DWG – 0°,fs=3200Hz,fa=480Hz.

fa= 320Hz					
	Bessel		DWG		
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	F [Hz]
1-2	0,0063	1,06600	0,0037	1,05490	323,2534
2-3	0,0076	1,06600	0,0029	1,05490	323,2534
3-4	0,0094	1,06600	0,0116	1,05490	323,2534
4-5	0,012	1,06600	0,0036	1,05490	323,2534
5-6	0,0161	1,06600	0,0062	1,05490	323,2534
6-7	0,0233	1,06600	0,0175	1,05490	323,2534
7-8	0,0383	1,06700	0,0273	1,05490	323,2534
8-9	0,0818	1,07000	0,0563	1,05490	323,2534

Fonte: Próprio autor.

Tabela 6 – Comparativo entre Bessel e DWG – 0°,fs=3200Hz,fa=160Hz.

fa= 160Hz					
	Bessel		DWG		
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	F [Hz]
1-2	0,0233	2,1320	0,0148	2,1098	161,6267
2-3	0,0383	2,1350	0,0244	2,1098	161,6267
3-4	0,0818	2,1390	0,0474	2,2605	150,8516

Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 – Comparativo entre Bessel e DWG – 0°,fs=3200Hz,fa=80Hz.

fa= 80Hz					
	Bessel		DWG		
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	F [Hz]
1-2	0,0818	4,2800	0,0446	4,2197	80,81143

Fonte: Próprio autor.

• 3200 Hz – 26°

Tabela 8 – Comparativo entre Bessel e DWG – 26°,fs=3200Hz,fa=640Hz.

fa= 640Hz					
	Bessel		DWG		F [Hz]
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	
1-2	0,0022	0,5330	0,01840	1,01090	337,3232
2-3	0,0023	0,5330	-0,00230	1,01090	337,3232
3-4	0,0026	0,5330	0,00030	1,01090	337,3232
4-5	0,028	0,5320	0,01430	1,01090	337,3232
5-6	0,0032	0,5330	0,00760	1,01090	337,3232
6-7	0,0036	0,5330	0,01050	1,01090	337,3232
7-8	0,04	0,5330	0,01450	1,01090	337,3232
8-9	0,0046	0,5330	0,02340	1,01090	337,3232
9-10	0,0053	0,5330	0,05700	1,01090	337,3232
10-11	0,0063	0,5330	-	-	-
11-12	0,0076	0,5320	-	-	-
12-13	0,0094	0,5330	-	-	-
13-14	0,012	0,5330	-	-	-
14-15	0,0161	0,5330	-	-	-
15-16	0,0233	0,5340	-	-	-
16-17	0,0383	0,5330	-	-	-
17-18	0,0818	0,5350	-	-	-

Fonte: Próprio autor.

Tabela 9 – Comparativo entre Bessel e DWG – 26°,fs=3200Hz,fa=480Hz.

fa= 480Hz					
	Bessel		DWG		F [Hz]
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	
1-2	0,0036	0,71100	0,0012	0,67400	505,9347
2-3	0,004	0,71000	0,0075	0,67400	505,9347
3-4	0,0046	0,71100	-0,0039	0,67400	505,9347
4-5	0,0053	0,71000	-0,0088	0,67400	505,9347
5-6	0,0063	0,71100	-0,0055	0,67400	505,9347
6-7	0,0076	0,71000	-0,0083	0,67400	505,9347
7-8	0,0094	0,71100	-0,0149	0,67400	505,9347
8-9	0,012	0,71000	-0,0185	0,67400	505,9347
9-10	0,0161	0,71000	0,0173	1,01090	337,3232
10-11	0,0233	0,71100	0,0242	0,67400	505,9347
11-12	0,0383	0,71200	0,0268	0,67400	505,9347
12-13	0,0818	0,71300	0,0326	0,67400	505,9347
13-14	-	-	0,0443	0,67400	505,9347
14-15	-	-	0,0839	0,67400	505,9347

Fonte: Próprio autor.

Tabela 10 – Comparativo entre Bessel e DWG – 26°,fs=3200Hz,fa=480Hz.

fa= 320Hz					
	Bessel		DWG		
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	F [Hz]
1-2	0,0063	1,06600	0,0097	1,34790	252,9861
2-3	0,0076	1,06600	0,0136	1,01090	337,3232
3-4	0,0094	1,06600	0,0154	1,01090	337,3232
4-5	0,012	1,06600	0,0075	1,01090	337,3232
5-6	0,0161	1,06600	-0,0018	1,01090	337,3232
6-7	0,0233	1,06600	-0,0067	1,01090	337,3232
7-8	0,0383	1,06700	-0,0037	1,01090	337,3232
8-9	0,0818	1,07000	0,029	1,34790	252,9861
9-10	-	-	0,0785	1,01090	337,3232

Fonte: Próprio autor.

Tabela 11 – Comparativo entre Bessel e DWG – 26°,fs=3200Hz,fa=160Hz.

fa= 160Hz					
	Bessel		DWG		
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	F [Hz]
1-2	0,0233	2,1320	0,011	2,0219	168,6532
2-3	0,0383	2,1350	0,0083	2,0219	168,6532
3-4	0,0818	2,1390	0,0219	2,3589	144,5589
4-5	-	-	0,0571	2,0219	168,6532

Fonte: Próprio autor.

Tabela 12 – Comparativo entre Bessel e DWG – 26°,fs=3200Hz,fa=80Hz.

fa= 80Hz					
	Bessel		DWG		
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	F [Hz]
1-2	0,0818	4,2800	0,0226	4,2625	80
2-3	-	-	0,0403	4,2625	80

Fonte: Próprio autor.

- 3200 Hz – 45°

Tabela 13 – Comparativo entre Bessel e DWG – 45°, fs=3200Hz, fa=640Hz.

fa= 640Hz					
	Bessel		DWG		
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	F [Hz]
1-2	0,0022	0,5330	-0,04470	0,63940	533,31248
2-3	0,0023	0,5330	0,04460	0,42620	800,09385
3-4	0,0026	0,5330	-0,03460	0,63940	533,31248
4-5	0,028	0,5320	0,04260	0,42620	800,09385
5-6	0,0032	0,5330	-0,04980	0,63940	533,31248
6-7	0,0036	0,5330	0,05260	0,42620	800,09385
7-8	0,004	0,5330	-0,05460	0,63940	533,31248
8-9	0,0046	0,5330	0,06660	0,42620	800,09385
9-10	0,0053	0,5330	-0,06760	0,63940	533,31248
10-11	0,0063	0,5330	0,06830	0,42620	800,09385
11-12	0,0076	0,5320	-0,05490	0,63940	533,31248
12-13	0,0094	0,5330	0,05700	0,42620	800,09385
13-14	0,012	0,5330	-0,05380	0,63940	533,31248
14-15	0,0161	0,5330	0,05420	0,42620	800,09385
15-16	0,0233	0,5340	-0,04970	0,63940	533,31248
16-17	0,0383	0,5330	0,06280	0,42620	800,09385
17-18	0,0818	0,5350	-0,06320	0,63940	533,31248
18-19	-	-	0,07440	0,42620	800,09385
19-20	-	-	-0,06580	0,63940	533,31248
20-21	-	-	0,08720	0,42620	800,09385
21-22	-	-	-0,07910	0,63940	533,31248
22-23	-	-	0,10720	0,42620	800,09385
23-24	-	-	-0,08440	0,63940	533,31248
24-25	-	-	0,15420	0,42620	800,09385
25-26	-	-	-0,07250	0,63940	533,31248

Fonte: Próprio autor.

Tabela 14 – Comparativo entre Bessel e DWG – 45°,fs=3200Hz,fa=480Hz.

fa= 480Hz					
	Bessel		DWG		
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	F [Hz]
1-2	0,0036	0,71100	0,0187	0,63940	533,31248
2-3	0,004	0,71000	-0,0092	0,63940	533,31248
3-4	0,0046	0,71100	-0,0059	0,85250	400
4-5	0,0053	0,71000	0,0214	0,63940	533,31248
5-6	0,0063	0,71100	-0,0075	0,63940	533,31248
6-7	0,0076	0,71000	-0,0096	0,85250	400
7-8	0,0094	0,71100	0,0265	0,63940	533,31248
8-9	0,012	0,71000	-0,014	0,63940	533,31248
9-10	0,0161	0,71000	0,0017	0,85250	400
10-11	0,0233	0,71100	0,0196	0,63940	533,31248
11-12	0,0383	0,71200	-0,0033	0,63940	533,31248
12-13	0,0818	0,71300	-0,0097	0,85250	400
13-14	-	-	0,0357	0,63940	533,31248
14-15			-0,0084	0,63940	533,31248
15-16			-0,0003	0,85250	400
16-17			0,0539	0,63940	533,31248
17-18			-0,0006	0,63940	533,31248
18-19			0,0602	0,85250	400

Fonte: Próprio autor.

Tabela 15 – Comparativo entre Bessel e DWG – 45°,fs=3200Hz,fa=320Hz.

fa =320Hz					
	Bessel		DWG		
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	F [Hz]
1-2	0,0063	1,06600	0,0023	1,06560	320,00751
2-3	0,0076	1,06600	0,0021	1,06560	320,00751
3-4	0,0094	1,06600	0,0045	1,06560	320,00751
4-5	0,012	1,06600	0,004	1,06560	320,00751
5-6	0,0161	1,06600	0,0003	1,06560	320,00751
6-7	0,0233	1,06600	0,0106	1,06560	320,00751
7-8	0,0383	1,06700	0,0004	1,06560	320,00751
8-9	0,0818	1,07000	0,0142	1,06560	320,00751
9-10	-	-	0,0051	1,06560	320,00751
10-11	-	-	0,0181	1,06560	320,00751
11-12	-	-	0,0287	1,06560	320,00751
12-13	-	-	0,0579	1,06560	320,00751

Fonte: Próprio autor.

Tabela 16 – Comparativo entre Bessel e DWG – 45°,fs=3200Hz,fa=160Hz.

fa= 160Hz					
	Bessel		DWG		
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	F [Hz]
1-2	0,0233	2,1320	0,0057	2,1313	159,99625
2-3	0,0383	2,1350	0,0091	2,1311	160,00901
3-4	0,0818	2,1390	0,0172	2,1312	160,00375
4-5	-	-	0,0121	2,1313	159,99625
5-6	-	-	0,0524	2,1312	160,00375

Fonte: Próprio autor.

Tabela 17 – Comparativo entre Bessel e DWG – 45°,fs=3200Hz,fa=80Hz.

fa= 80Hz					
	Bessel		DWG		
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	F [Hz]
1-2	0,0818	4,2800	0,0818	4,2800	79,672897

Fonte: Próprio autor.

- **6400 Hz – 0°**

Tabela 18 – Comparativo entre Bessel e DWG – 0°,fs=6400Hz,fa=640Hz.

fa= 640Hz					
	Bessel		DWG		
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	F [Hz]
1-2	0,0022	0,5330	0,0009	0,5275	646,4455
2-3	0,0023	0,5330	0,0026	0,5275	646,4455
3-4	0,0026	0,5330	0,0024	0,5275	646,4455
4-5	0,028	0,5320	0,002	0,5275	646,4455
5-6	0,0032	0,5330	0,003	0,5275	646,4455
6-7	0,0036	0,5330	0,0025	0,5275	646,4455
7-8	0,004	0,5330	0,0035	0,5275	646,4455
8-9	0,0046	0,5330	0,0017	0,5275	646,4455
9-10	0,0053	0,5330	0,0029	0,5275	646,4455
10-11	0,0063	0,5330	0,0028	0,5275	646,4455
11-12	0,0076	0,5320	0,0048	0,5275	646,4455
12-13	0,0094	0,5330	0,0057	0,5275	646,4455
13-14	0,012	0,5330	0,0051	0,5275	646,4455
14-15	0,0161	0,5330	0,0052	0,5275	646,4455
15-16	0,0233	0,5340	0,0083	0,5275	646,4455
16-17	0,0383	0,5330	0,0139	0,5275	646,4455
17-18	0,0818	0,5350	0,023	0,5275	646,4455
18-19	-	-	0,0571	0,5275	646,4455

Fonte: Próprio autor.

Tabela 19 – Comparativo entre Bessel e DWG – 0°,fs=6400Hz,fa=480Hz.

fa= 480Hz					
	Bessel		DWG		F [Hz]
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	
1-2	0,0036	0,71100	0,0028	0,67820	502,8015
2-3	0,004	0,71000	0,0025	0,67820	502,8015
3-4	0,0046	0,71100	0,0003	0,75350	452,5547
4-5	0,0053	0,71000	0,0051	0,67820	502,8015
5-6	0,0063	0,71100	0,0026	0,67820	502,8015
6-7	0,0076	0,71000	0,0008	0,75350	452,5547
7-8	0,0094	0,71100	0,0076	0,67820	502,8015
8-9	0,012	0,71000	0,0052	0,67820	502,8015
9-10	0,0161	0,71000	0,0058	0,75350	452,5547
10-11	0,0233	0,71100	0,0136	0,67820	502,8015
11-12	0,0383	0,71200	0,0128	0,67820	502,8015
12-13	0,0818	0,71300	0,0206	0,75350	452,5547
13-14	-	-	0,0602	0,67820	502,8015

Fonte: Próprio autor.

Tabela 20 – Comparativo entre Bessel e DWG – 0°,fs=6400Hz,fa=320Hz.

fa= 320Hz					
	Bessel		DWG		F [Hz]
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	
1-2	0,0063	1,06600	0,0025	1,0549	323,2534
2-3	0,0076	1,06600	0,0033	1,0549	323,2534
3-4	0,0094	1,06600	0,0078	1,0549	323,2534
4-5	0,012	1,06600	0,0061	1,0549	323,2534
5-6	0,0161	1,06600	0,0064	1,0549	323,2534
6-7	0,0233	1,06600	0,0124	1,0549	323,2534
7-8	0,0383	1,06700	0,0217	1,0549	323,2534
8-9	0,0818	1,07000	0,0511	1,1303	301,6898

Fonte: Próprio autor.

Tabela 21 – Comparativo entre Bessel e DWG – 0°,fs=6400Hz,fa=160Hz.

fa= 160Hz					
	Bessel		DWG		F [Hz]
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	
1-2	0,0233	2,1320	0,0109	2,1098	161,6267
2-3	0,0383	2,1350	0,0211	2,1098	161,6267
3-4	0,0818	2,1390	0,0423	2,1852	156,0498

Fonte: Próprio autor.

Tabela 22 – Comparativo entre Bessel e DWG – 0°,fs=6400Hz,fa=80Hz.

fa= 80Hz					
	Bessel		DWG		F [Hz]
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	
1-2	0,0818	4,2800	0,037	4,2950	79,39464

Fonte: Próprio autor.

- 6400 Hz – 26°

Tabela 23 – Comparativo entre Bessel e DWG – 26°,fs=6400Hz,fa=640Hz..

fa= 640Hz					
	Bessel		DWG		
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	F [Hz]
1-2	0,0022	0,5330	0,0022	0,5330	639,7749
2-3	0,0023	0,5330	0,0023	0,5330	639,7749
3-4	0,0026	0,5330	0,0026	0,5330	639,7749
4-5	0,028	0,5320	0,0028	0,5330	639,7749
5-6	0,0032	0,5330	0,0032	0,5330	639,7749
6-7	0,0036	0,5330	0,0026	0,5330	639,7749
7-8	0,004	0,5330	0,004	0,5330	639,7749
8-9	0,0046	0,5330	0,0046	0,5330	639,7749
9-10	0,0053	0,5330	0,0053	0,5330	639,7749
10-11	0,0063	0,5330	0,0063	0,5330	639,7749
11-12	0,0076	0,5320	0,0076	0,5320	640,9774
12-13	0,0094	0,5330	0,0094	0,5330	639,7749
13-14	0,012	0,5330	0,012	0,5330	639,7749
14-15	0,0161	0,5330	0,0161	0,5330	639,7749
15-16	0,0233	0,5340	0,0233	0,5340	638,5768
16-17	0,0383	0,5330	0,0383	0,5330	639,7749
17-18	0,0818	0,5350	0,818	0,5350	637,3832

Fonte: Próprio autor.

Tabela 24 – Comparativo entre Bessel e DWG – 26°,fs=6400Hz,fa=480Hz.

fa= 480Hz					
	Bessel		DWG		
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	F [Hz]
1-2	0,0036	0,71100	-0,0017	0,67400	505,9347
2-3	0,004	0,71000	-0,0049	0,67400	505,9347
3-4	0,0046	0,71100	0,0083	0,67400	505,9347
4-5	0,0053	0,71000	0,0069	0,67400	505,9347
5-6	0,0063	0,71100	0,004	0,67400	505,9347
6-7	0,0076	0,71000	0,0001	0,67400	505,9347
7-8	0,0094	0,71100	-0,0096	0,67400	505,9347
8-9	0,012	0,71000	0,0143	0,67400	505,9347
9-10	0,0161	0,71000	0,01	1,01090	337,3232
10-11	0,0233	0,71100	0,0083	0,67400	505,9347
11-12	0,0383	0,71200	0,003	0,67400	505,9347
12-13	0,0818	0,71300	-0,0045	0,67400	505,9347
13-14	-	-	0,0419	0,67400	505,9347
14-15	-	-	0,0687	0,67400	505,9347

Fonte: Próprio autor.

Tabela 25 – Comparativo entre Bessel e DWG – 26°,fs=6400Hz,fa=320Hz.

fa= 320Hz					
	Bessel		DWG		F [Hz]
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	
1-2	0,0063	1,06600	-0,0002	1,0109	337,3232
2-3	0,0076	1,06600	0,0039	1,1794	289,1301
3-4	0,0094	1,06600	0,0058	1,0109	337,3232
4-5	0,012	1,06600	0,0011	1,0109	337,3232
5-6	0,0161	1,06600	0,0072	1,1794	289,1301
6-7	0,0233	1,06600	0,0134	1,0109	337,3232
7-8	0,0383	1,06700	0,081	1,0109	337,3232
8-9	0,0818	1,07000	0,0188	1,1794	289,1301
9-10			0,0588	1,0109	337,3232

Fonte: Próprio autor

Tabela 26 – Comparativo entre Bessel e DWG – 26°,fs=6400Hz,fa=160Hz.

fa= 160Hz					
	Bessel		DWG		F [Hz]
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	
1-2	0,0233	2,1320	0,0036	2,0219	168,6532
2-3	0,0383	2,1350	0,0098	2,1904	155,6793
3-4	0,0818	2,1390	0,0158	2,0219	168,6532
4-5	-	-	0,0446	2,1904	155,6793

Fonte: Próprio autor

Tabela 27 – Comparativo entre Bessel e DWG – 26°,fs=6400Hz,fa=80Hz.

fa= 80Hz					
	Bessel		DWG		F [Hz]
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	
1-2	0,0818	4,2800	0,0358	4,2123	80,9534

Fonte: Próprio autor

- **6400 Hz – 45°**

Tabela 28 – Comparativo entre Bessel e DWG – 45°,fs=6400Hz,fa=640Hz.

fa= 640Hz					
	Bessel		DWG		F [Hz]
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	
1-2	0,0022	0,5330	-0,0065	0,5328	640,015
2-3	0,0023	0,5330	0,0029	0,5328	640,015
3-4	0,0026	0,5330	-0,0008	0,5328	640,015
4-5	0,028	0,5320	0,0028	0,5328	640,015
5-6	0,0032	0,5330	0,0003	0,5328	640,015
6-7	0,0036	0,5330	0,0029	0,5328	640,015
7-8	0,004	0,5330	0,0009	0,5328	640,015
8-9	0,0046	0,5330	0,0032	0,5328	640,015
9-10	0,0053	0,5330	0,0016	0,5328	640,015
10-11	0,0063	0,5330	0,0038	0,5328	640,015
11-12	0,0076	0,5320	0,0026	0,5328	640,015
12-13	0,0094	0,5330	0,0048	0,5328	640,015
13-14	0,012	0,5330	0,0041	0,5328	640,015
14-15	0,0161	0,5330	0,0067	0,5328	640,015
15-16	0,0233	0,5340	0,0071	0,5328	640,015
16-17	0,0383	0,5330	0,0112	0,5328	640,015
17-18	0,0818	0,5350	0,0149	0,5328	640,015
18-19	-	-	0,0265	0,5328	640,015

Fonte: Próprio autor

Tabela 29 – Comparativo entre Bessel e DWG – 45°,fs=6400Hz,fa=480Hz.

480Hz					
	Bessel		DWG		F [Hz]
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	
1-2	0,0036	0,71100	0,0052	0,63940	533,3125
2-3	0,004	0,71000	0,0005	0,74590	457,1658
3-4	0,0046	0,71100	-0,0029	0,74590	457,1658
4-5	0,0053	0,71000	0,0075	0,63940	533,3125
5-6	0,0063	0,71100	0,0004	0,74590	457,1658
6-7	0,0076	0,71000	-0,0043	0,74590	457,1658
7-8	0,0094	0,71100	0,0101	0,63940	533,3125
8-9	0,012	0,71000	-0,0005	0,74590	457,1658
9-10	0,0161	0,71000	-0,001	0,74590	457,1658
10-11	0,0233	0,71100	0,0087	0,63940	533,3125
11-12	0,0383	0,71200	0,0035	0,74590	457,1658
12-13	0,0818	0,71300	-0,003	0,63940	533,3125
13-14	-	-	0,0151	0,74590	457,1658
14-15	-	-	0,0032	0,74590	457,1658
15-16	-	-	0,0044	0,74590	457,1658
16-17	-	-	0,0222	0,63940	533,3125
17-18	-	-	0,0266	0,74590	457,1658
18-19	-	-	0,0427	0,74590	457,1658

Fonte: Próprio autor

Tabela 30 – Comparativo entre Bessel e DWG – 45°,fs=6400Hz,fa=320Hz..

320Hz					
	Bessel		DWG		
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	F [Hz]
1-2	0,0063	1,06600	-0,0003	0,9591	355,5417
2-3	0,0076	1,06600	0,0018	1,0656	320,0075
3-4	0,0094	1,06600	0,0025	1,0656	320,0075
4-5	0,012	1,06600	0,0032	1,0656	320,0075
5-6	0,0161	1,06600	0,0039	1,0656	320,0075
6-7	0,0233	1,06600	0,0049	1,0656	320,0075
7-8	0,0383	1,06700	0,0063	1,0656	320,0075
8-9	0,0818	1,07000	0,0086	1,0656	320,0075
9-10	-	-	0,127	1,0656	320,0075
10-11	-	-	0,0214	1,0656	320,0075
11-12	-	-	0,0483	1,0656	320,0075

Fonte: Próprio autor

Tabela 31 – Comparativo entre Bessel e DWG – 45°,fs=6400Hz,fa=160Hz..

160Hz					
	Bessel		DWG		
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	F [Hz]
1-2	0,0233	2,1320	0,023	2,1312	160,0038
2-3	0,0383	2,1350	0,0097	2,1313	159,9962
3-4	0,0818	2,1390	0,018	2,1312	160,0038
4-5	-	-	0,0424	2,1312	160,0038

Fonte: Próprio autor

Tabela 32 – Comparativo entre Bessel e DWG – 45°,fs=6400Hz,fa=80Hz..

80Hz					
	Bessel		DWG		
	Δy [m]	Δx [m]	Δy [m]	Δx [m]	F [Hz]
1-2	0,0818	4,2800	0,156	4,2625	80
2-3	-	-	0,0319	4,3691	78,04811

Fonte: Próprio autor

10 APÊNDICE C



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO



PLANO DE TRABALHO DO PROJETO FINAL

Título: Estudo do Método das Guia de Ondas Digitais na Acústica de Salas

Dados	Brenno Lobo Netto Peixoto
Nº de Matrícula	201401901
Telefones	(62) 9 8544-9755
E-mail	lobobrenno@gmail.com
Orientador(a):	Marlipe Garcia Fagundes Neto
Curso:	Eng. Elétrica () Eng. de Computação () Eng. Mecânica (x)
Certif. Estudos	Não (x) Sim ()

Resumo

O método das guias de ondas digitais baseia-se na solução da equação da onda. A principal vantagem do método reside na solução da equação diferencial para o caso unidimensional, ou seja, considera-se ondas propagando apenas no interior de uma guia de onda ou tubo de pequeno comprimento e pequena seção transversal. Estas guias são conectadas de forma a modelar ambientes de uma, duas ou três dimensões. Essencialmente, a viagem da onda de um ponto a outro, em um meio sem perdas, pode ser simulada apenas por uma linha de atraso digital, o que reduz expressivamente o custo computacional. Porém, um dos principais problemas encontrados nas simulações da propagação do som via guias de ondas digitais é o erro de dispersão. Desse modo, propõe-se estudar e aplicar o método para obter respostas acústicas de salas, ambientes fechados, verificando a influência e limitação do erro de dispersão. As salas são apontadas como ambiente de estudo, pois possuem várias características que permitem verificar e analisar as respostas obtidas via guias de ondas digitais.

I. Objetivos

Os objetivos macros deste projeto são:

- Capacitar o aluno na acústica de ambientes fechados;
- Aplicar as guias de ondas digitais para estudo acústico de salas.

Os objetivos específicos do presente projeto são:

- Compreender o estado da arte da acústica de ambientes fechados;
- Estudar e implementar a técnica das guias de ondas digitais;
- Simular e analisar a acústica de um ambiente fechado com as guias de ondas digitais;
- Apontar a limitação do erro de dispersão no estudo acústico de salas.

II. Metodologia

A metodologia utilizada neste projeto será:

- Revisão bibliográfica sobre acústica de ambiente fechado;
- Principais características das guias de ondas digitais;
- Algoritmo e implementação das guias de ondas digitais;
- Simulação e validação;
- Análise dos resultados;
- Redação do trabalho final de curso.



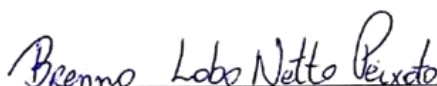
III. Cronograma.

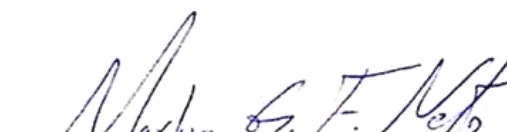
O cronograma das atividades a serem realizadas é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Cronograma das atividades.

Etapas do Projeto	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL
1) Revisão bibliográfica sobre acústica de ambiente fechado	X				
2) Principais características das guias de ondas digitais		X			
3) Algoritmo e implementação das guias de ondas digitais		X	X		
4) Simulação e validação			X	X	
5) Análise dos resultados				X	
6) Redação do trabalho final de curso				X	X

Goiânia, 20 de fevereiro de 2019.


Assinatura do aluno
Matrícula: 20401901


Assinatura do(a) Prof.(a) Orientador(a):