



Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta  
(Organizadores)

# Impactos das Tecnologias na Engenharia Mecânica 2

**Atena**  
Editora  
Ano 2019

**Henrique Ajuz Holzmann**  
**João Dallamuta**  
(Organizadores)

**Impactos das Tecnologias na  
Engenharia Mecânica**  
**2**

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Lorena Prestes e Geraldo Alves

Revisão: Os autores

### Conselho Editorial

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

I34 Impactos das tecnologias na engenharia mecânica 2 [recurso eletrônico] / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, João Dallamuta. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (Impactos das Tecnologias na Engenharia Mecânica; v. 2)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

ISBN 978-85-7247-247-0

DOI 10.22533/at.ed.470190504

1. Automação industrial. 2. Engenharia mecânica – Pesquisa – Brasil. 3. Produtividade industrial. 4. Tecnologia. I. Holzmann, Henrique Ajuz. II. Dallamuta, João. III. Série.

CDD 670.427

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

A Engenharia Mecânica pode ser definida como o ramo da engenharia que aplica os princípios de física e ciência dos materiais para a concepção, análise, fabricação e manutenção de sistemas mecânicos

Nos dias atuais a busca pela redução de custos, aliado a qualidade final dos produtos é um marco na sobrevivência das empresas. Nesta obra é conciliada duas atividades essenciais a um engenheiro mecânico: Projetos e Simulação.

É possível observar que na última década, a área de projetos e simulação vem ganhando amplo destaque, pois através de simulações pode-se otimizar os projetos realizados, reduzindo o tempo de execução, a utilização de materiais e os custos finais.

Dessa forma, são apresentados trabalhos teóricos e resultados práticos de diferentes formas de aplicação e abordagens nos projetos dentro da grande área das engenharias.

Trabalhos envolvendo simulações numéricas, tiveram um grande avanço devido a inserção de novos softwares dedicados a áreas específicas, auxiliando o projetista em suas funções. Sabe-los utilizar de uma maneira eficaz e eficiente é um dos desafios dos novos engenheiros.

Neste livro são apresentados vários trabalhos, alguns com resultados práticos, sobre simulações em vários campos da engenharia industrial, elementos de maquinas e projetos de bancadas práticas.

Um compendio de temas e abordagens que constituem a base de conhecimento de profissionais que se dedicam a projetar e fabricar sistemas mecânicos e industriais.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DA DIFUSÃO UNIDIMENSIONAL COM SOLUÇÃO SUAVE UTILIZANDO MALHA ADAPTATIVA	
<i>Gabriel Marcos Magalhães</i> <i>Hélio Ribeiro Neto</i> <i>Aristeu da Silveira Neto</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.4701905041</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>14</b>
USO DE MALHAS NÃO-ESTRUTURADAS NA RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DA DIFUSÃO	
<i>Gabriel Marcos Magalhães</i> <i>Alessandro Alves Santana</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.4701905042</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>29</b>
MÉTODOS NUMÉRICOS: DIFERENÇAS FINITAS E GUIA DE ONDAS DIGITAIS 1D E 2D - COMPARATIVO DE FREQUÊNCIAS	
<i>Brenno Lobo Netto Peixoto</i> <i>Marlipe Garcia Fagundes Neto</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.4701905043</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>43</b>
INFLUÊNCIA DA DISCRETIZAÇÕES ESPACIAL E TEMPORAL EM PROBLEMA PURAMENTE ADVECTIVO	
<i>Thiago Fernando Santiago de Freitas</i> <i>Andreia Aoyagui Nascimento</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.4701905044</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>53</b>
FRONTEIRA IMERSA PARA CORPOS ESBELTOS	
<i>João Rodrigo Andrade</i> <i>Aristeu Silveira Neto</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.4701905045</b>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>61</b>
MATHEMATICAL AND NUMERICAL MODELLING OF GAS-SOLID TURBULENT FLOWS IN COMPLEX GEOMETRIES	
<i>Stella Rodrigues Ferreira Lima Ribeiro</i> <i>Letícia Raquel de Oliveira</i> <i>João Marcelo Vedovoto</i> <i>Aristeu da Silveira Neto</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.4701905046</b>	
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>69</b>
ESTUDO NUMÉRICO DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA TRANSIENTE EM PLACAS	
<i>William Denner Pires Fonseca</i>	

*Táisa Santos Machado  
Eduardo Mendonça Pinheiro  
José Felipe Lopes de Carvalho  
Sidney da Conceição Alves  
Thiago Santana de Oliveira*

**DOI 10.22533/at.ed.4701905047**

**CAPÍTULO 8 ..... 83**

IDENTIFICAÇÃO EXPERIMENTAL E PROJETO DE UM PID PARA UM SERVOMECANISMO

*Wesley Pereira Marcos  
Rodrigo Hiroshi Murofushi  
Bruno Luiz Pereira*

**DOI 10.22533/at.ed.4701905048**

**CAPÍTULO 9 ..... 98**

MODELAGEM ESTOCÁSTICA DE ESTRUTURAS COMPÓSITAS CONTENDO SHUNT RESISTIVO PARA O CONTROLE PASSIVO DE VIBRAÇÕES

*Lorrane Pereira Ribeiro  
Antônio Marcos Gonçalves de Lima  
Victor Augusto da Costa Silva*

**DOI 10.22533/at.ed.4701905049**

**CAPÍTULO 10 ..... 114**

PROJETO E ANÁLISE DE VIBRAÇÕES POR ELEMENTOS FINITOS DE UM CHASSI TIPO SPACE FRAME MINI-BAJA

*Marcos Claudio Gondim  
Ellberlandyo Lima Grangeiro  
Antonio Eurick Soares Campelo  
Lucas Rodrigues Oliveira  
Bruno de Oliveira Carvalho*

**DOI 10.22533/at.ed.47019050410**

**CAPÍTULO 11 ..... 126**

SIMULAÇÕES DOS ESFORÇOS VIBRACIONAIS DO CABO CAA 795 MCM (TERN) ATRAVÉS DE MÉTODOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS DE VIBRAÇÃO

*Jhonattan Dias  
Rodrigo Canestraro Quadros  
Marcos Jose Mannala  
Marcio Tonetti*

**DOI 10.22533/at.ed.47019050411**

**CAPÍTULO 12 ..... 133**

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE FREIO APLICADO A UM VEÍCULO OFF-ROAD DO TIPO BAJA-SAE

*Felipe Alencar Motta  
Lucas Rocha Dias da Silva*

**DOI 10.22533/at.ed.47019050412**

<b>CAPÍTULO 13</b> .....	<b>146</b>
OTIMIZAÇÃO DA ESCOLHA DA RELAÇÃO DE TRANSMISSÃO DE VEÍCULOS AUTOMOTORES ATRAVÉS DE MODELAGEM MATEMÁTICA: O PROJETO BAJA SAE	
<i>Pedro Melo Biz</i> <i>Leonardo Gomes</i> <i>Antônio Brasil</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.47019050413</b>	
<b>CAPÍTULO 14</b> .....	<b>157</b>
ANÁLISE CINEMÁTICA DE SUSPENSÃO TRAILING ARM COM CAMBER LINKS PARA VEÍCULO OFF-ROAD	
<i>Francisco José Rodrigues de Sousa Júnior</i> <i>João Lucas Jacob Araújo</i> <i>Gustavo Luis dos Santos Silva</i> <i>Antônio Ítalo Rodrigues Pedrosa</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.47019050414</b>	
<b>CAPÍTULO 15</b> .....	<b>169</b>
APLICAÇÃO DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DE 2ª ORDEM EM SUSPENSÃO VEICULAR	
<i>Alaí de Souza Machado</i> <i>Pedro Henrique Rodrigues Taveira</i> <i>Filipe Gomes Soares</i> <i>Domingos dos Santos Ponciano</i> <i>Marcus Victor de Brito Rodrigues</i> <i>João Lucas Jacob Araújo</i> <i>Gean Carlos Moura Mota</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.47019050415</b>	
<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>178</b>
ANÁLISE AERODINÂMICA: SIMULAÇÃO FLUIDO DINÂMICA DO PROTÓTIPO EC-05 DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA EQUIPE COYOTE	
<i>Paulo Henrique Pereira Araujo</i> <i>Josué Alves Rodrigues Junior</i> <i>Thaiane Mayara Marques Licar</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.47019050416</b>	
<b>CAPÍTULO 17</b> .....	<b>190</b>
APLICAÇÃO DE SISTEMAS NEURO-FUZZY NA PREDIÇÃO DO COEFICIENTE DE SUSTENTAÇÃO DO AEROFÓLIO NACA 1412	
<i>Vitor Taha Sant'Ana</i> <i>Bruno Luiz Pereira</i> <i>Tobias Moraes</i> <i>Roberto Mendes Finzi Neto</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.47019050417</b>	

<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>195</b>
AVALIAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE ATIVO DE RUÍDO EM VENEZIANAS ACÚSTICAS COM CONFIGURAÇÕES DISTINTAS VIA ELEMENTOS FINITOS	
<i>Geisa Arruda Zuffi</i>	
<i>Fabiana Alves Pereira</i>	
<i>Marcus Antonio Viana Duarte</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.47019050418</b>	
<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>203</b>
ABSORVEDORES ACÚSTICOS DE RUÍDO: MODELAGEM NUMÉRICA	
<i>Fabiana Alves Pereira</i>	
<i>Geisa Arruda Zuffi</i>	
<i>Israel Jorge Cárdenas Nuñez</i>	
<i>Marcus Antonio Viana Duarte</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.47019050419</b>	
<b>CAPÍTULO 20</b> .....	<b>211</b>
INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ESCOLHA DAS DIMENSÕES DO RECEPTOR NO MÉTODO DO TRAÇADO DE RAIOS ACÚSTICOS	
<i>Henrique Gebran Silva</i>	
<i>Marlipe Garcia Fagundes Neto</i>	
<i>Pollyana Alves Resende</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.47019050420</b>	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES</b> .....	<b>228</b>



## MÉTODOS NUMÉRICOS: DIFERENÇAS FINITAS E GUIA DE ONDAS DIGITAIS 1D E 2D - COMPARATIVO DE FREQUÊNCIAS

### **Brenno Lobo Netto Peixoto**

Universidade Federal de Goiás - Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação  
Goiânia - GO – Brasil

### **Marlipe Garcia Fagundes Neto**

Universidade Federal de Goiás - Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação  
Goiânia - GO – Brasil

**RESUMO:** Este trabalho apresenta um estudo na comparação unidimensional e bidimensional entre dois métodos numéricos, guia de ondas digitais e diferenças finitas, para simulação do campo sonoro de salas, de modo a representar os fenômenos básicos de interação das ondas e seus efeitos na superfície das paredes. Na modelagem, adota-se uma fonte sonora como uma excitação impulsiva de meio período senoidal e amplitude unitária, localizada na região central, para estudo da propagação da onda 1D e 2D. Os parâmetros utilizados para a comparação foram velocidade de propagação ( $c$ ), frequência de simulação ( $f$ ,  $\omega$  e  $\lambda$ ), tempo de simulação ( $t$ ). Dentre as ferramentas empregadas, utiliza-se o programa computacional MATLAB 8.5 (R2015a).

Os resultados obtidos pelos métodos no estudo 1D mostraram-se satisfatórios para todas as frequências simuladas, de modo a destacar o fator estabilidade, baixo custo computacional

(abaixo de  $\epsilon$ ) e pouca diferença entre os métodos na comparação do custo computacional. Há equivalência para o caso bidimensional nas iterações iniciais, onde o número de reflexões nos obstáculos é baixo, porém com o aumento, observa-se divergência e aumento das dispersões de erro. Nota-se que o desempenho do custo computacional aumenta à medida que ocorre aumento da frequência de simulação, aliado ao aumento dos erros por dispersão.

**PALAVRAS-CHAVE:** Equação da onda, Guia de ondas digitais, Diferenças finitas.

**ABSTRACT:** This work presents a unidimensional and two - dimensional comparison between two numerical methods, digital waveguide and finite differences, to simulate the sound field of rooms, in order to represent the basic wave interaction phenomena and their effects on the surface of the walls. In the modeling, a sound source is adopted as a impulsive half-period impulse excitation and unit amplitude, located in the central region, to study the propagation of wave 1D and 2D. The parameters used for the comparison were propagation velocity ( $c$ ), simulation frequency ( $f$ ,  $\omega$  e  $\lambda$ ), simulation time ( $t$ ). Among the tools used, the computer program MATLAB 8.5 (R2015a) is used.

The results obtained by the methods in the 1D study were satisfactory for all the simulated

frequencies, in order to highlight the stability factor, low computational cost (less than 10 s) and little difference between the methods in the comparison of the computational cost. There is equivalence for the two-dimensional case in the initial iterations, where the number of reflections in the obstacles is low, but with the increase, we observe divergence and increase of the error dispersions. It is noted that the computational cost performance increases as the simulation frequency increases, together with the increase of the dispersion errors.

**KEYWORDS:** Wave Equation, Digital Wave Guide, Finite Differences.

## 1 | INTRODUÇÃO

A acústica é a ciência que estuda os sons e/ou ruídos e sua propagação em diferentes meios (líquido, sólido ou gasoso), bem como sua interação com o homem. O som pode ser definido de dois tipos, 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; genericamente, pode ser definido como uma variação de pressão que gera uma excitação do mecanismo auditivo, resultando na percepção do som (Silva, 1971).

Ao se propagarem, as ondas sonoras podem encontrar obstáculos, os quais podem ser compreendidos como superfícies geométricas sólidas, como barreiras, paredes e anteparo. Nesse sentido, parte do som sofre reflexão, absorção e transmissão. Tais fenômenos dependem significativamente das características físicas desses obstáculos (Ferreira, 2010), que, por sua vez, conectam a impedância acústica, devido à sua primordial importância para a caracterização da onda em diferentes meios de propagação.

Atualmente, uma grande dificuldade da engenharia é apresentar para a sociedade melhorias na qualidade de vida baseado nos conhecimentos existentes. Tratando-se de qualidade acústica de ambientes, é importante que os métodos de modelagem acústica empregados possibilitem uma leitura fiel dos sinais acústicos captados por cada receptor (Moura, 2005). Esta modelagem é classificada em analítica, experimental e numérica. A modelagem de forma analítica apresenta elevada confiabilidade, entretanto, possui elevadas restrições quanto a geometria e fenômenos físicos. A modelagem experimental apresenta ampla aplicação e abrangência, no entanto exige custos elevados devido a necessidade de equipamentos para instrumentação, além de não se tratar de um tipo previsional de modelagem. A modelagem numérica, mesmo tendo necessidade de um computador para as simulações, possui grande possibilidade de estudos com geometrias variadas e a qualidade previsional.

Dentre as ferramentas numéricas a serem utilizadas, segundo Courant et al. (1928) e Silva (2013), a mais clássica delas é o método das diferenças finitas (*Finite Difference Method - FDM*). Tal método é adotado de maneira preferencial

para pequenos espaços fechados em baixas frequências, devido ao elevado custo computacional requerido (Moura,2005). A precisão dele é dependente da aproximação dos operadores de diferenças finitas utilizados e da discretização da malha. Quanto maior o refinamento da malha maior sua precisão, entretanto maior a dimensão do problema a ser resolvido.

O FDM foi utilizado por SILVA NETO (2004), na modelagem acústica de metodologias de processamento e imageamento sísmico, em modelos com estrutura geológica complexa. Denota-se que o FDM de alta ordem permite a discretização em malhas mais esparsas que em baixa ordem, além de que na primeira ocorra sem dispersão numérica, o que não acontece em esquemas na segunda condição.

De acordo com Gerges (2000), o elemento da malha de FDM deve ser, entre e vezes menor que o comprimento de onda, para obtenção de resultados confiáveis. Isso significa que para médias ou altas frequências o elemento deve ser bastante pequeno, conseqüentemente maiores matrizes a serem resolvidas. Com matrizes maiores, é possível superar a capacidade de armazenamento da memória RAM.

A outra técnica empregada foi o método de guias digitais de ondas ou (*Digital Wave Guide - DWG*). Tal ferramenta de modelagem é considerada simples devido a operação em regime unidirecional das guias digitais de ondas, ponto a ponto, ao longo de todo o espaço analisado.

A DWG foi utilizada por Moura (2005) no estudo da equação da onda em campo livre. 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, 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.

Neste contexto, o trabalho apresenta a comparação unidimensional e bidimensional entre dois métodos numéricos para simulação do campo sonoro de salas, de modo a representar os fenômenos básicos de interação das ondas e seus efeitos na superfície das paredes. Para tanto, sugere-se analisar comparativamente as metodologias para a mesma resolução temporal, e comparar o tempo de simulação, devido à importância da característica custo computacional envolvida às técnicas numéricas. Na modelagem, adota-se uma fonte sonora como uma excitação de um impulso com meio período senoidal de amplitude unitária, localizada na região central, para estudo da propagação da onda 1D e 2D. Os parâmetros utilizados para a comparação foram velocidade de propagação (341m/s), frequência de simulação (8kHz, 10kHz, 12kHz e 14kHz), tempo de simulação (0,3 s).

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As guias digitais de ondas são elementos lineares bidirecionais, construídos de forma a representar a solução de d'Alembert para a equação da onda (Moura,2005). Já as malhas de guias digitais de ondas, segundo Saviola et al (1995), são uma matriz de pontos discretamente espaçados por guias digitais de ondas unidimensionais, sendo estas, arranjadas ao longo de dimensões perpendiculares, tendo assim, nós ou juntas de dispersão posicionados nas regiões de interconexão, conforme Fig. 1.



Figura 1 – Desenho esquemático do posicionamento dos nós no caso 1D (as caixas representam os nós)

Considerando o meio homogêneo, as guias de ondas digitais possuem um mesmo valor de impedância em toda a vizinhança dos nós (juntas de dispersão). Segundo Moura (2005), o método DWG é constituído de elementos lineares bidirecionais com caráter unitário, tem-se que os valores de entrada em uma junta atual, em um instante  $zz$ , são os mesmos valores de saída das juntas vizinhas, em um instante imediatamente anterior,  $zz - 1$ . Desta forma tem-se as Eqs. (1) a (4).

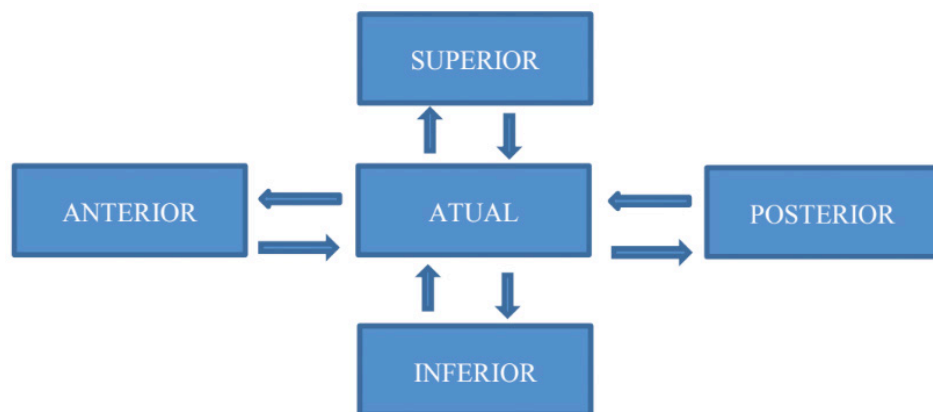


Figura 2 – Junta de dispersão para método DWG (as caixas representam os nós)

A Fig. 2 representa a estrutura da malha bidimensional completa, de modo a ter todos os elementos para a situação bidimensional.

$$P_{atual}^{Superior}(zz) = P_{superior}^{Inferior}(zz - 1) \quad (1)$$

$$P_{atual}^{Posterior}(zz) = P_{posterior}^{Anterior}(zz - 1) \quad (2)$$

$$P_{atual}^{Inferior}(zz) = P_{inferior}^{Superior}(zz - 1) \quad (3)$$

$$P_{atual}^{Anterior}(zz) = P_{anterior}^{Posterior}(zz - 1) \quad (4)$$

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 (DUYNE e SMITHIII,2003), conforme Fig. 3. Já a malha TDWG, segundo Boaventura (2009), trata-se de uma tentativa de aprimoramento da malha SDWG, visto que há a adição de mais direções de propagação da onda. Para análise bidimensional, optou-se pela malha SDWG.

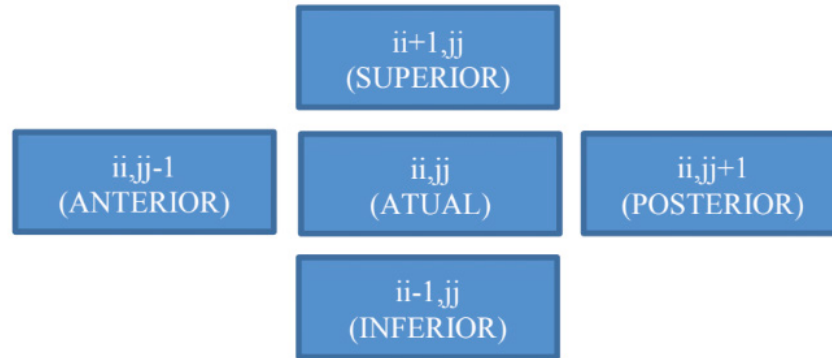


Figura 3 – Desenho esquemático do posicionamento dos nós na malha SDWG (as caixas representam a malha)

O método DWG unidimensional apresenta discretizações temporal ( $dt$ ) e espacial ( $dx$ ) conforme as Eq. (5) e (6). Onde  $f_s$  é a frequência de simulação,  $C$  é a velocidade de propagação do som no ar e  $N$  representa o número de dimensões espaciais, ou seja, o número de dimensões de guias das ondas que se cruzam em cada junta (Saviola et al, 1996).

$$dt = \frac{1}{f_s} \quad (5)$$

$$dx = \frac{c\sqrt{N}}{f_s} \quad (6)$$

O método DWG bidimensional apresenta discretizações temporal ( $dt$ ) semelhante a Eq. (5) e espacial no eixo das abcissas ( $dx$ ) e das ordenadas ( $dy$ ) conforme a Eq. (6), entretanto  $N$  é igual a 2, devido às direções da disposição dos nós na malha SDWG.

Nos nós e nas condições de contorno do método DWG, tanto para 1D como 2D, há a necessidade de conexão das juntas. Tais conexões possuem influências das impedâncias, pressão da onda incidente e refletida. Para 1D, a equação final é a Eq. (7) e para 2D é a Eq. (8). Tem-se que índices  $ii$  e  $jj$  são posições no eixo das abcissas e ordenadas, respectivamente, para o vetor de pressão sonora,  $zz$  refere-se ao intervalo de tempo, e os termos  $R$  referem-se as impedâncias característica.

$$P_{ii}^{zz} = R_{ante} \times P_{ii-1}^{zz-1} + R_{poste} \times P_{ii+1}^{zz-1} - (R_{ante} + R_{poste} - 1) \times P_{ii}^{zz-2} \quad (7)$$

$$P_{\ddot{u},jj}^{zz} = R_{ante} \times P_{\ddot{u},jj-1}^{zz-1} + R_{poste} \times P_{\ddot{u},jj+1}^{zz-1} + R_{infe} \times P_{\ddot{u}-1,jj}^{zz-1} + R_{supe} \times P_{\ddot{u}+1,jj}^{zz-1} - (R_{ante} + R_{poste} + R_{infe} + R_{supe} - 1) \times P_{ii,jjzz} - 2 \quad (8)$$

Na Eq. (7), nota-se que o termo de interesse é o somatório de parcelas das pressões anterior ( $ii - 2$ ) e posterior ( $ii + 2$ ) defasadas no tempo ( $zz - 1$ ) e subtraídas de um terceiro termo, para evitar repetições devido ao efeito da reflexão, conforme a Fig. 1.

Na Eq. (8), nota-se que a estrutura é semelhante ao caso unidimensional, entretanto tem-se o somatório das parcelas das pressões anterior ( $ii, jj - 2$ ), posterior ( $ii, jj + 1$ ), inferior ( $ii - 1, jj$ ) e superior ( $ii + 1, jj$ ) defasadas no instante de tempo ( $zz - 1$ ), e o efeito de correção da reflexão é representado pela subtração no ultimo termo, conforme a Fig.3.

Segundo Boaventura (2009), a caracterização do movimento da onda sonora e as iterações com os obstáculos estão intimamente ligadas às impedâncias acústicas específica do meio ( $Z$ ). A impedância específica do meio está fisicamente relacionada ao produto entre velocidade de propagação de onda no meio inserido e a densidade do fluido. Para Moura (2005), a impedância acústica é uma grandeza utilizada para caracterizar o meio de propagação de modo a relacionar as variáveis de força, velocidade e pressão, referentes ao movimento de ondas acústicas em sistema físico qualquer. Verifica-se a associação, desta forma, no caso unidimensional a influência de pressões acústicas das ondas anteriores e posteriores. Já para o caso bidimensional, tem-se a influência das pressões similares as anteriores com acréscimo das pressões superiores e inferiores.

Através de manipulações matemáticas, as impedâncias características nos nós adjacentes são dadas pela Eq. (9). Nota-se que termo  $Z_i$  refere-se a impedância específica do nó adjacente,  $Z_p$  refere-se a impedância específica do nó analisado e o ultimo termo do denominador da equação representa o somatório das impedâncias específicas adjacentes com exceção do referente ao oposto do analisado

$$R_i = \frac{(2 \times Z_i)}{(Z_p + \sum_{i=1}^{2N} Z_i)} \quad (9)$$

O método FDM unidimensional apresenta discretizações espacial ( $dx$ ) e temporal ( $dt$ ) conforme as Eq. (10) e (11). Destaca-se que  $\alpha$  e  $\beta$  são constantes que dependem da ordem da aproximação usadas no cálculo das derivadas espaciais e temporais na discretização da equação da onda, e  $c$  é a velocidade de propagação da onda no ar.

$$dx = \frac{c}{(\alpha \times fs)} \quad (10)$$

$$dt = \frac{dx}{(\beta \times c)} \quad (11)$$

Dada a equação da onda em meio acústico, no modelamento FDM a ideia central é substituir a equação diferencial por uma equação que envolva somente diferenças e quocientes finitos, onde não envolva valores infinitamente grandes ou pequenos. Por meio da série de Taylor, em conjunto com truncamentos e aproximações para as derivadas segundas, tem-se as Eq. (12) para o caso unidimensional e (13) para bidimensional. Os termos **a1** e **b1** das Eq. (12) e (13) podem ser definidos pelas Eq. (14) e (15). Opta-se por utilizar a variação espacial das abcissas igual a variação espacial das ordenadas no caso bidimensional.

$$P_{ii}^{zz-1} = -\left(\frac{1}{12}\right)\left\{a1 \times \left[ P_{ii-2}^{zz} + P_{ii+2}^{zz} - 16 \times (P_{ii-1}^{zz} + P_{ii+1}^{zz}) \right] \right. \\ \left. + 2 \times P_{ii}^{zz} - P_{ii}^{zz-1} \right\} \quad (12)$$

$$+ b1 \times \left[ P_{ii,jj-2}^{zz} + P_{ii,jj+2}^{zz} - 16 \times (P_{ii,jj-1}^{zz} + P_{ii,jj+1}^{zz}) \right] \left. \right\} + 2 \\ \times P_{ii,jj}^{zz} - P_{ii,jj}^{zz-1} \quad (13)$$

$$a1 = \left(\frac{c \times dt}{dx}\right)^2 \quad (14)$$

$$b1 = \left(\frac{c \times dt}{dy}\right)^2 \quad (15)$$

## METODOLOGIA

Esta subdivisão apresenta as metodologias utilizadas para a construção das modelagens, bem como os detalhes de cada ferramenta numérica. Dentre as ferramentas empregadas, aplica-se a análise unidimensional (1D) e a bidimensional (2D) para atingir os objetivos de interesse, utiliza-se o programa computacional MATLAB 8.5 (R2015a) para a implementação do método DWG e FDM em um computador Intel Core i5-2410M, 6GB RAM, 640GB HDD.

Tanto para as análises unidimensionais como bidimensionais, adota-se a fonte sonora como uma excitação de um impulso senoidal de amplitude unitária, conforme a Eq. (16).

$$P = 1 \times \text{sen}(2 \times \pi \times fa \times ta) \quad (16)$$

Onde **ta** é o vetor de tempo correspondente a meio período da onda, com incremento temporal igual a **dt**, representando um impulso na configuração de meio seno e **fa** representa a frequência de excitação. Assim, para uma frequência de excitação de 250 Hz o vetor de tempo possui valor final igual a 0,002 s. Na Fig. 4 apresenta a fonte de excitação ao longo do tempo.

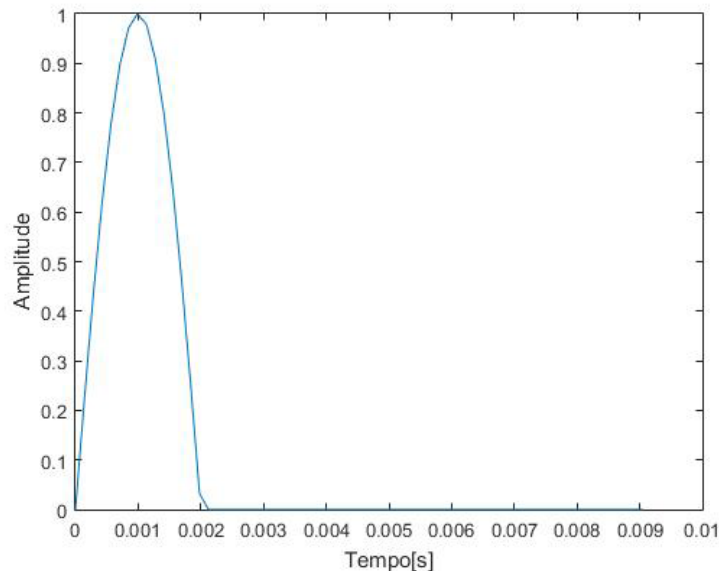


Figura 4 – Fonte impulso senoidal com amplitude unitária (1D)

No caso 1D, para ambos os métodos, 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 paredes. No projeto, frequência de simulação foi variada em 2 *kHz* de 8 *kHz* à 14 *kHz* e o tempo de simulação em 0,3 *s* é escolhida para a análise comparativa. As frequências de simulação escolhidas permitem a análise comparativa entre os métodos numéricos para os mesmos parâmetros de resolução temporal e resolução espacial – visto que esses parâmetros no FDM dependem das constantes  $\alpha$  e  $\beta$ . Ademais, permite melhor visualização para análise de reflexão das ondas sonoras, recomendada de no mínimo vezes maior que a frequência de excitação conforme mencionado por Moura (2005).

Já para o caso 2D, para ambos os métodos, 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. 5. Na Fig. 6 nota-se a fonte impulso com amplitude unitária no ambiente de simulação bidimensional (sala). O tempo de simulação, frequências de excitação e frequências de simulação são semelhantes aos da situação 1D.



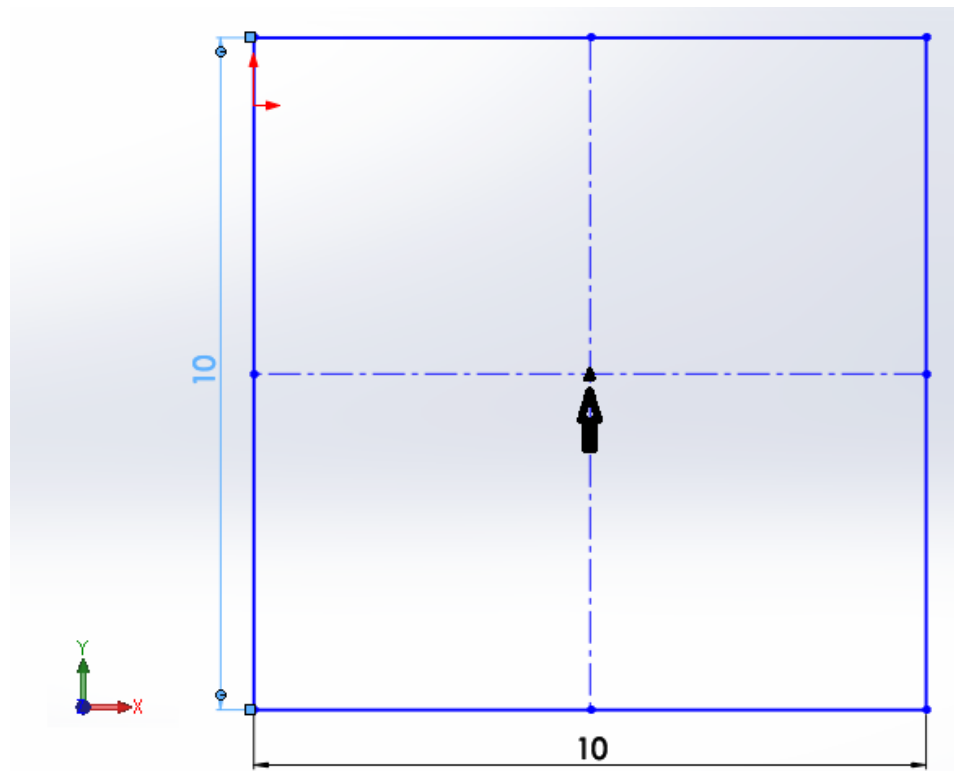


Figura 5 – Ambiente de simulação bidimensional com cotas e posicionamento da fonte indicado pela seta

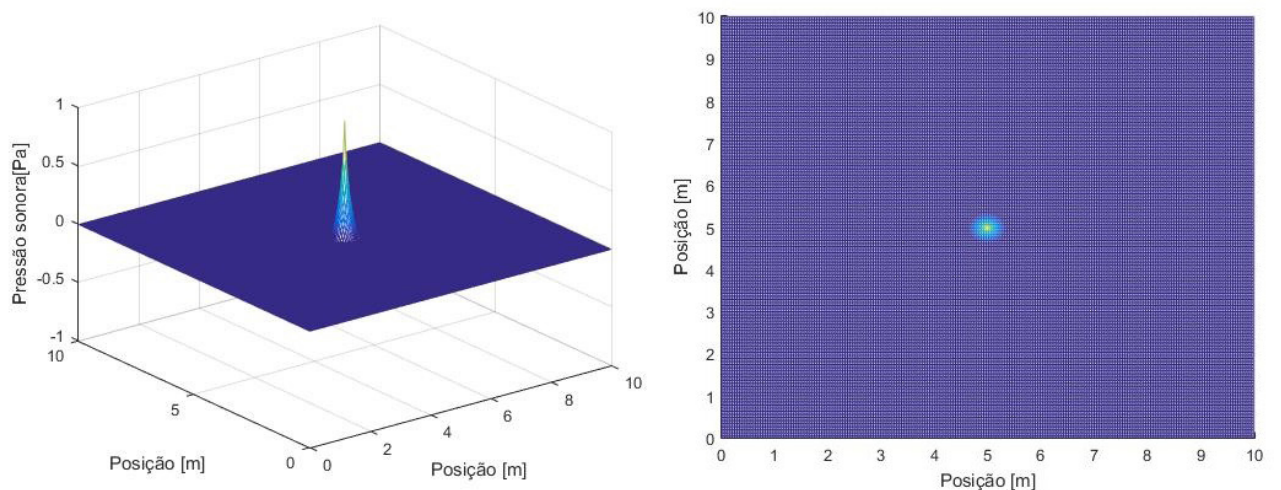


Figura 6 – Fonte impulso senoidal com amplitude unitária (2D)

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram gerados gráficos de ambas soluções numéricas, de modo a optar para as condições unidimensional e bidimensional a análise comparativa dada ao longo do tempo do nó, que corresponde a posição central das dimensões. No caso unidimensional, a posição escolhida foi a posição média do domínio, assim como no caso bidimensional.

A Fig.7 e Fig.8 apresentam a comparação dos métodos DWG e FDM unidimensional com as mesmas condições de amostragem e parâmetros (tempo de excitação da fonte, tempo final de simulação, frequência característica, frequência de

simulação, variação espacial no eixo das abcissas, amplitude da onda e condição inicial de pressão).

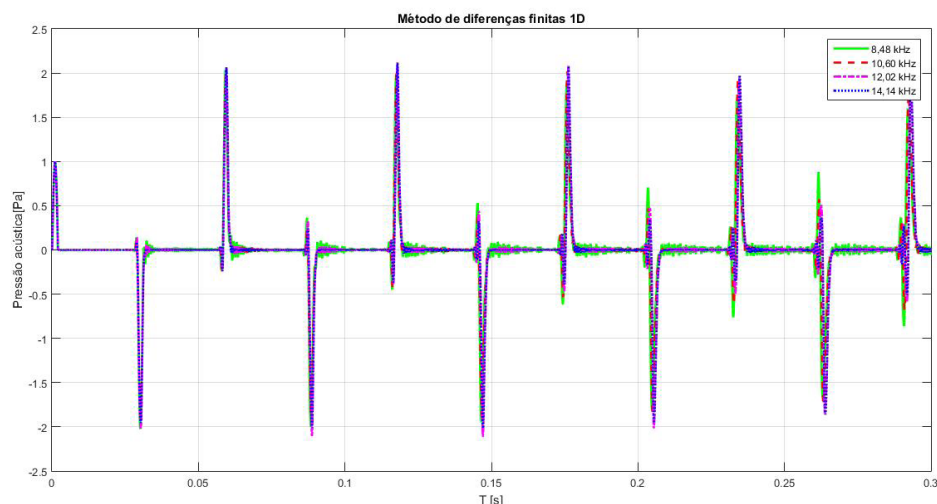


Figura 7 – Comparação por sobreposição do método Waveguide (1D)

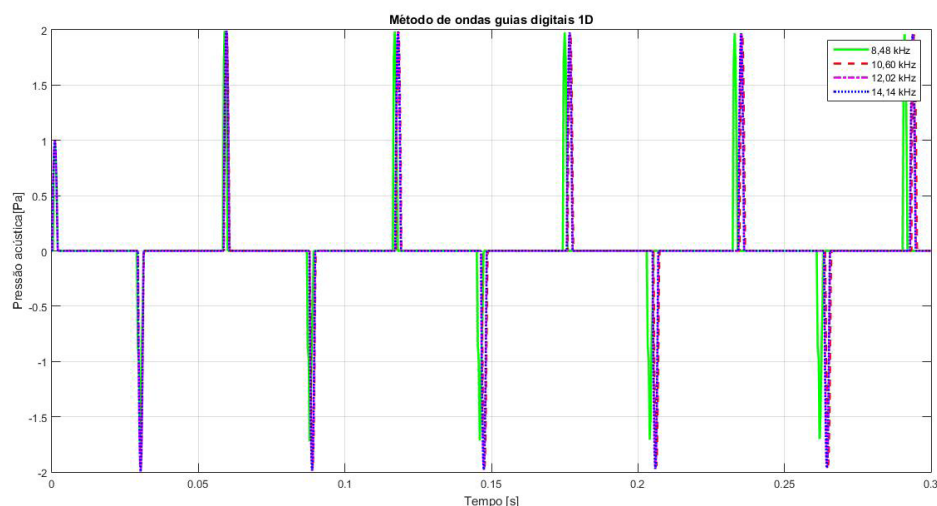


Figura 8 – Comparação por sobreposição do método Diferenças Finitas (1D)

Nas Fig. 7 e Fig.8, nota-se que o intervalo de tempo para a onda retornar a posição inicial (posição central), corresponde a distância de 10 m menos 5 m se propagando até a parede e mais 5 m devido a reflexão com a parede. Devido a velocidade de propagação da onda no ar, 341 m/s, espera-se um intervalo de tempo igual a 0,0292 s para a onda percorrer a distância de 10 m. De fato, observa-se que próximo a 0,03 s há a ocorrência da onda gerada retornando ao ponto de excitação. Tal evento, também é observado nos demais instantes de tempo, múltiplos de 0,03 s, que correspondem a distâncias percorridas iguais a 20 e 30 m. Deste modo, as modelagens 1D para a DWG e FDM possuem concordância com a propagação e reflexão de ondas.

As Fig. 9 e 10 apresentam a comparação dos métodos DWG e FDM bidimensional. Para as mesmas condições de amostragem e parâmetro (tempo de excitação da fonte,

tempo final de simulação, frequência característica, frequência de simulação, variação espacial no eixo das abcissas, amplitude da onda, condição inicial de pressão), é possível comprovar um mesmo comportamento da onda.

Nota-se nas Fig.9 e 10, que o intervalo de tempo para a onda retornar a posição inicial (posição central), corresponde a distância de 10 m menos 5 m se propagando até a parede e 5 m devido a reflexão com as paredes no caso 2D. Devido a velocidade de propagação da onda no ar, 341 m/s, espera-se um intervalo de tempo igual a 0,028 s para a onda percorrer a distância de 10 m. De fato, observa-se que próximo a 0,03 s há a ocorrência da onda gerada retornando ao ponto de excitação. Deste modo, as modelagens 2D para a DWG e FDM possuem concordância com a propagação e reflexão de ondas.

Nas simulações unidimensional e bidimensional para tempo de simulação de 0,1 s não houveram problemas de defasagem do sinal. Logo, acredita-se que o erro é devido as condições de contorno que representam as paredes. Isto é, o FDM e DWG conseguem representar bem o efeito da reflexão em 1D e 2D, conforme Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10.

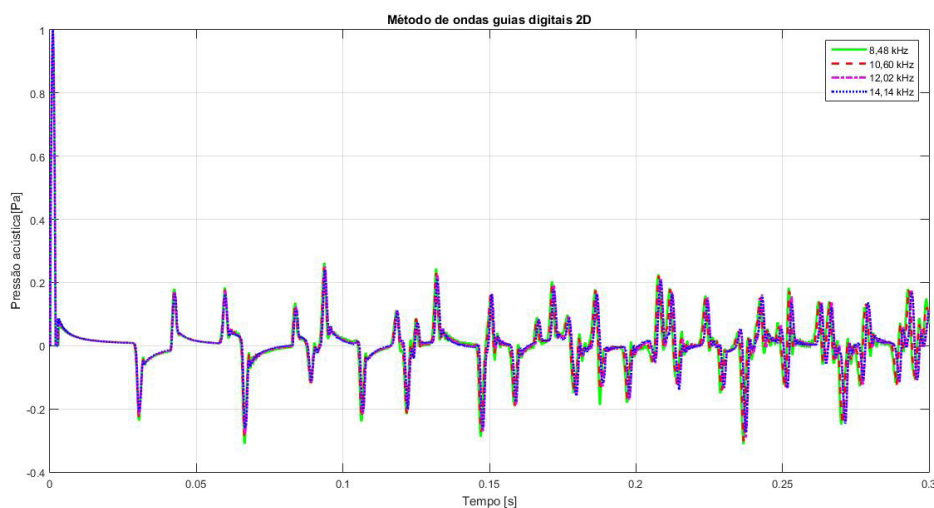


Figura 9 – Comparação por sobreposição do método Waveguide (2D)

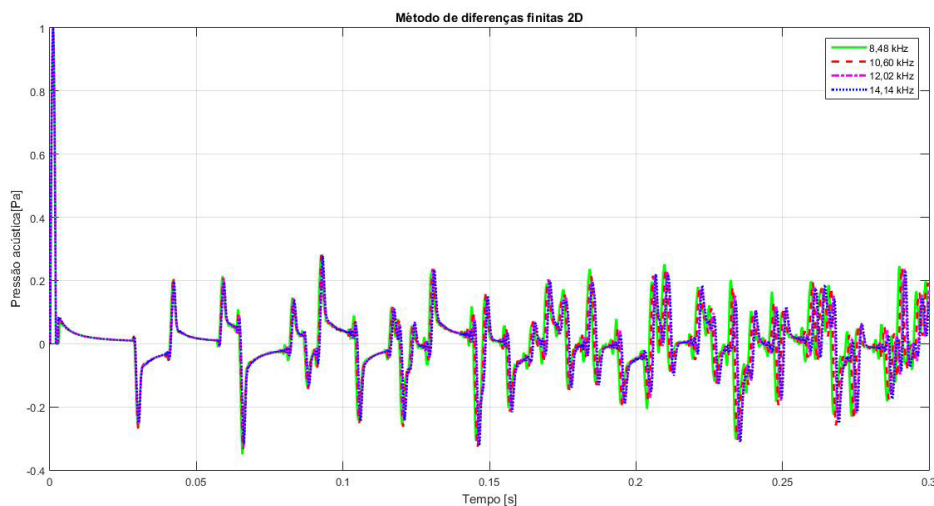


Figura 10 – Comparação por sobreposição do método Diferenças Finitas (2D)

Nos tempos de simulação da Fig. 9 e 10, há uma seta apresentando um instante de tempo interessante, que expressa que o FDM tem mais energia que o DWG, além do fato de que em um mesmo método não haver influência expressiva na pressão sonora.

Devido ao elevado número de reflexões nas paredes e acúmulos de erros devido os métodos numéricos após 0,1 s ambos os métodos apresentam divergência. Conforme analisado na Fig. 9 e 10, a divergência existente nos métodos numéricos comparados torna-se expressivo.

Nas simulações unidimensional e bidimensional para tempo de simulação de não houveram problemas de defasagem do sinal. Logo, acredita-se que o erro é devido as condições de contorno que representam as paredes. Isto é, o FDM e DWG conseguem representar bem o efeito da reflexão em 1D e 2D, conforme Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10.

Faz-se uso dos campos sonoro apresentado na Fig.11 na sala bidimensional para o instante de 0,292 s para auxiliar a visualização da análise comparativa entre as duas técnicas. O tempo de 0,292 s representa o tempo indicado com uma seta nas Fig. 9 e Fig.10.

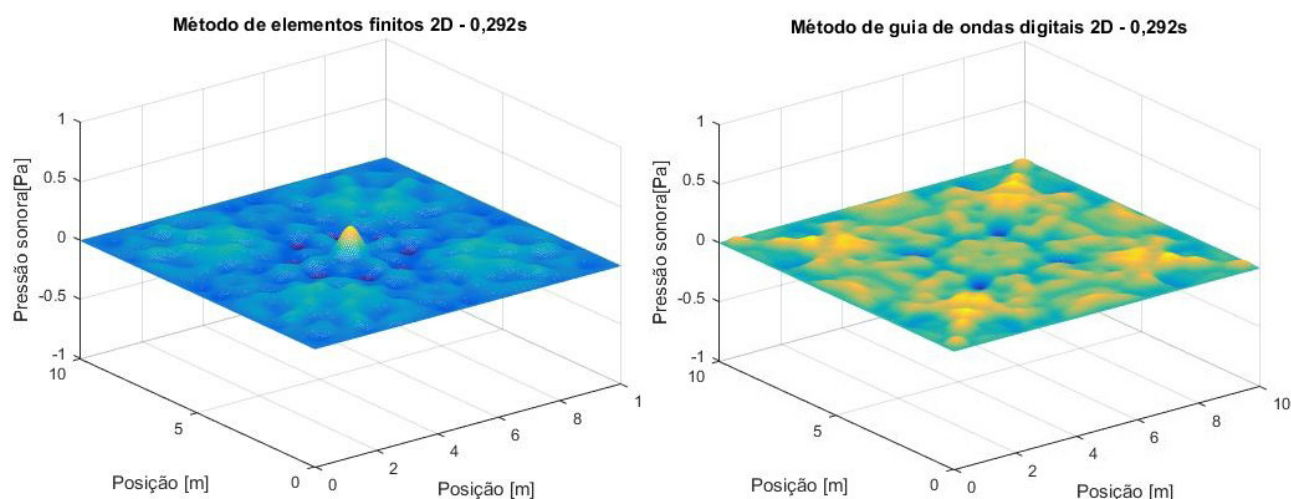


Figura 11– Visualização dos métodos Waveguide e Diferenças Finitas (2D) em 0,292s

Na simulação 2D, Fig. 11, nota-se diferença no comportamento das pressões acústicas quanto ao tempo e ao espaço. A diferença existente tem como explicação os truncamentos e aproximações para realizar o método FDM, além de considerar para o método DWG cada nó do ambiente.

Finalmente, tem-se nas Tab. 1 e Tab.2 os parâmetros relativos a média dos tempos de 5 simulações para cada método em cada dimensão. Nota-se que para os métodos numéricos simulados em apenas uma dimensão, o FDM assemelha-se ao DWG quanto ao custo computacional para todas as frequências simuladas. Tal situação, entretanto, para o caso bidimensional, não se mantém. Para a situação 2D, verifica-se que o método FDM torna-se mais viável, visto que o tempo de simulação é

aproximadamente dez vezes menor comparado ao método DWG.

Unidimensional				
	8 kHz	10 kHz	12 kHz	14 kHz
FDM	4,05 s	4,56 s	4,93 s	7,10 s
DWG	2,11 s	5,05 s	5,31 s	7,60 s

**Tabela 1.** Comparação de tempos de simulação unidirecional

Bidimensional				
	8 kHz	10 kHz	12 kHz	14 kHz
FDM	18,94 s	31,49 s	44,55 s	88,90 s
DWG	137,1 s	335,31 s	407,54 s	912,20 s

**Tabela 2.** Comparação de tempos de simulação bidimensional

Embora o método DWG apresente custo computacional elevado, devido apresentar discretização por nó, verifica-se a vantagem simulação de ambientes com obstáculos internos. Tal fator torna-se inviável para o método FDM, visto que trata-se de uma modelagem apenas da equação da onda acústica, logo torna a modelagem restrita a ambientes simples.

## CONCLUSÃO

Os resultados 1D e 2D se mostraram boas aproximações para a resolução da propagação do campo acústico em uma sala, com os parâmetros de qualidade acústica de ambiente.

Observou-se que o método de guia de ondas digitais em 1D apresentou-se satisfatório conforme o desempenho quanto ao tempo de resposta (Tab. 1) e estabilidade (Fig. 7) assim como ao método de diferenças finitas. Para a análise em 2D nota-se que ambos os métodos entregam simulações semelhantes, entretanto o FDM torna-se mais recomendado para ambientes sem obstáculos devido ao menor custo computacional. Ao considerar ambientes com obstáculos, embora apresente elevado custo computacional, o DWG é mais satisfatório.

Os trabalhos futuros estão direcionados para a evolução do modelo matemático dos métodos bidimensionais quanto a caracterização dos meios livres, simulação de fontes mais complexas, verificação do erro de dispersão, assim como a implementação do método de guias de ondas digitais com uso de malhas triangulares.

## REFERÊNCIAS

Silva, Ana Sílvia F. C., **Modelling Light Scattering in the Human Retina**, FCTUC Física Tese Mestrado – University of Coimbra, 2013

BOAVENTURA, Ana Paula Freitas Vilela. **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.

Courant, R., Friedrichs, K. and Lewy, H., 1928, “**On the Partial Difference Equations of Mathematical Physics**”, *Mathematische Annalen*, Vol. 100.

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, 2000.

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

Savioja L e al et **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.

Saviola et al. **Determination of the Low Frequency Behaviour of an IEC Linstening Room** – Helsinki : *Proceedings of the Nordic Accoustical Meeting NAM'96*, pg 637-641, 12-14 de June de 1996.

SILVA, V. M. da C. **Ruído**. 1998. Monografia de Conclusão do Curso (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho - Departamento de Engenharia de Produção)Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 1998.

SILVA NETO, F. A. **Modelagem acústica por diferenças finitas e elementos finitos em 2-D e 2.5-D**. 2004. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal do Pará, . 2004.

VAN DUYNE S. e SMITHIII J. O, **Physical Modeling with the 2D Digital Waveguide Mesh**, Center for Computer Research in Music and Acoustic (CCRMA, Dep.of Music , Stanford University, Stanford CA, 2003

## **SOBRE OS ORGANIZADORES**

**Henrique Ajuz Holzmann** - Professor assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutorando em Engenharia e Ciência dos Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

**João Dallamuta** - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Engenheiro de Telecomunicações pela UFPR. Especialista em Inteligência de Mercado pela FAE Business School. Mestre em Engenharia pela UEL. Trabalha com os temas: Inteligência de Mercado, Sistemas Eletrônicos e Gestão Institucional.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-247-0

