



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

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

CAPÍTULO 1	1
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>	
DOI 10.22533/at.ed.4701905041	
CAPÍTULO 2	14
USO DE MALHAS NÃO-ESTRUTURADAS NA RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DA DIFUSÃO	
<i>Gabriel Marcos Magalhães</i> <i>Alessandro Alves Santana</i>	
DOI 10.22533/at.ed.4701905042	
CAPÍTULO 3	29
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>	
DOI 10.22533/at.ed.4701905043	
CAPÍTULO 4	43
INFLUÊNCIA DA DISCRETIZAÇÕES ESPACIAL E TEMPORAL EM PROBLEMA PURAMENTE ADVECTIVO	
<i>Thiago Fernando Santiago de Freitas</i> <i>Andreia Aoyagui Nascimento</i>	
DOI 10.22533/at.ed.4701905044	
CAPÍTULO 5	53
FRONTEIRA IMERSA PARA CORPOS ESBELTOS	
<i>João Rodrigo Andrade</i> <i>Aristeu Silveira Neto</i>	
DOI 10.22533/at.ed.4701905045	
CAPÍTULO 6	61
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>	
DOI 10.22533/at.ed.4701905046	
CAPÍTULO 7	69
ESTUDO NUMÉRICO DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA TRANSIENTE EM PLACAS	
<i>William Denner Pires Fonseca</i>	

*Taísa 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

CAPÍTULO 13	146
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>	
DOI 10.22533/at.ed.47019050413	
CAPÍTULO 14	157
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>	
DOI 10.22533/at.ed.47019050414	
CAPÍTULO 15	169
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>	
DOI 10.22533/at.ed.47019050415	
CAPÍTULO 16	178
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>	
DOI 10.22533/at.ed.47019050416	
CAPÍTULO 17	190
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>	
DOI 10.22533/at.ed.47019050417	

CAPÍTULO 18	195
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>	
DOI 10.22533/at.ed.47019050418	
CAPÍTULO 19	203
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>	
DOI 10.22533/at.ed.47019050419	
CAPÍTULO 20	211
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>	
DOI 10.22533/at.ed.47019050420	
SOBRE OS ORGANIZADORES	228

INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ESCOLHA DAS DIMENSÕES DO RECEPTOR NO MÉTODO DO TRAÇADO DE RAIOS ACÚSTICOS

Henrique Gebran Silva

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

Pollyana Alves Resende

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

RESUMO: O presente trabalho apresenta um estudo da influência da escolha das dimensões do receptor, para o cálculo do tempo de reverberação de recintos através da teoria geométrica, mais especificamente pelo método do traçado de raios acústicos. Como referência para avaliação dos resultados deste do método foram utilizados os métodos estatísticos de Sabine e Eyring, que, para principal sala estudada, resultaram em tempos de reverberação de 3,89 e 3,77 respectivamente. Os resultados revelaram que os diâmetros sugeridos pela literatura nem sempre são adequados, revelando a necessidade de estudos mais aprofundados como propósito complementar a vaga abordagem deste parâmetro pela literatura. Para valores de raios pequenos o tempo de reverberação apresentou

concordância com acústica estatística.

PALAVRAS-CHAVE: tempo de reverberação, traçado e raios acústicos, dimensões do receptor.

ABSTRACT: This article presents a study about the influence of selection of a receptor's dimension, to the analysis of the reverberation time through the geometric theory, specifically, using the ray acoustics. Using the Sabine and Eyring statistical method as a reference, to compare and evaluate the results, which, for the main-studied room, presented 3.89 and 3.77, respectively. The results indicate that the bibliography's suggested diameters are not always suitable, leading to a need of more specific studies, aiming to fulfil this approach. For small ray acoustics, the reverberation time corresponds to the statistical acoustic, as expected.

KEYWORDS: reverberation time, ray acoustics, receptor's dimension.

INTRODUÇÃO

A acústica em recintos como salas, auditórios, um estúdio de gravação e galpões industriais deve ser adequada para cada ambiente. Inúmeros fatores alteram as características acústicas de um ambiente fechado, como as propriedades acústicas das

superfícies dos materiais presentes, bem como a geometria, o volume do próprio recinto, área das paredes e móveis. Fatores como o volume, dimensões e materiais das superfícies da sala, podem ser mudados e alterados para adequar as necessidades e características desejáveis para cada caso.

Há uma série de normas para regulamentar a exposição dos seres humanos a sons de grande intensidade. A preocupação com a intensidade dos sons, não só pela a saúde, mas também pelo o conforto acústico para cada tipo de ambiente é de extrema importância e vem sendo alvo de diversos estudos. Em uma fábrica, o operário não deve passar grande quantidade de tempo exposto a ruídos de elevada intensidade, pois a perda auditiva e algumas doenças e estão associadas à exposição sonora em níveis elevados de ruído. Destaca-se, também, que, mas mesmo em salas de aula, bibliotecas e escritórios o ruído pode causar incômodo e provocar perda da produtividade, diante desses fatos deve-se buscar um conforto acústico adequado para cada tipo de ambiente.

A intensidade do som é uma característica importante, principalmente no que se refere a saúde, mas outras características também devem ser observadas para a qualidade acústica do ambiente. O tempo de reverberação é uma característica essencial para o bom entendimento da fala e distinção dos sons, sendo uma das principais preocupações, talvez a maior delas, em um projeto acústico. O tempo de reverberação era o único parâmetro que relacionava o fenômeno físico com as impressões produzidas nas pessoas. Hoje há vários outros parâmetros diferentes, por volta de dez, podem relacionar o comportamento físico da sala com diferentes tipos de sensações auditivas, como por exemplo: intensidade, impressão espacial, clareza, brilho, presença, textura, etc. (GERGES, 2000).

A acústica de uma sala, atualmente, pode ser projetada ou prevista fazendo uso de uma série de ferramentas previsionais, dentre elas a acústica estatística e geométrica são usadas para estimar o tempo de reverberação. Os métodos estatísticos, como os métodos de Sabine e Eyring, levam em conta o volume do recinto, as áreas das superfícies e os respectivos coeficientes de absorção, enquanto a acústica geométrica, como a teoria dos raios acústicos, leva em conta também a geometria da sala. Para cada tipo de ambiente há uma necessidade diferente de tempo de reverberação, pois ele está diretamente ligado com a inteligibilidade e sensações provocadas no homem.

Ambientes nos quais se prioriza a inteligibilidade da fala, necessitam de tempos de reverberação menores, para que um som não se sobreponha ao anterior. Salas médias e pequenas, usadas para escritórios, conferências ou aulas, devem ter o tempo de reverberação de 0,5 segundos, enquanto salas de música em geral devem ser mais reverberantes como pode-se observar na Fig. (1).

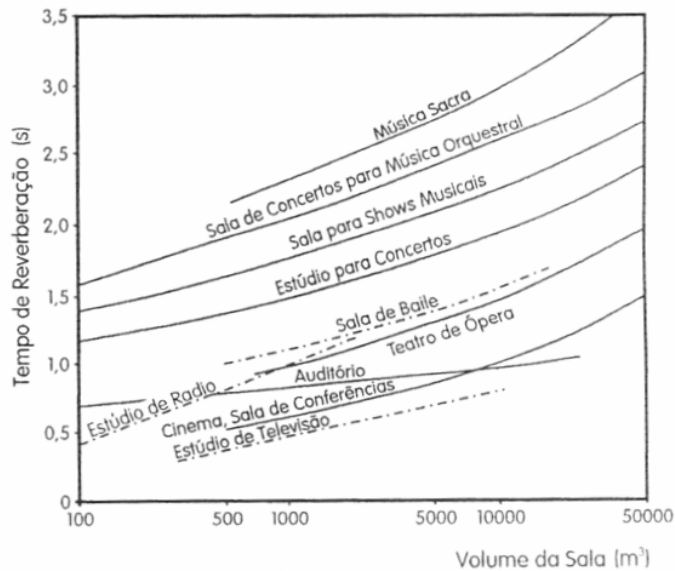


FIGURA 1 - Tempo ótimo de reverberação (GERGES, S.N.Y., 2000. p. 267)

A teoria dos raios acústicos trata o som como raios, dividindo a energia sonora emitida pela fonte em diversos raios que propagam pelo ambiente, levando em conta propriedades geométricas que não são contempladas nos métodos estatísticos.

Visto isto, o presente artigo explora a aplicação da teoria de raios acústicos no projeto de ambientes fechados, para a determinação do tempo de reverberação, visando obter maior precisão com relação aos diversos métodos analíticos.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A forma com que a energia sonora de um recinto decai depende de vários fatores e características da sala. Quando se liga uma fonte sonora qualquer em um ambiente fechado, a energia se eleva até atingir um nível sonoro estacionário, uma condição de equilíbrio. Quando esta situação é atingida a energia sonora absorvida pelo recinto, suas paredes, piso, teto, móveis e todas as superfícies, é exatamente igual a energia injetada pela fonte sonora (BISTAFA, 2011).

Quando uma onda sonora incide em uma superfície, parte da energia é refletida de volta para o meio de onde veio, parte é transmitida pela parede e a energia restante é transformada em calor, sendo dissipada, como mostrado na Fig. (2). Comumente se agrupa as duas últimas parcelas citadas, se referindo a elas como energia absorvida, que seria a fração que não “retorna” da parede para o recinto.

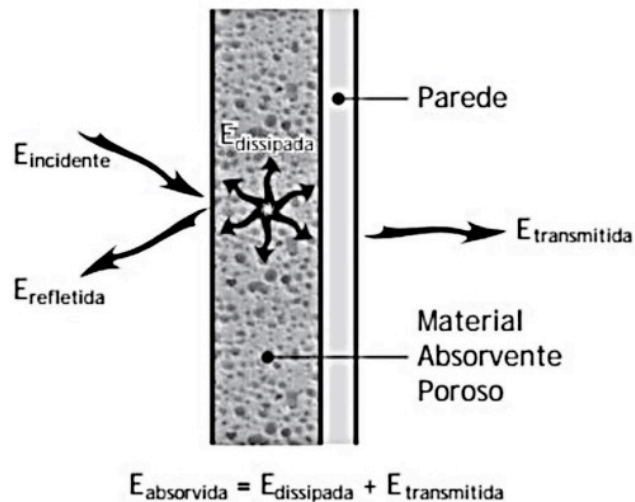


FIGURA 2 - Balanço energético som incidente (BISTAFA, Sylvio R., 2011, p.279.)

A capacidade de uma superfície qualquer de absorver o som é dada pela relação entre a intensidade absorvida pela incidente, muitas vezes, convenientemente a primeira pode ser expressa como a diferença da intensidade incidente e refletida como indicado na Eq. (1). A essa característica das superfícies se dá o nome de absortividade ou coeficiente de absorção.

$$\alpha = \frac{I_{\text{absorvida}}}{I_{\text{incidente}}} = \frac{I_{\text{incidente}} - I_{\text{refletida}}}{I_{\text{incidente}}} = 1 - \frac{I_{\text{refletida}}}{I_{\text{incidente}}} \quad (1)$$

A absortividade é uma característica obtida experimentalmente, apesar de haverem muitas tabelas na literatura com valores para inúmeros materiais, é recomendado medi-la experimentalmente devido à sua grande variação de acordo com a origem dos dados.

Quanto maior a absortividade das superfícies de um recinto menor será o tempo de decaimento de energia, ou seja, mais rapidamente o som irá se dissipar. A escolha dos materiais e objetos de uma sala, no que se refere às características acústicas, deve ser de acordo com a finalidade no ambiente, favorecendo o entendimento da fala, ou a musicalidade.

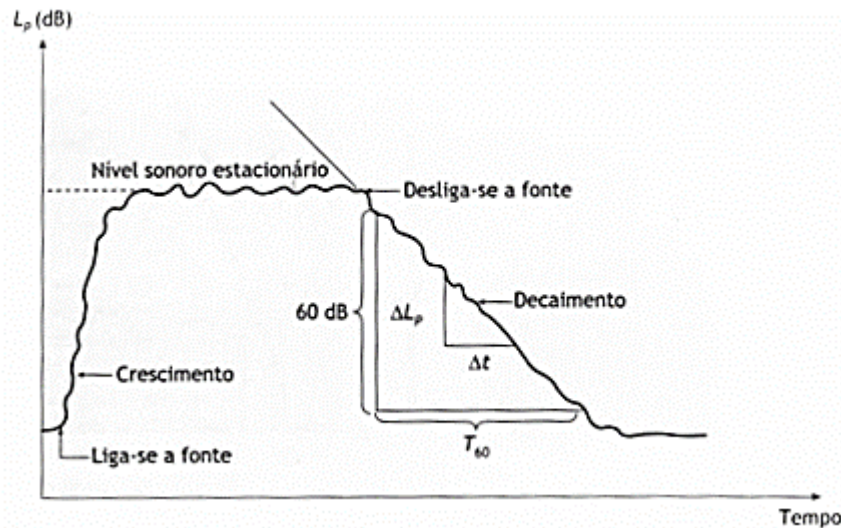


FIGURA 3 - Decaimento sonoro em recintos e tempo de reverberação (BISTAFA, Sylvio R., 2011, p.246.)

O tempo de reverberação (T_{60}), é definido como o tempo necessário para que o nível sonoro do recinto caia 60 dB, após o desligamento da fonte sonora. Muitas vezes não é possível observar uma queda no nível sonoro de 60 dB, sendo utilizados o T_{30} ou T_{20} que são feitos a partir de decaimentos menores, 30 e 20 dB respectivamente, e corrigidos proporcionalmente. Observa-se na Fig. (3), após o desligamento da fonte o nível sonoro, até então nível sonoro estacionário, irá decair a uma taxa aproximadamente constante.

Há muitas maneiras de se calcular o tempo de reverberação teórico de um recinto, os métodos podem ser baseados na teoria estatística ou na teoria geométrica, ambas válidas para alta densidade modal. A implementação dos métodos geométricos, depende de software adequado da construção do modelo 3D da sala. Métodos estatísticos geralmente levam em conta o volume do recinto, as áreas das superfícies e seus coeficientes de absorção. Os métodos mais convencionais para a determinação do tempo de reverberação são os estatísticos como Sabine e Eyring. (BRANDÃO, 2016)

Para salas com tempo de reverberações relativamente altos e com uniforme distribuição dos materiais de absorção, a fórmula de Sabine (1922), Eq. (2), é uma boa aproximação do provável comportamento sonoro da sala.

$$TR = 0,16 \frac{V}{\sum \alpha \cdot A} \quad (2)$$

Sendo:

TR – Tempo de reverberação;

V – Volume do recinto (m^3);

A – Área de cada material (m^2);

α – O coeficiente de absorção sonora.

Algumas pressuposições podem passar despercebidas pelo equacionamento

de Sabine, como a distribuição dos diferentes coeficientes da sala, assumindo uma distribuição uniforme. Este equacionamento também considera que cada reflexão independe das demais, o que não é verdade. Pode-se perceber pela Eq. (2) que se o coeficiente de absorvidade tender a 1 o tempo de reverberação não será zero como previsto, isto foi corrigido por Eyring como pode-se verificar na Eq. (3).

$$TR = \frac{-0,16V}{S \cdot \ln(1-\bar{\alpha})} \quad (3)$$

Sendo:

TR – Tempo de reverberação;

V – Volume do recinto (m³);

A – Área de cada material (m²);

α – O coeficiente de absorção sonora.

A teoria de raios acústicos é uma das teorias geométricas, apresentando a vantagem de levar em conta a geometria da sala, como paredes inclinadas, superfícies finitas e irregulares entre outras características não contempladas em métodos analíticos ou numéricos.

Segundo Gerges (2000), algumas considerações são feitas para a aplicação da teoria de raios, admite-se que o som se propaga como um raio de luz, com propriedades semelhantes às encontradas na ótica geométrica. O fenômeno mais importante da teoria em questão é a reflexão. Para esta simplificação, considera-se que o comprimento de onda (λ) é infinitamente pequeno, comparado com as dimensões da sala, para que isso ocorra a frequência deve ser grande, uma vez que são inversamente proporcionais como mostrado na Eq. (4).

$$c = \lambda \cdot f \quad (4)$$

Sendo:

c – Velocidade do som no meio;

f – Frequência da onda;

λ – Comprimento de onda.

O que traz uma restrição ao método, no que se refere à aplicabilidade para as baixas frequências. Uma relação para a frequência limite admitida por vários especialistas é dada pela Eq. (5) a seguir.

$$f_c = 2000 \sqrt{T/V} \quad (5)$$

Sendo:

T – Tempo de reverberação (s);

V – Volume do recinto (m³);

f_c – Frequência limite (Hz);

A teoria geométrica só é válida quando a sala possui alta densidade nodal. Para a modelagem do campo sonoro no recinto, a partir dessa teoria, é necessário dispor

da geometria tridimensional interna, com todas as superfícies desenhadas com algum detalhamento. As posições da fonte e do receptor devem ser definidas, assim como as propriedades acústicas de cada superfície (BRANDÃO, 2016).

As características da fonte e do receptor são necessárias para obter a distribuição temporal de energia sonora no sistema. Uma vantagem da teoria geométrica sobre a estatística é que ela permite a caracterização da fonte sonora. A posição da fonte dentro da sala, sua potência sonora, a orientação de seu eixo principal e sua direcionalidade, ou seja, como a energia radiada pela fonte é distribuída no espaço. Analogamente às fontes, os receptores podem fazer discriminação direcional da chegada de raios sonoros.

Para a implementação dos métodos geométricos é necessário definir os planos que compõe o recinto, aproximando cada superfície por um plano, ou conjunto de planos. Para ambientes vazios basta definir os planos das paredes que delimitam o recinto. Cada superfície deve, estar associada com seu coeficiente de absorvidade, ter um índice associado para sua identificação, vetores posição de seus vértices e vetor normal à superfície do plano. É importante conhecer a equação de cada plano apresentada na Eq. (6), bem como o vetor normal ao plano, disposto na Eq. (7) (BRANDÃO, 2016).

$$Ax + By + Cz = 1 \quad (6)$$

Sendo:

A, B e C – Coeficientes do plano.

$$\vec{l} = \vec{v}_0 + b\vec{n}_i \quad (7)$$

Sendo:

\vec{l} – Vetor posição de um ponto pertencente a linha;

\vec{v}_0 – Vetor posição associado a uma fonte;

b – Variável a ser obtida;

\vec{n}_i – Vetor normal.

Conhecendo as direções do vetor normal e portanto, a equação do plano, pode-se determinar a direção do raio refletido a partir da Eq. (8) de Kuttruff (2009).

$$\vec{v}_0' = \vec{v}_0 - 2(\vec{v}_0 \cdot \vec{n}_i) \cdot \vec{n}_i \quad (8)$$

Sendo:

\vec{v}_0' – Vetor direção refletida;

\vec{n}_i – Vetor direção raio incidente.

Em sequência é possível calcular o caminho de um raio sonoro dentro da sala refletindo em diversas superfícies, até que este atinja o receptor. Cada raio irá percorrer um caminho diferente encontrando o receptor com uma energia associada e em tempos distintos. A energia de cada raio é dada pela Eq. (9) se considerada a absorção do ar e o espalhamento.

$$E_n = (1 - \alpha^{(i)}) \cdot (1 - s^{(i)}) \cdot \frac{W}{N_r} \cdot e^{-ml} \quad (9)$$

Sendo:

s – Coeficiente de espalhamento da superfície;

i – Índice i -ésima superfície;

W – Potência da fonte;

N_r – Número de raios;

m – Coeficiente de absorção do ar;

l – Distância até i -ésima superfície.

Em síntese o algoritmo para o método do traçado de raios acústicos consiste em dividir a energia da fonte em um certo número de raios que serão distribuídos nas diversas direções, e acompanhar cada raio em suas várias reflexões até que atinja o receptor ou tenha refletido tantas vezes que sua energia pode ser considerada desprezível, até o último raio como representado pela Fig. (4).

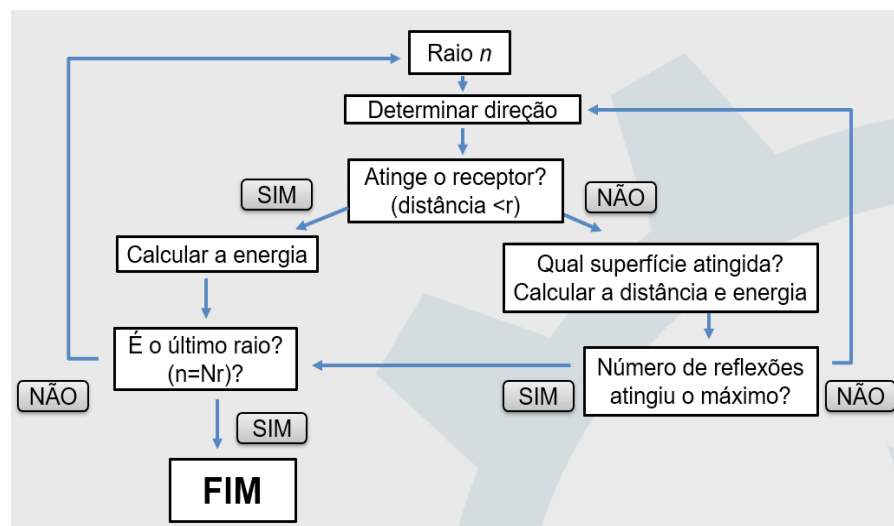


FIGURA 4 - Algoritmo usado no método do traçado de raios

Feita a distribuição dos raios uniformemente deve-se pegar cada um dos “ n ” raios e encontrar sua direção, com ela é possível dizer se este raio irá atingir o receptor ou não. Raios que interceptam o receptor só precisam ter sua energia calculada, e então o próximo raio é analisado, a não ser que o raio analisado seja o último. Raios que não atingem o receptor terão parte de sua energia refletida e parte absorvida pela primeira parede que interceptarem. Para descobrir qual plano o raio atingirá primeiro apenas deve-se escolher a menor distância entre a parede e os possíveis pontos de cruzamento com os planos. O procedimento repete-se até que o receptor seja atingido ou chegue ao número máximo de reflexões pré-determinado, devendo analisar o próximo raio, caso este não seja o último.

Por fim, o tempo de reverberação é encontrado após serem somadas as energias de cada raio em intervalos de tempo definidos e convertidas em níveis de pressão sonora. Quando analisado o nível sonoro em função do tempo será possível verificar

o decaimento da energia sonora ao longo do tempo e, assim, calcular o tempo de reverberação através da técnica dos raios acústicos.

METODOLOGIA

Este tópico apresenta a metodologia por trás da modelagem dos métodos citados anteriormente, assim como as ferramentas utilizadas para tais procedimentos. O programa computacional MATLAB foi utilizado para a programação do algoritmo utilizado no método do traçado de raios, assim como, para efeito de comparação, o cálculo dos tempos de reverberação pelos métodos estatísticos convencionais apresentados pela Eq. (2) e Eq. (3). O computador utilizado para a simulação foi um AMD FX8300 octacore, 16GB de RAM, placa de vídeo de 4GB, 240GB de SSD e 2T de HD.

O programa em questão deveria importar informações acústicas pertinentes, no que se refere às dimensões da sala, geometria e posições de fontes e receptores da sala, de um arquivo feito no programa computacional de desenho AutoCAD salvo em formato “.dxf”.

O desenho da sala deve ser feito de forma padronizada no programa computacional de desenho AutoCAD utilizando uma função específica, no caso “3dface”. Assim, o programa MATLAB, sabendo as posições do código em “.dxf” nas quais estarão as informações de interesse, consegue buscar e armazenar estas informações.

Informações como identificação de cada parede e os valores de suas propriedades podem ser identificados pelo nome da “layer” usada no desenho em AutoCAD.

As análises feitas foram para salas de dimensões semelhantes as das salas de aula do Centro de Aulas de engenharia, da Universidade Federal de Goiás, Campus Colemar Natal e Silva, Goiânia. As salas menores possuem largura e comprimento iguais a 8,7 metros e altura de 3,4 metros, as salas maiores diferem das demais apenas na largura, que é de 10,8 metros. Para o presente trabalho não se considera os coeficientes de absorvidade de cada superfície existente nas salas, uma vez que o objetivo é a comparação entre os métodos estatísticos, representados por Sabine e Eyring, e geométrico, dado pela técnica dos raios acústicos, no estudo previewal do tempo de reverberação.

Posteriormente, para uma melhor análise e maior riqueza de dados, uma sala hipotética foi criada com as dimensões de 10,8 metros de comprimento e largura e mesma altura das demais. Esta sala foi igualmente simulada, com as mesmas considerações feitas anteriormente.

A absorvidade usada para ambos os programas é de 0,04, aproximação para sala de propriedades uniformes, conforme os valores da tabela presente na NBR 12179, representada parcialmente na Fig. (5).

Materiais	Frequências (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Materiais de construção, usuais, densos						
Revestimentos, pintura						
Reboco áspero, cal	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Reboco liso	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06
Teto pesado suspenso (de gesso)	0,02	-	0,03	-	0,05	-
Estuque	0,03	-	0,04	-	0,07	-
Superfície de concreto	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07

FIGURA 5 - Coeficientes de absorção acústica (NBR 12179, 1992)

Para o programa com os métodos estatísticos considera-se as equações de Sabine e Eyring, o código tem como entrada as dimensões da sala, e o coeficiente de absorção, que para fins comparativos com os raios acústicos, é igual a 0,04.

Para o método do traçado de raios os planos foram definidos de forma que a sala não estivesse na direção dos eixos cartesianos, a fim de evitar o mau condicionamento durante o procedimento numérico de inversão de matriz presente no MATLAB.

Os planos da primeira sala são apresentados na Fig. (6). Posteriormente as normais de cada plano foram calculadas, para permitir o cálculo das novas direções dos raios refletidos pela Eq. (7).

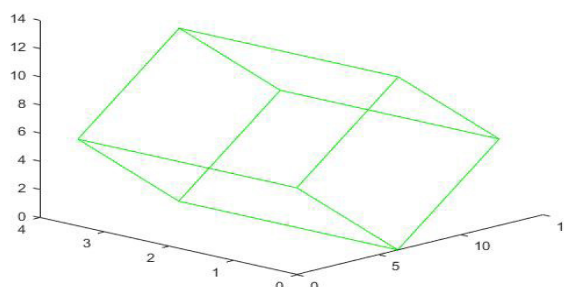


FIGURA 6 - Representação dos planos da sala

Métodos experimentais para a medição dos tempos de reverberação são padronizados pela ISO 3382-2. Os números mínimos de posições de medição para alcançar uma cobertura apropriada de uma sala dependem se as medições são para inspeções, engenharia ou precisão. Para inspeções são exigidas apenas duas posições do microfone, para engenharia devem ser feitas seis medições, variando pelo menos duas vezes a posição da fonte e também a do microfone. As medições de precisão são um pouco mais exigentes, exigem doze combinações, no mínimo duas posições para fonte e três para o microfone.

A escolha das posições para fonte e receptor para as diferentes simulações, foram feitas de modo a seguir as recomendações da norma ISO 3382-2, para medições de engenharia de uma sala. As três localizações de receptores foram posicionadas

a uma altura de um metro do piso, altura próxima a de uma pessoa sentada, já as duas fontes sonoras foram posicionadas a um metro e sessenta centímetros do piso, posição da altura de uma pessoa falando na posição em pé, como ilustrado na Fig. (7) e apresentado na Tab. (1).

Posições da fonte e receptor				
	Eixo	X [m]	Y [m]	Z [m]
Sala 1	Fonte 1	8,23	1,60	8,23
	Fonte 2	4,23	1,60	4,23
	Receptor 1	6,15	1,00	6,15
	Receptor 2	7,15	1,00	5,15
	Receptor 3	5,15	1,00	7,15
	Sala 2	Fonte 1	8,71	1,60
Fonte 2		5,71	1,60	5,71
Receptor 1		7,64	1,00	7,64
Receptor 2		8,64	1,00	6,64
Receptor 3		6,64	1,00	8,64
Sala 3	Fonte 1	9,46	1,60	4,46
	Fonte 2	6,46	1,60	6,46
	Receptor 1	7,64	1,00	7,64
	Receptor 2	8,64	1,00	6,64
	Receptor 3	6,64	1,00	8,64

TABELA 1. Posições utilizadas para simulação.

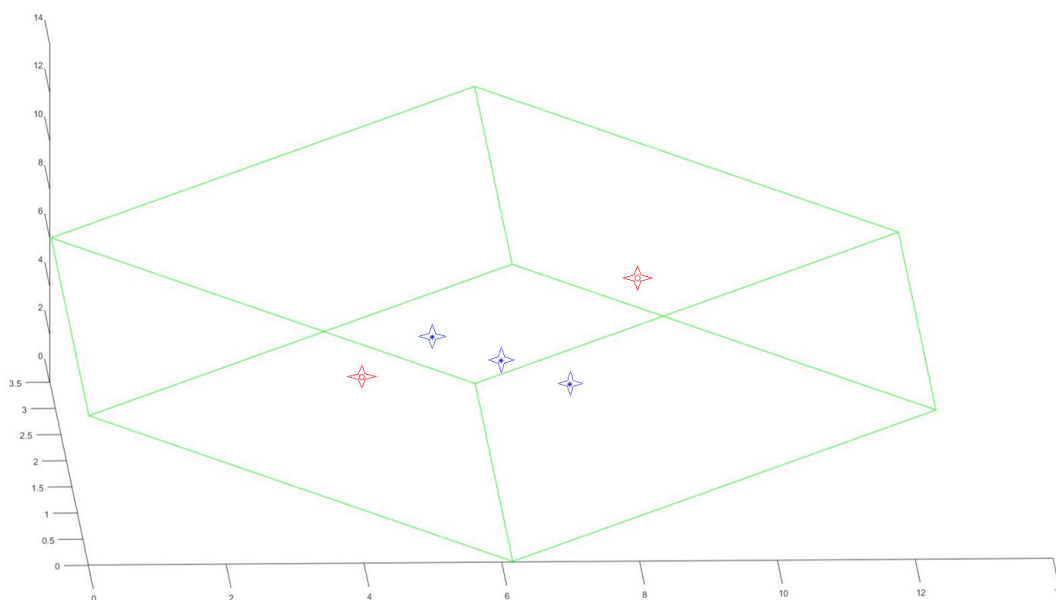


FIGURA 7 - Posição das fontes (vermelho) e receptores (azul) para a primeira sala

Os raios foram divididos uniformemente em intervalos de 5 graus, nas duas direções de rotação necessárias para distribuição uniforme dos raios sonoros, totalizando 2701 raios sonoros emitidos.

Não foram encontradas muitas informações a respeito da escolha do raio do

receptor na literatura, segundo Brandão (2016), comumente esferas de raio da ordem de um metro são usadas por diversos autores. Vários diâmetros pequenos, da ordem dos centímetros foram testados, assim como diâmetros da ordem de um metro como sugerido por Brandão (2016).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando o programa com métodos estatísticos citados, pôde-se encontrar os tempos de reverberação de 3,8883 e 3,7675 segundos para os métodos de Sabine e Eyring respectivamente, quando aplicados à primeira sala. O tempo gasto pelo programa computacional MATLAB para efetuar os cálculos foi de 0,001205 segundos, o que demonstra a simplicidade e o baixo custo computacional dos métodos.

A Figura (8) ilustra o resultado para a emissão de 12 raios saindo da fonte para apenas 2 reflexões, destaca-se que, no programa foram utilizados 2701 raios.

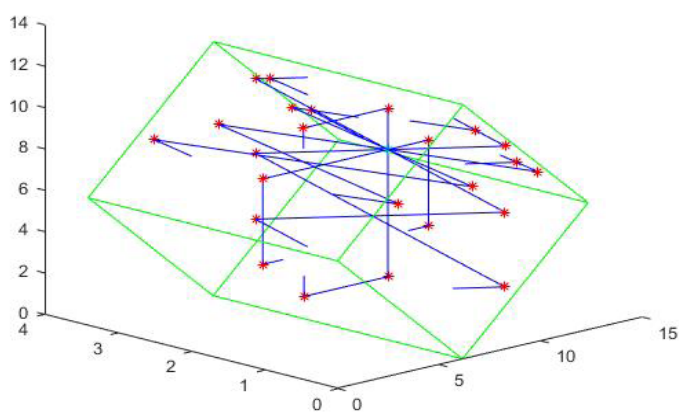


FIGURA 8 - Raios emitidos pela fonte e refletidos nas paredes.

Após várias alterações nos parâmetros o número máximo de reflexões dos raios foi definido como 500, por ser um valor razoável sem elevar muito o custo computacional. Para a primeira configuração das posições fonte e receptor com esses parâmetros e 0,1 metros de raio do receptor o programa demorou 312,1976 segundos para ser executado, tempo 259.085,145 vezes maior que a execução dos outros dois métodos.

A distribuição de nível sonoro nos intervalos de tempo e sua regressão linear pode ser observada na Fig. (9).

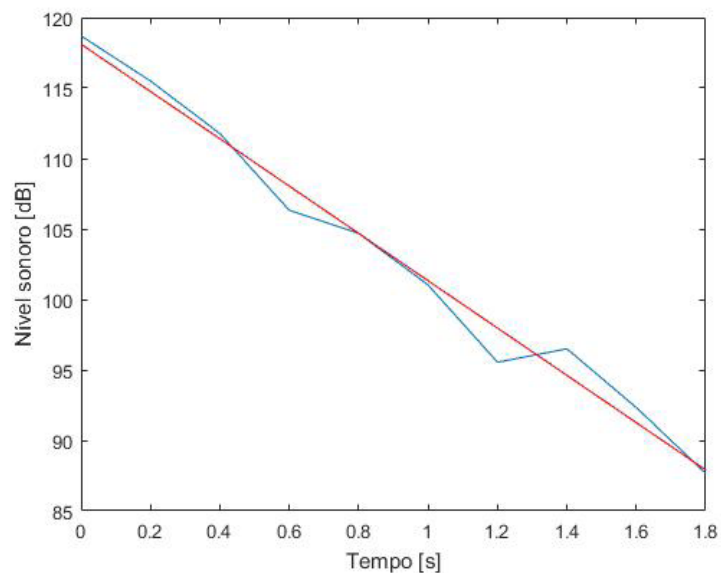


FIGURA 9 - Nível sonoro pelo tempo.

Como resultado para raio de 0,1 metros um T30 de 3,5744 segundos foi encontrado. Na Tab. (2) estão apresentados todos os resultados para as posições e raios propostos.

Tempos de reverberação e parâmetros utilizados para sala 1					
Método	Posição da fonte	Posição do receptor	Raio do receptor [m]	Tempo de reverberação [s]	Tempo de execução [s]
Sabine	-	-	-	3,89	0,01
Eyring	-	-	-	3,77	0,01

Raios acústicos	1	1	0,05	3,45	337,99
	1	1	0,1	3,57	312,20
	1	1	0,2	3,55	289,86
	1	1	0,5	2,82	143,43
	1	1	0,8	1,96	112,65
	1	1	1	1,56	109,51
	1	2	0,05	3,83	420,43
	1	2	0,1	3,94	443,22
	1	2	0,2	3,98	369,21
	1	2	0,5	2,99	269,70
	1	2	0,8	1,99	223,36
	1	2	1	1,56	214,77
	1	3	0,05	3,92	455,58
	1	3	0,1	3,95	423,27
	1	3	0,2	3,99	337,37
	1	3	0,5	2,99	262,31
	1	3	0,8	2,00	228,67
	1	3	1	1,56	231,85
	2	1	0,05	3,93	346,71
	2	1	0,1	3,89	312,97
	2	1	0,2	3,97	265,81
	2	1	0,5	2,79	138,79
	2	1	0,8	2,04	116,04
	2	1	1	1,57	86,52
	2	2	0,05	4,16	425,62
	2	2	0,1	4,40	448,06
	2	2	0,2	3,89	382,96
	2	2	0,5	3,00	217,83
	2	2	0,8	1,88	235,37
	2	2	1	1,50	186,90
2	3	0,05	4,10	430,49	
2	3	0,1	4,38	386,10	
2	3	0,2	3,95	330,21	
2	3	0,5	3,09	237,00	
2	3	0,8	1,91	238,26	
2	3	1	1,50	192,74	

TABELA 2. Tempos de reverberação sala 1

Pode-se observar que para os raios maiores o tempo de execução e consideravelmente menor, isto se deve ao maior número de raios que irão interceptar precocemente o receptor, que nestes casos tem dimensões próximas em relação a sala. Apesar do tempo menor de execução os resultados se distanciam do tempo de reverberação obtidos por Sabine e Eyring.

Por outro lado, quando o raio do receptor é menor a resposta aproxima-se dos valores encontrados na acústica estatística. Os valores de tempos de reverberação

para raios de até 0,2 metros se mostraram satisfatórios, sendo recomendado usar raios menores ou iguais a este. Analisando as respostas para cada posição da fonte pôde-se perceber que a primeira melhor se aproximou dos tempos de reverberação de Sabine e Eyring, especialmente para as posições 2 e 3 do receptor.

Todos as simulações com raios maiores que 0,2 metros se distanciaram dos tempos calculados pelos métodos estatísticos, se distanciando cada vez mais com o aumento do raio, sem diferenças significativas com a variação da posição.

Para a segunda e terceira sala foram encontrados resultados apresentados respectivamente na Tab. (3) e Tab. (4).

Tempos de reverberação para a sala 2 e parâmetros utilizados					
Método	Posição da fonte	Posição do receptor	Raio do receptor [m]	Tempo de reverberação sala 2 [s]	Tempo de reverberação sala 3 [s]
Sabine	-	-	-	4,06	4,25
Eyring	-	-	-	3,94	4,12

Raios acústicos	1	1	0,05	3,74	4,06
	1	1	0,1	3,73	3,48
	1	1	0,2	4,04	3,88
	1	1	0,5	3,30	3,57
	1	1	0,8	2,13	2,35
	1	1	1	1,70	1,80
	1	2	0,05	4,17	4,35
	1	2	0,1	5,23	4,31
	1	2	0,2	4,43	4,46
	1	2	0,5	3,30	3,53
	1	2	0,8	2,25	2,46
	1	2	1	1,84	1,99
	1	3	0,05	4,13	4,35
	1	3	0,1	4,87	4,31
	1	3	0,2	4,43	4,46
	1	3	0,5	3,30	3,53
	1	3	0,8	2,26	2,46
	1	3	1	1,84	1,99
	2	1	0,05	3,58	3,20
	2	1	0,1	3,16	3,74
	2	1	0,2	3,91	4,02
	2	1	0,5	3,18	3,69
	2	1	0,8	2,25	2,47
	2	1	1	1,66	1,94
	2	2	0,05	3,95	3,75
	2	2	0,1	4,18	4,53
	2	2	0,2	4,16	4,22
	2	2	0,5	3,31	3,59
	2	2	0,8	2,28	2,53
	2	2	1	1,84	1,96
2	3	0,05	3,99	3,79	
2	3	0,1	4,17	4,56	
2	3	0,2	4,14	4,23	
2	3	0,5	3,31	3,59	
2	3	0,8	2,27	2,53	
2	3	1	1,84	1,96	

TABELA 3. Tempos de reverberação sala 2 e sala 3

Para as salas maiores os resultados foram muito parecidos com os da primeira sala, destacando-se o tempo de reverberação levemente superior. Os resultados do programa foram satisfatórios para os raios menores novamente, porém é notável que os resultados para raios maiores como o de meio metro não se distanciaram tanto do previsto pelos métodos estatísticos de Sabine e Eyring, o que provavelmente está relacionado com o aumento do volume das salas.

Alguns dos conjuntos de posições da fonte e receptor apresentaram resultados que divergiram do esperado, o que é normal quando se faz uso dos métodos

geométricos que levam em conta a geometria da sala, permitindo observar os diferentes comportamentos, em posições de fonte e receptor específicas do recinto.

CONCLUSÃO

O custo computacional, assim como o tempo para o método geométrico utilizado é muito grande, quando comparado com os métodos estatísticos. Os resultados não são satisfatórios para as dimensões de receptores da ordem de 1 metro, como recomendado pela teoria, demonstrando que as referências encontradas são bem vagas, no que se refere a este parâmetro.

Os resultados obtidos variaram muito com o raio do receptor como já esperado, isso demonstra uma maior necessidade de atenção para este parâmetro. Os valores encontrados para os tempos de reverberação foram mais coerentes para valores menores de raios que os sugeridos pelas referências, provavelmente pelas menores dimensões da sala estudada. Acredita-se que para ambientes maiores como teatros e auditórios os raios da ordem de um metro são boas opções, pois seus volumes não têm tanta representatividade quando comparados aos volumes do ambiente estudado neste trabalho.

Para valores de raio do receptor convenientes o código desenvolvido consegue retornar respostas coerentes e satisfatórias, porém, ainda há uma certa incerteza no intervalo aceitável para o raio do receptor em função do volume de cada ambiente. É possível perceber a tendência, de recintos maiores permitirem utilização de receptores maiores, nas salas maiores, uma vez que os resultados para raios de 0,5 metros não distanciaram tanto do esperado.

Trabalhos futuros devem buscar uma relação entre as dimensões do recinto e o diâmetro recomendado para o receptor, fazendo a simulação para ambientes com diferentes volumes, buscando encontrar uma relação aceitável entre o parâmetro estudado e o volume do recinto. O estudo deve além de prever uma faixa de diâmetros, para validação dos resultados das simulações, encontrar o diâmetro para reduzir o custo computacional.

REFERÊNCIAS

BISTAFA, Sylvio R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 2.ed. São Paulo: Blucher, 2011.

BRANDÃO, E. **Acústica de salas: Projeto e Modelagem**. São Paulo: Edgard Blücher, 2016.

GERGES, S.N.Y. **Ruído: Fundamentos e controle**. 2. Ed. Florianópolis: UFSC, 2000.

KUTTRUFF, H. **Room acoustics**. 5o ed. London: Spon Press, 2009.

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

