

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Douglas Castro de Araujo

**CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE
ALTO-FALANTES PARA APARELHOS AUDITIVOS**

Florianópolis

2011

DOUGLAS CASTRO DE ARAUJO

**CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE
ALTO-FALANTES PARA APARELHOS AUDITIVOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Júlio Apolinário Cordioli, Dr.Eng.
Coorientador: Prof. Arcanjo Lenzi, Ph.D.

Florianópolis

2011

Catálogo na fonte elaborada pela biblioteca da
Universidade Federal de Santa Catarina

A ficha catalográfica é confeccionada pela Biblioteca Central.

Tamanho: 7 cm x 12 cm

Fonte: Times New Roman 9,5

Maiores informações em:

<http://www.bu.ufsc.br/design/Catalogacao.html>

DOUGLAS CASTRO DE ARAUJO

**CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE
ALTO-FALANTES PARA APARELHOS AUDITIVOS**

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 12 de setembro de 2011.

Prof. Julio César Passos, Dr.Eng.
Coordenador do Curso

Prof. Júlio Apolinário Cordioli, Dr.Eng.
Orientador

Prof. Arcanjo Lenzi, Ph.D.
Coorientador

Banca Examinadora:

Prof. Júlio Apolinário Cordioli, Dr.Eng.
Presidente

Prof. Roberto Jordan, Dr.Eng.

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr.Eng.

Prof. Márcio Holsbach Costa, Dr. (EEL/UFSC)

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me dado o fôlego de vida para estar neste mundo como mais que um mero espectador e ter me cuidado e direcionado a cada dia. Agradeço à minha família que me apoiou neste trabalho do início ao fim, em especial aos meus pais, Marcos e Sonia, com a certeza de que sem o apoio deles o sonho do mestrado nunca teria se concretizado.

Agradeço ao professor Samir N. Y. Gerges por ter despertado o interesse pela acústica e ao professor Júlio A. Cordioli por ter sustentado e desenvolvido este interesse. Agradeço mais uma vez ao professor Júlio A. Cordioli pela orientação no trabalho, me instruindo, direcionando e colaborando no trabalho, e em especial pela paciência na elaboração deste documento. Agradeço ao professor Arcanjo Lenzi pela co-orientação, orientando pontos importantes no desenvolvimento do trabalho. Agradeço ao professor Homero Setti que durante o trabalho também me orientou em diversos conceitos da eletroacústica de alto-falantes.

Agradeço aos amigos do LVA (Gustavo Martins, Gustavo Myrria, Giovanni Bratti, Zargos Masson, Eric Carneiro e Stephan Paul) que muito (mesmo!) colaboraram para a conclusão deste trabalho. Agradeço ao Valtair pelo apoio na usinagem das peças utilizadas no trabalho.

Agradeço à CAPES e à empresa Amplivox pelo apoio financeiro. Agradeço à Amplivox, também, por toda instrução técnica sobre os aparelhos auditivos e pelos equipamentos disponibilizados para uso na pesquisa.

Agradeço à família Barakat Calvo pelo apoio durante todo o mestrado, em especial à Valeria e Vanessa pelo imenso e valioso apoio nos momentos desesperadores (:D).

Agradeço aos colegas de trabalho na COPEL (Eder Paulino, Fábio Bakai e Thiago Pedrão) pelo incentivo na conclusão do mestrado, em especial ao Milton Iqueuti pelas liberações fundamentais para a conclusão do trabalho. Agradeço ao meu vizinho em Ponta Grossa, Toni, pelo ânimo fornecido até a conclusão deste trabalho.

Eu poderia falar todas as línguas que são faladas na terra e até no céu, mas, se não tivesse amor, as minhas palavras seriam como o som de um gongo ou como o barulho de um sino. Poderia ter o dom de anunciar mensagens de Deus, ter todo o conhecimento, entender todos os segredos e ter tanta fé, que até poderia tirar as montanhas do seu lugar, mas, se não tivesse amor, eu não seria nada. Poderia dar tudo o que tenho e até mesmo entregar o meu corpo para ser queimado, mas, se eu não tivesse amor, isso não me adiantaria nada. (1 Coríntios 13:1,2 e 3)

RESUMO

Nas últimas décadas, tem observado-se um aumento significativo no número de pessoas com perda auditiva, o que ocorre, principalmente, em função do envelhecimento da população e do estilo de vida moderno. Como consequência, tem-se também um aumento no número de usuários de aparelhos auditivos e um investimento cada vez maior no desenvolvimento destes. No entanto, ainda há pouca compreensão sobre o comportamento e a qualidade dos alto-falantes para tais equipamentos. Uma vez que, atualmente, existem métodos para análise de aparelhos auditivos, o objetivo deste trabalho é investigar os métodos experimentais existentes e definir o mais adequado para os alto-falantes de aparelhos auditivos. Nesta investigação, um procedimento experimental é proposto para análise e caracterização dos alto-falantes para aparelhos auditivos. Na maioria dos aparelhos auditivos, o som é captado por um microfone e tem sua intensidade controlada por um amplificador, o qual envia o sinal amplificado para o alto-falante. O sinal reproduzido pelo alto-falante é, então, direcionado até o tímpano do usuário por meio de tubos de diferentes diâmetros (tubos de conexão, ventilação e canal auditivo). Estes tubos exercem uma influência significativa na resposta em frequência do alto-falante e, para simular este sistema acústico, foi utilizado o Modelo de Matrizes de Transferência (MMT). A matriz de transferência do alto-falante é obtida por meio do Método de Duas Cargas (MDC), enquanto que as matrizes de transferência para os tubos são obtidas assumindo ondas planas e levando em conta os efeitos visco-térmicos. Uma vez obtido o modelo, é possível prever o comportamento na frequência da pressão sonora, velocidade de volume, tensão e corrente elétrica para o alto-falante desejado. Tais resultados podem ser obtidos em pontos diversos do sistema acústico, e, com a utilização do MMT, é possível obter os resultados supracitados sem a necessidade da construção de protótipos, o que representa um significativo avanço no projeto de aparelhos auditivos. Associando o MMT com um procedimento experimental para análise dos níveis de distorção dos alto-falantes, o qual também é proposto neste trabalho, será possível obter as informações necessárias para uma qualificação dos alto-falantes de forma confiável. Os resultados numéricos do MMT obtidos para o sistema acústico do alto-falante foram confrontados com os resultados experimentais e obteve-se boa concordância dentro da faixa de frequência de 0 a 6,4 kHz, faixa usualmente encontrada nas informações técnicas de aparelhos auditivos.

Palavras-chave: Aparelhos auditivos, Alto-falantes, Matrizes de transferência, Método de Duas Cargas.

ABSTRACT

Recent decades have seen a significant increase in the number of people with hearing loss, which occurs mainly due to the aging population and modern lifestyle. As a result, there is also an increase in the number of users of hearing aids and an increasing investment in the development of new hearing aids. However, there is still little understanding of the behavior and quality of speakers for such equipments. Currently there are some methodologies for the analysis of hearing aids; this study aims to investigate and define the most appropriate existing experimental methods that could be applied to loudspeaker of hearing aids. In this research an experimental procedure for the characterization of hearing aid's loudspeakers is proposed. In the majority of hearing aids, the sound is captured by a microphone and has its intensity controlled by an amplifier, which sends the amplified signal to the loudspeaker. The acoustic signal is then directed to the eardrum of the user through tubes of different diameters (connecting tubes, ventilation, and ear canal). These tubes have a significant effect on the frequency response of the loudspeaker, and to simulate this acoustic system, it was used the Transfer Matrices Method (TMM). The transfer matrix of the loudspeaker is experimentally obtained by the Two-Load Method (TLM), while the transfer matrices representing the tubes are obtained assuming plane waves and taking into account the visco-thermal effects. Once the model is obtained, it is possible to predict the frequency behavior of the sound pressure, volume velocity, voltage, and electrical current. Such results can be obtained at various points of the acoustic system without the need of building prototypes; which represents a significant advance in the design of hearing aids. Associating the TMM with an experimental procedure, it is possible to analyze the levels of distortion from the loudspeakers, one can get the information required for a qualification of the loudspeakers. The numerical results obtained from the TMM to the acoustic system of the loudspeaker were compared with experimental results and good agreement was observed within the frequency range of 0 to 6.4 kHz, a frequency range usually found in the technical information of hearing instruments.

Keywords: Hearing aids, Loudspeakers, Transfer matrices, Two-load method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Aparelho auditivo e seus componentes.....	2
Figura 1.2	Esquema genérico de um aparelho auditivo.....	2
Figura 1.3	Aparelho auditivo do tipo retroauricular acoplado ao canal auditivo e os componentes deste sistema.	3
Figura 1.4	Tipos de aparelhos auditivos.	3
Figura 1.5	Orelha humana e suas partes.	4
Figura 1.6	Prováveis espectros de pressão sonora em vários pontos do sistema acústico acoplado a um aparelho auditivo.....	5
Figura 1.7	Microfone de eletreto para aparelhos auditivos.....	6
Figura 1.8	Sistema de amplificação: (a) Analógico e (b) Digital..	7
Figura 1.9	Sinal de entrada e sinal de saída saturado.....	8
Figura 1.10	Entrada x Saída.	9
Figura 1.11	Aparelho ITE e o canal de ventilação do molde que proporciona um caminho para vazamento sonoro.....	10
Figura 1.12	Diagrama de um alto-falante para aparelhos auditivos.	11
Figura 1.13	Vista explodida de um alto-falante para aparelhos auditivos.....	11
Figura 1.14	Evolução dos alto-falantes e microfones para aparelhos auditivos.	12
Figura 1.15	(a): Volume do canal auditivo em cm^3 em função da idade e (b): Impedância do canal auditivo em função da frequência.....	14
Figura 1.16	Diagrama do: (a) Acoplador HA1, (b) Acoplador HA2	

e (c) Simulador de orelha.	14
Figura 1.17 KEMAR - <i>Knowles Electronics Manikin for Acoustic Research</i>	15
Figura 1.18 Analisador de aparelhos auditivos.	16
Figura 1.19 (a) REUR e (b) REAR.	18
Figura 1.20 FRF típica de um alto-falante de aparelho auditivo. . .	22
Figura 1.21 Aparelho auditivo recarregável a energia solar.	23
Figura 1.22 Diagrama de blocos do sistema analisado experimentalmente.	24
Figura 1.23 Experimento analisado.	25
Figura 1.24 Pressão (mic. acoplador)/Tensão (terminais do alto-falante).	25
Figura 2.1 Transdutor eletromagnético típico: (a) Diagrama esquemático, (b) Análogo utilizando matrizes de transferência vinculadas por transformadores, (c) Análogo utilizando apenas matrizes de transferência, e (d) Análogo utilizando uma única matriz de transferência.	30
Figura 2.2 Tubo cilíndrico.	35
Figura 2.3 Modelo de linha de transmissão.	37
Figura 2.4 Modelo simplificado representando a impedância acústica do microfone.	39
Figura 2.5 (a) Fonte de tensão com impedância interna em série, (b) Aplicação da impedância Z_1 à fonte de tensão e (c) Aplicação da carga Z_2 à fonte de tensão.	43
Figura 2.6 Carga I: (a) Diagrama esquemático experimental, (b) Representação em matrizes de transferência, e (c) Representação em matrizes de transferência expandida.	46
Figura 2.7 Carga II: (a) Diagrama esquemático experimental, (b) Representação em matrizes de transferência, e (c) Representação em matrizes de transferência expandida.	47
Figura 2.8 Perfil de onda plano para um duto.	50
Figura 2.9 Restrição de onda plana (unidades em mm): (a) Difração, (b) Microfone a uma distância inadequada da transição, (c) Microfone a uma distância adequada da transição.	51
Figura 3.1 Diagrama esquemático experimental para obtenção dos quatro parâmetros do alto-falante (sistema acústico I), dimensões em milímetros.	55
Figura 3.2 Diagrama esquemático experimental para obtenção dos	

quatro parâmetros do alto-falante (sistema acústico II), dimensões em milímetros.	55
Figura 3.3 Dois sistemas acústicos acoplados ao alto-falante.	56
Figura 3.4 Método de Duas Cargas aplicado ao Modelo 1958e [Sonion]: (a) FRF Pressão/Tensão experimental e numérica e (b) Coerência Pressão/Tensão do resultado experimental.	58
Figura 3.5 Método de Duas Cargas aplicado ao Modelo BK-21610 [Knowles]: (a) FRF Pressão/Tensão experimental e numérica e (b) Coerência Pressão/Tensão do resultado experimental.	59
Figura 3.6 FRF Pressão/Tensão - Alto-falante 1958 [Sonion].	60
Figura 3.7 Sistema acústico utilizado na análise da influência do resistor.	61
Figura 3.8 Efeito do resistor na resposta de pressão do alto-falante para o modelo BK-21610.	62
Figura 3.9 FRF Pressão/Tensão considerando diversas cargas para caracterização do alto-falante.	63
Figura 3.10 Erros dos modelos referentes à FRF Pressão/Tensão obtida experimentalmente.	64
Figura 3.11 Módulo dos quatro parâmetros das cargas de caracterização.	65
Figura 3.12 Fase dos quatro parâmetros das cargas para caracterização.	65
Figura 3.13 Análise da condição referente à Equação (2.67) para as diversas cargas para caracterização.	66
Figura 3.14 Análise da condição referente às Equações (2.68), (2.69), (2.70) e (2.71) para a configuração 6,3 - 33,77 mm	67
Figura 3.15 Análise da condição referente às Equações (2.68), (2.69), (2.70) e (2.71) para a configuração 6,3 - 40,96 mm	68
Figura 3.16 Análise da condição referente às Equações (2.68), (2.69), (2.70) e (2.71) para a configuração 6,3 - 51,53 mm	68
Figura 3.17 FRF Pressão/Tensão para tubos de diferentes materiais.	69
Figura 3.18 FRF Pressão/Tensão para uma análise até 12,8 kHz, para o sistema acústico 99,60 mm.	70
Figura 3.19 FRF Pressão/Tensão para um sistema acústico utilizando o simulador de orelha.	71
Figura 3.20 Variabilidade da FRF Pressão/Tensão para os 5 elementos do modelo BK-21610.	72

Figura 3.21	Desvio padrão da FRF Pressão/Tensão para os 5 elementos do modelo BK-21610.....	73
Figura 3.22	Variabilidade da THD para 5 elementos do modelo BK-21610.....	74
Figura 3.23	Desvio padrão da THD para os 5 elementos do modelo BK-21610.....	75
Figura 4.1	Sistema acústico acoplado ao alto-falante para a análise de distorção.	79
Figura 4.2	THD analisada segundo: (a) Frequência máxima para análise, (b) Número de linhas para a faixa de frequência sob análise e (c) Sistemas acústicos acoplados ao alto-falante.	81
Figura 4.3	(a) Desvio em relação à média para as frequências máximas analisadas, (b) Desvio em relação à média para os números de linhas analisados e (c) Desvio em relação à média para os sistemas acústicos acoplados ao alto-falante.	82
Figura 4.4	FRF Pressão/Tensão para os sistemas acústicos 4 e 5.	83
Figura 4.5	Distorção para as seguintes condições: (1) 1,5 ohms; 6400 Linhas; 25,6 kHz; 450m Vrms, (2) 1,5 ohms; 6400 Linhas; 25,6 kHz; 600m Vrms, (3) 1,5 ohms; 6400 Linhas; 25,6 kHz; 769m Vrms e (4) 1,5 ohms; 6400 Linhas; 25,6 kHz; 1 Vrms.	84
Figura 4.6	FRF's Pressão/Tensão (6,4 kHz - 6400 Linhas) para um alto-falante acoplado a diversos sistemas acústicos.....	88
Figura 4.7	FRF's Pressão/Tensão (6,4 kHz - 6400 Linhas) para um alto-falante acoplado a diversos sistemas acústicos.....	88
Figura 4.8	Corrente elétrica referente à excitação de 1 V (6,4 kHz - 6400 Linhas) para um alto-falante acoplado a diversos sistemas acústicos.....	89
Figura 4.9	Corrente elétrica referente à excitação de 1 V (6,4 kHz - 6400 Linhas) para um alto-falante acoplado a diversos sistemas acústicos.....	89
Figura 4.10	Módulo da impedância elétrica para um alto-falante acoplado a diversos sistemas acústicos.....	90
Figura 4.11	Módulo da impedância elétrica para um alto-falante acoplado a diversos sistemas acústicos.....	90
Figura 5.1	Parte (a) Externa e (b) Interna do sistema físico aproximado utilizado para análise em condições de uso artificiais de aparelhos auditivos.	92
Figura 5.2	Sonda de Medição Pontual - SMP.....	93

Figura 5.3	Diagrama da calibração da SMP.	94
Figura 5.4	Sistema físico aproximado: (1) Orelha (KEMAR); (2) Alto-falante; (3) Tubo curvado (ear-hook) + tubo de conexão com molde; (4) Molde; (5) Acoplador; (6) Microfone e (7) Ventilação.	94
Figura 5.5	Experimento sob teste: (a) Diagrama esquemático, (b) Modelo pelo MMT para o experimento, (c) Modelo reduzido (MMT) para o experimento.	95
Figura 5.6	FRF Pressão/Tensão (acoplador) para um aparelho auditivo BTE.	96
Figura 5.7	FRF Pressão/Tensão obtida para a saída da ventilação para o aparelho auditivo BTE.	97
Figura 5.8	Geometria do canal auditivo.	98
Figura 5.9	Geometria particionada do canal auditivo.	98
Figura 5.10	FRF Pressão/Tensão para o canal auditivo representado por um único cilindro e por trinta cilindros.	99
Figura 5.11	Resposta para os sistemas utilizando a impedância do microfone e da orelha humana.	100
Figura 5.12	Tipos de moldes em aparelhos auditivos: (a) Molde ocluso, (b) Molde com ventilação paralela e (c) Molde com ventilação Y.	101
Figura 5.13	FRF Pressão/Tensão (acoplador) para tipos de ventilação.	102
Figura 5.14	FRF Pressão/Tensão (ventilação) para tipos de ventilação.	102
Figura 5.15	Diagramas esquemáticos para o: (a) 1º Experimento, (b) 2º Experimento, (c) 3º Experimento e (d) 4º Experimento. Para (c) e (d), 1 e 2 indicam, respectivamente, orelha e molde. ...	103
Figura 5.16	Experimentos realizados utilizando: (a) Acoplador de 2 cm ³ , (b) Simulador de orelha e (c) KEMAR.	104
Figura 5.17	FRF Pressão/Tensão para os 4 experimentos realizados.	105
Figura 5.18	Impedância acústica do simulador de orelha (IEC 711), relativo ao nível em 500 Hz (35,9 MPa.s/m ³), com as tolerâncias máximas e mínimas.	106
Figura A.1	Matrizes de transferência em série.	119
Figura A.2	Circuito com uma impedância qualquer em série.	120
Figura A.3	Circuito com uma impedância qualquer em paralelo. .	120

Figura A.4 Matriz de transferência com uma impedância de terminação. 121

Figura A.5 Matrizes de transferência em paralelo. 121

Figura B.1 Circuito elétrico equivalente representando a impedância acústica do simulador de orelha. 125

Figura B.2 Circuito elétrico equivalente representando a impedância acústica do tímpano, orelha média e interna. 126

Figura B.3 Circuito elétrico equivalente representando a impedância acústica do tímpano. 127

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Componentes e métodos utilizados na elaboração do modelo de matrizes de transferência.	32
Tabela 2.2 Valores dos parâmetros concentrados do modelo do microfone.	40
Tabela 4.1 Potência consumida para o alto falante BK-21610 considerando um sinal de excitação de 450 mVrms (6,4 kHz - 6400 Linhas).....	86
Tabela 5.1 Impedância acústica do simulador de orelha.....	107

NOMENCLATURA

Alfabeto Romano

A_n	1° parâmetro da matriz de transferência de um tubo qualquer
B_n	2° parâmetro da matriz de transferência de um tubo qualquer
C_n	3° parâmetro da matriz de transferência de um tubo qualquer
D_n	4° parâmetro da matriz de transferência de um tubo qualquer
a_n	Raio de um tubo qualquer
A_p	Área de um pistão
a_p	Raio de um pistão
A_s	Área de uma superfície
c	Constante
c_0	Velocidade do som no meio para pequenas perturbações
C_c	Capacitância

C_{ds}	Compliância do diafragma
E	Energia
E_C	Tensão elétrica para uma fonte de tensão
E_i	Tensão elétrica de entrada
f	Frequência
G_{ca}	Condutância
H_1	Função de Struve de primeira ordem
I	Corrente elétrica
I_i	Corrente elétrica de entrada
j	Unidade imaginária
J_0	Função de Bessel de ordem zero
J_1	Função de Bessel de primeira ordem
k	Número de onda
l_n	Comprimento de um tubo qualquer
L_{ds}	Massa do diafragma
L_{ma}	Indutância
M	Número de Mach
P	Potência elétrica
p	Pressão sonora
p_1	Pressão sonora de entrada (tubo)
p_2	Pressão sonora de saída (tubo)
P_o	Pressão sonora de saída
p_0	Pressão sonora do meio (parcela constante)
p_{nh}	Pressão sonora para a n -ésima harmônica
p'	Pressão sonora do meio (parcela variável)

R_{ds}	Resistência do diafragma
R_{ra}	Resistência
S	Área da seção transversal de um tubo qualquer
t	Tempo
U	Velocidade de volume
u	Velocidade de partícula
U_1	Velocidade de volume de entrada (tubo)
U_2	Velocidade de volume de saída (tubo)
U_o	Velocidade de volume de saída
V	Tensão elétrica
Y_{lt-p}	Impedância em paralelo (Modelo de linha de transmissão)
Z	Impedância qualquer - MMT
Z_1	Impedância elétrica 1 - MDC (Carga 1)
Z_2	Impedância elétrica 2 - MDC (Carga 2)
Z_c	Impedância característica
Z_L	Impedância acústica do microfone
Z_r	Impedância de entrada para um ramo - MMT
Z_S	Impedância interna em série para uma fonte de tensão
Z_{ac-e}	Impedância acústica específica
Z_{ac}	Impedância acústica
Z_{el}	Impedância elétrica
Z_f	Impedância de radiação para um tubo flangeado
Z_{lt-s}	Impedância em série (Modelo de linha de transmissão)

Z_{nf} Impedância de radiação para um tubo não-flangeado

Abreviações

AGC	<i>Automatic Gain Control</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AVC	<i>Automatic Volume Control</i>
BTE	<i>Behind-The-Ear</i>
CIC	<i>Completely-In-the-Canal</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
FRF	Função Resposta em Frequência
HP	<i>High Power</i>
ITC	<i>In-The-Canal</i>
ITE	<i>In-The-Ear</i>
KEMAR	<i>Knowles Electronics Manikin for Acoustic Research</i>
MDC	Método de Duas Cargas
MEC	Método do Elemento de Contorno
MMT	Método das Matrizes de Transferência
NPS	Nível de Pressão Sonora
REAR	<i>Real-Ear Aided Response</i>
RECD	<i>Real-Ear-to-Coupler Difference</i>
REIG	<i>Real-Ear Insertion Gain</i>
REUR	<i>Real-Ear Unaided Response</i>
SMP	Sonda de Medição Pontual
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
TLM	<i>Two-Load Method</i>
TMM	<i>Transfer Matrices Method</i>

Alfabeto Grego

ϵ	Tensão elétrica de valor ínfimo
η	Tensão elétrica de valor ínfimo
γ	Razão do calor específico a pressão constante (C_p) e o calor específico a volume constante (C_v)
Γ_n	Constante de propagação para um tubo qualquer
μ	Viscosidade absoluta do meio
ν	Tensão elétrica de valor ínfimo
ω	Frequência angular
ψ	Tensão elétrica de valor ínfimo
ρ	Densidade do meio
ρ'	Densidade do meio (parcela variável)
ρ_0	Densidade do meio (parcela constante)
σ	Número de Prandt
ξ	Tensão elétrica de valor ínfimo
ζ	Tensão elétrica de valor ínfimo

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Aparelhos auditivos	2
1.1.1	Componentes dos aparelhos auditivos	4
	<i>Microfone</i>	5
	<i>Sistema de amplificação</i>	6
	<i>Compressor</i>	8
	<i>Molde</i>	9
	<i>Bateria</i>	10
1.1.2	Alto-falante para aparelhos auditivos	10
1.1.3	Métodos de medição para aparelhos auditivos	13
	<i>Medição em condições artificiais</i>	13
	<i>Analisador de aparelhos auditivos</i>	16
	<i>Medição em condições reais de uso</i>	17
	<i>Comentários</i>	18
1.2	Parâmetros de avaliação de alto-falantes	19
1.2.1	Distorção	19
1.2.2	Função Resposta em Frequência - FRF	20
1.2.3	Consumo	22
1.3	Métodos de caracterização experimental de fontes	23
1.3.1	Método baseado na Função Resposta em Frequência	24
1.3.2	Método Direto	25
1.3.3	Método Indireto	25
1.4	Objetivos e contribuições	26
1.5	Organização da dissertação	27
2	MÉTODO DAS MATRIZES DE TRANSFERÊNCIA	29

2.1	Introdução	29
2.2	Matrizes de transferência na acústica	31
2.2.1	Matrizes de transferência para elementos acústicos	32
2.2.2	Matriz de transferência de dutos (sem perdas)	35
2.2.3	Matriz de transferência de dutos (com perdas)	36
2.2.4	Impedância de terminação.....	39
	<i>Formulações gerais</i>	39
	<i>Microfone</i>	39
	<i>Simulador de orelha</i>	40
	<i>Impedância de tubo aberto: Flangeado e Não-Flangeado</i>	40
	<i>Orelha humana</i>	41
2.2.5	Método de Duas Cargas.....	42
	<i>Restrição de ondas planas</i>	49
3	ANÁLISES EXPERIMENTAIS DO MMT.....	53
3.1	Procedimento experimental e equipamentos (MMT)	53
3.2	Resultados preliminares.....	57
3.3	Verificação de condições (MMT & MDC)	60
3.3.1	Análise de linearidade	60
3.3.2	Análise da influência do resistor	61
3.3.3	Análise das condições de erro do MDC.....	62
3.3.4	Análise do material dos tubos.....	69
3.4	Análise do modelo numérico até 12,8 kHz	69
3.5	Simulador de orelha (Experimental x Numérico)	71
3.6	Análise de variabilidade	72
3.7	Discussão de resultados	76
4	DISTORÇÃO E CONSUMO	77
4.1	Análise de distorção.....	77
4.2	Análise de consumo	85
5	ANÁLISE EM CONDIÇÕES DE USO ARTIFICIAIS	91
5.1	Introdução	91
5.2	Descrição do sistema físico aproximado (KEMAR)	92
5.3	Descrição do modelo analítico (MMT)	94
5.4	Resultados preliminares.....	95
5.5	Análise da geometria do canal auditivo	98
5.6	Impedância do Microfone x Orelha Humana	99
5.7	Análise de retroalimentação	100
5.8	Comparação experimental (Acopladores x KEMAR).....	103
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	109
6.1	Conclusões	109
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	111

<i>Análise de retroalimentação utilizando MMT e MEC</i>	111
<i>Análise com medições em condições reais de uso</i> .	112
Referências	113
ANEXO A – Instruções para cálculo das matrizes de transferência	119
ANEXO B – Circuitos elétricos para utilização no MMT	128
ANEXO C – Algoritmos para processamento de dados e execução de cálculos	131

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

No mundo atual, as pessoas estão cada vez mais expostas a ruídos provenientes do ambiente de trabalho, do trânsito, de eletrodomésticos e de eletroeletrônicos. A exposição a estes ruídos, em muitos casos, produz perda auditiva, o que dificulta em muito a comunicação das pessoas.

Os aparelhos auditivos podem ajudar as pessoas com perda auditiva a recuperar parte da habilidade de audição. Um aparelho auditivo é formado por diversas peças (microfone, sistema de amplificação, alto-falante, bateria e outros). A Figura 1.1 apresenta a parte interna de um aparelho auditivo com seus componentes, enquanto a Figura 1.2, expõe, resumidamente, o fluxo do sinal tratado pelo aparelho auditivo e também a relação entre os seus componentes. Cada peça do aparelho auditivo desempenha um papel no tratamento do sinal recebido ou proporciona as condições necessárias para o funcionamento de outras peças do aparelho.

Um dos componentes principais no projeto de um aparelho auditivo é o alto-falante, que deve fornecer um sinal sonoro com amplitude suficiente para compensar a perda auditiva do usuário e ainda garantir que o sinal esteja livre de distorções.

Durante o desenvolvimento de um aparelho auditivo, é necessário avaliar seu funcionamento. Atualmente, existem alguns métodos para avaliação de aparelhos auditivos. No entanto, não existem métodos para a avaliação de alto-falantes para aparelhos auditivos. Os métodos de avaliação existentes para alto-falantes comuns não podem ser sim-

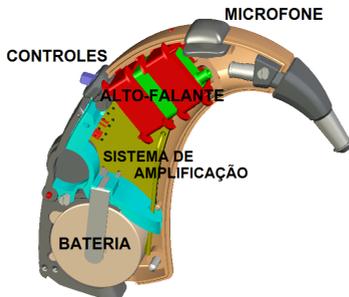


Figura 1.1: Aparelho auditivo e seus componentes.

plesmente aplicados para alto-falantes para aparelhos auditivos. Este estudo tem por objetivo definir um método para a caracterização de alto-falantes para aparelhos auditivos e, desta forma, possibilitar avaliações mais adequadas. Nesse sentido, métodos experimentais e numéricos serão empregados.

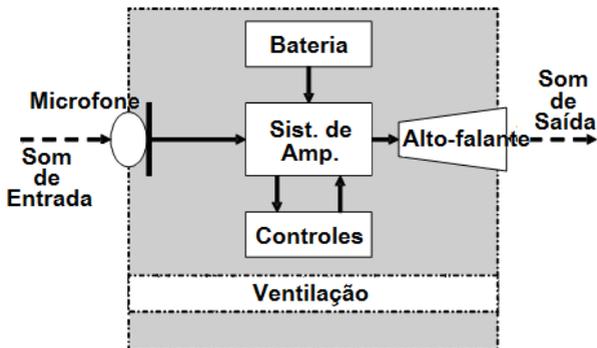


Figura 1.2: Esquema genérico de um aparelho auditivo.

1.1 Aparelhos auditivos

O aparelho auditivo tem a função de captar a onda sonora, amplificá-la e conduzi-la ao canal auditivo do usuário. Desta forma, aproveita-se a audição residual do usuário, por meio da amplificação.

Os componentes principais de um aparelho auditivo são: o mi-

crofone, o sistema de amplificação, o alto-falante e a bateria, mas há alguns outros componentes, como se pode verificar na Figura 1.3.

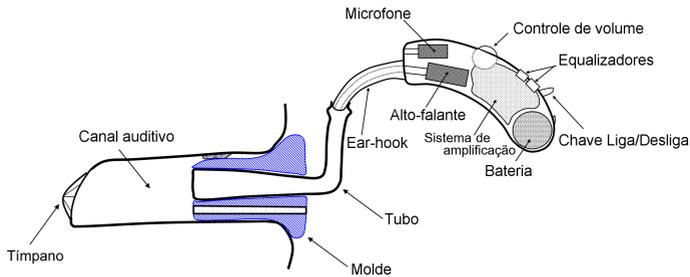


Figura 1.3: Aparelho auditivo do tipo retroauricular acoplado ao canal auditivo e os componentes deste sistema (DILLON, 2001).

Um aparelho auditivo é desenvolvido para se adequar à condição auditiva de cada pessoa. Isso se deve ao fato de cada pessoa ter uma necessidade, sendo que o ajuste pode ser feito, parcialmente, pelo próprio usuário ou por um fonoaudiólogo.

Existem diferentes classificações para aparelhos auditivos. Talvez a mais simples, seja categorizá-los pelo seu local de utilização, conforme apresentado na Figura 1.4.

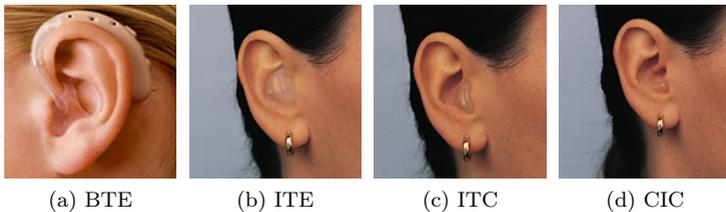


Figura 1.4: Tipos de aparelhos auditivos (SIEMENS, 2009).

Para a descrição dos tipos de aparelhos auditivos será apresentado, primeiramente, a descrição da orelha humana, conforme segue. A orelha humana, Figura 1.5, pode ser dividida em várias porções, as quais são definidas como:

Orelha externa: Trata-se do pavilhão auricular (pinna) e o conduto auditivo externo (canal auditivo);

Orelha média: Também chamada de cavidade timpânica, compreen-

de, a membrana timpânica (tímpano) e a cadeia ossicular (martelo, bigorna e estribo);

Orelha interna: É onde se localizam a cóclea e o sistema vestibular (canais semicirculares e vestibulo).

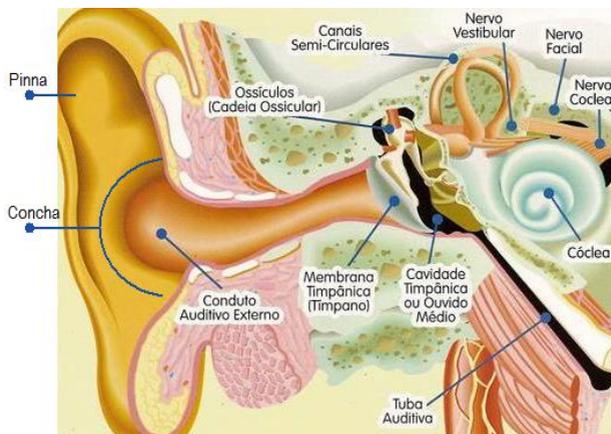


Figura 1.5: Orelha humana e suas partes (AUDIOLÓGICA, 2011).

Os modelos BTE (abreviação de *Behind-The-Ear*), também chamados de retroauriculares, são aqueles usados atrás da pinna e conectados ao molde de orelha. Os modelos ITE (abreviação de *In-The-Ear*), também chamados de intra-auriculares, são aparelhos auditivos adaptados dentro do canal auditivo. Estes são confeccionados para cada usuário, por meio da impressão da orelha externa.

Quando um aparelho auditivo intra-auricular ocupa uma porção suficientemente pequena da concha (parte central da pinna), ele é referenciado como ITC (abreviação de *In-The-Canal*), também chamado de intracanal. Os modelos CIC (abreviação de *Completely-In-the-Canal*), também chamados de microcanal, são os menores dos aparelhos auditivos e foram projetados para o encaixe dentro do canal auditivo, ficando, dessa forma, praticamente invisíveis quando em uso.

1.1.1 Componentes dos aparelhos auditivos

Cada componente do aparelho auditivo irá exercer uma influência na resposta deste. Entre os componentes, existem alguns que estão

mais relacionados com o desempenho eletroacústico do aparelho auditivo. Os principais componentes que influenciarão este desempenho estão listados a seguir e, segundo a Figura 1.6, é possível verificar os prováveis espectros de pressão sonora de acordo com o caminho de propagação sonora e a influência dos componentes.

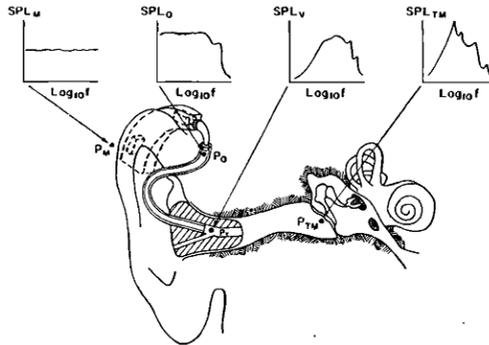


Figura 1.6: Prováveis espectros de pressão sonora em vários pontos do circuito acústico de um aparelho auditivo (EGOLF et al., 1978).

Da esquerda para direita, o primeiro espectro representa um ruído de banda larga, o segundo espectro é a representação das limitações de alguns dos componentes do aparelho auditivo (microfone, amplificador e alto-falante), o terceiro espectro representa a atenuação em baixa frequência, devido à existência da ventilação, e as ressonâncias do alto-falante acoplado aos tubos, e o quarto e último espectro representa as ressonâncias do canal auditivo e tubos. Estes espectros demonstram a importância de conhecer o comportamento acústico de cada componente do sistema de forma a garantir que o espectro final esteja adequado às necessidades do usuário.

Microfone

A função do microfone é converter sinais sonoros em sinais elétricos. Em um microfone ideal e linear, a forma de onda do sinal elétrico fornecido pelo microfone é idêntica à forma de onda do sinal acústico captado pelo microfone.

Os microfones podem ser produzidos utilizando diversas tecnologias, mas, desde os anos 80, os aparelhos auditivos têm utilizado, principalmente, microfones de eletreto (DILLON, 2001). O microfone de

eletreto (Figura 1.7) é um tipo de microfone eletrostático que funciona, basicamente, pela mudança da capacitância devido ao movimento do diafragma, que, por sua vez, gera uma tensão variável.

Uma das características principais dos microfones é a sensibilidade e a direcionalidade. A sensibilidade é a razão entre a tensão de saída do microfone e pressão sonora de entrada, e esta é dependente da frequência de análise. A direcionalidade é a sensibilidade do microfone relativa ao ângulo de incidência sonora (BRÜEL & KJÆR, 1996), e, usualmente, é fornecida por meio de um diagrama polar.

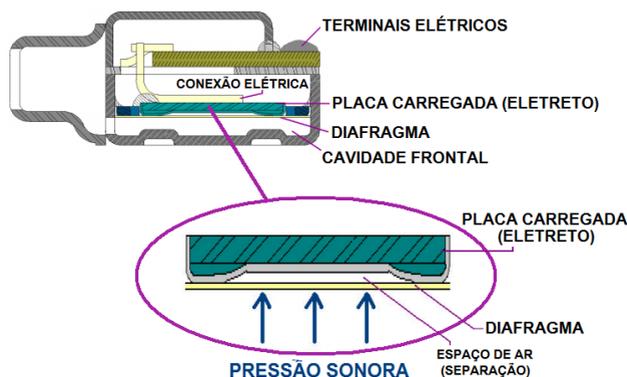


Figura 1.7: Microfone de eletreto para aparelhos auditivos (KNOWLES, 2000).

Sistema de amplificação

O sistema de amplificação é um conjunto de componentes que fornece um ganho ao sinal de entrada do aparelho auditivo, ou seja, ele entrega uma energia de saída maior que a energia de entrada. Essa energia não é gerada pelo sistema de amplificação, mas provém de uma fonte externa de alimentação, que, no caso de aparelhos auditivos, é uma bateria.

Atualmente, existem dois tipos principais de sistemas de amplificação: o analógico e o digital. O sistema de amplificação analógico utiliza um sinal elétrico contínuo e variante no tempo no seu processamento. Este sinal elétrico, fornecido pelo microfone, é análogo ao sinal acústico, captado pelo microfone, e a sua amplificação é realizada por um circuito transistorizado (amplificador). Já para o sistema de

amplificação digital, o pequeno sinal elétrico fornecido pelo microfone é convertido em *bits*, padrão necessário para a manipulação de dados em um circuito integrado, e após a conversão o sinal é analisado e manipulado por um Processador Digital de Sinais (DSP - *Digital Signal Processor*). O DSP é um circuito integrado que possui instruções para manipulação de dados (algoritmo), e, desta forma, é possível realizar operações complexas com o sinal elétrico. Estas operações realizadas com o DSP podem resultar em benefícios, como redução de ruídos, redução de retroalimentação e baixo consumo para o processamento dos sinais. Após a execução do processamento do sinal elétrico pelo DSP, é necessário que os dados em *bits* sejam convertidos para um sinal elétrico analógico e este sinal seja fornecido ao alto-falante.

Na Figura 1.8, são apresentados os diagramas com as etapas para o processamento dos sinais nos dois tipos de sistemas de amplificação.

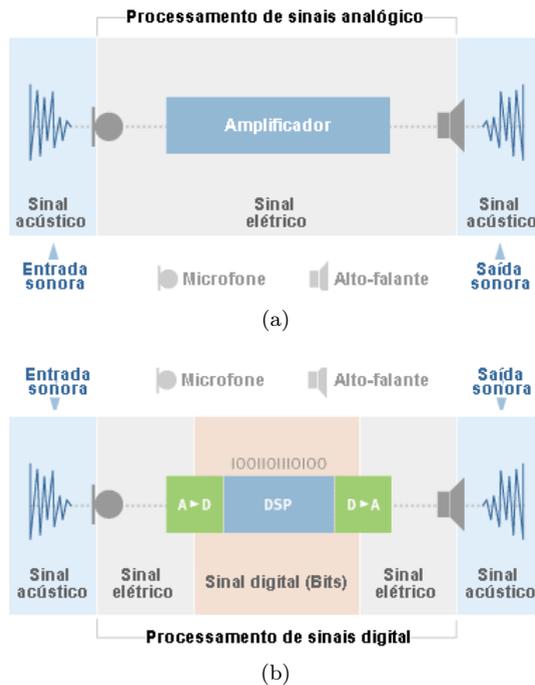


Figura 1.8: Sistema de amplificação: (a) Analógico e (b) Digital (HEARING AND EAR CARE CENTER, 2011).

A amplificação, independente do tipo de sistema, deve ocorrer de

forma controlada, de acordo com o sinal de entrada. Amplificadores não podem produzir sinais de tensão maiores que um máximo especificado, e, normalmente, esse máximo é igual, ou relacionado, com a tensão da fonte de alimentação. Quando este limite máximo é ultrapassado, o amplificador irá distorcer a forma original do sinal de entrada.

A ultrapassagem deste limite máximo pode ocorrer de duas maneiras. A primeira maneira ocorre quando o sinal de saída do amplificador está próximo do máximo especificado e o sinal de entrada aumenta. A segunda maneira ocorre quando o sinal de saída do amplificador está próximo do máximo especificado e o ganho do amplificador é aumentado.

Quando ocorrer a ultrapassagem do limite máximo de tensão, e, conseqüentemente, a distorção, os picos do sinal de saída que ultrapassam esse limite apresentarão valores fixos neste máximo limitante, Figura 1.9. Este fato ocorrido resultará em um sinal de saída que possuirá frequências não presentes no sinal de entrada.

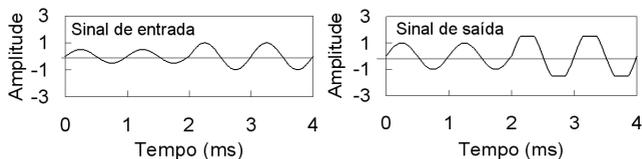


Figura 1.9: Sinal de entrada e sinal de saída saturado.

Compressor

O compressor é um equipamento do aparelho auditivo semelhante a um amplificador, mas que reduz o seu próprio ganho à medida que a amplitude do sinal de entrada aumenta. Em aparelhos auditivos digitais, a compressão é realizada de forma digital pelo DSP.

Um amplificador compressor também é chamado *Automatic Gain Control* (AGC) ou *Automatic Volume Control* (AVC), o último termo só é utilizado quando o compressor varia o ganho lentamente. Por meio do gráfico que relaciona o Nível de Pressão Sonora (NPS) de saída e NPS de entrada, Figura 1.10, é possível observar a ação do compressor no funcionamento do aparelho auditivo, pois conforme aumenta o NPS de entrada o ganho do aparelho auditivo é reduzido.

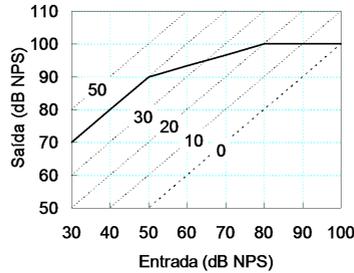


Figura 1.10: Relação entre o NPS de saída e o NPS de entrada (DILLON, 2001).

Molde

O molde, ou *earmold*, é uma peça de acrílico ou silicone, produzida segundo a impressão da orelha externa do usuário. Esta peça tem o objetivo de realizar a conexão entre o aparelho auditivo e a orelha do usuário. É importante que o aparelho auditivo permaneça na orelha externa de forma confortável por meio do molde.

O molde possui um canal que proporciona o caminho sonoro entre o alto-falante e o canal auditivo. Em muitos casos, ele pode possuir um canal de ventilação, também chamado de *vent* e denominado doravante simplesmente como ventilação. Outro objetivo do molde é diminuir a ação do efeito de oclusão. Este efeito ocasiona um aumento da pressão sonora no canal auditivo em baixas frequências.

Quando não existe o canal de ventilação, o molde é dito como ocluso, e, quando existe o canal de ventilação, o molde é dito como não-ocluso.

É importante que o molde não cause a retroalimentação. Este fenômeno ocorre quando o som produzido pelo alto-falante retorna ao microfone pelo canal de ventilação, Figura 1.11, ou por outros caminhos de vazamento, como entre o molde e as bordas do canal auditivo.

No desenvolvimento de aparelhos auditivos, as dimensões do canal de ventilação devem ser cuidadosamente definidas. Isto se deve ao fato de que a ventilação deve ser grande o suficiente para evitar o efeito de oclusão, mas não deve ser tão grande a ponto de causar a retroalimentação.

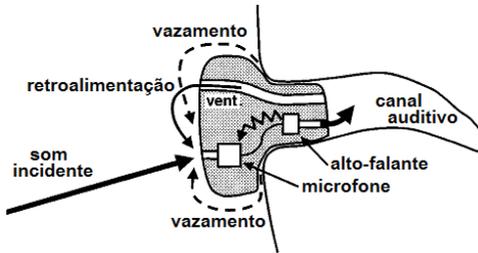


Figura 1.11: Aparelho ITE e o canal de ventilação do molde que proporciona um caminho para vazamento sonoro (STINSON; DAIGLE, 2004).

Bateria

A bateria é o componente que irá prover a energia para o aumento da amplitude do sinal fornecido pelo microfone. As características mais importantes da bateria são: tensão, capacidade (expressa em mAh), corrente máxima que pode fornecer, impedância elétrica e o tamanho (proporcional ao tempo de duração). Aparelhos auditivos potentes que necessitam grandes correntes utilizam baterias de alta capacidade sem diminuir muito sua tensão, tais baterias são referenciadas como HP (*High Performance* ou *High Power*).

1.1.2 Alto-falante para aparelhos auditivos

Os alto-falantes de aparelhos auditivos são equipamentos que recebem um sinal elétrico e convertem este sinal em um sinal sonoro, e, por isto, também são chamados de *receivers*. O princípio de funcionamento de um alto-falante para aparelho auditivo é o mesmo de um alto-falante eletrodinâmico comum.

As Figuras 1.12 e 1.13 apresentam o alto-falante para aparelho auditivo e seus componentes. Os componentes principais são: os ímãs e sua sustentação, a armadura, o terminal para ligação, a bobina, o diafragma e o pino de excitação, Figura 1.12.

A força motriz do diafragma, fina película que gera as ondas sonoras, é fornecida pela armadura, que é constituída de uma placa plana de material ferromagnético dobrado na forma de uma letra U. Um braço da armadura fica entre um espaço de ar entre os polos de dois ímãs permanentes que produzem um campo magnético perpendicular à

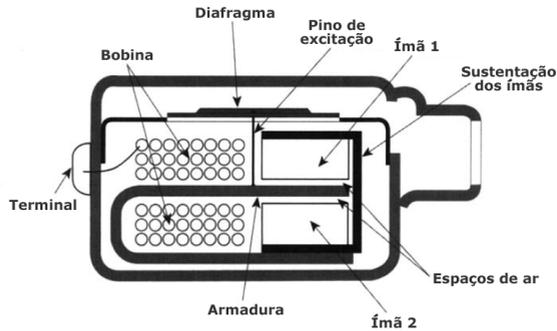


Figura 1.12: Diagrama de um alto-falante para aparelhos auditivos (HAUGHTON, 2002).

superfície da placa. O outro braço da armadura é anexado à estrutura de sustentação dos ímãs. A armadura é envolvida por uma bobina, na qual a extremidade livre da armadura é magnetizada com a polaridade que depende da direção da corrente de excitação da bobina. Portanto, a armadura é atraída por um ou outro ímã permanente.

O movimento da armadura é transmitido ao diafragma pelo pino de excitação. O diafragma atua dentro da cavidade do alto-falante, e, desta maneira, ele pode produzir uma alta pressão sonora. O som produzido pelo diafragma é transmitido por uma pequena saída na parte superior do alto-falante.

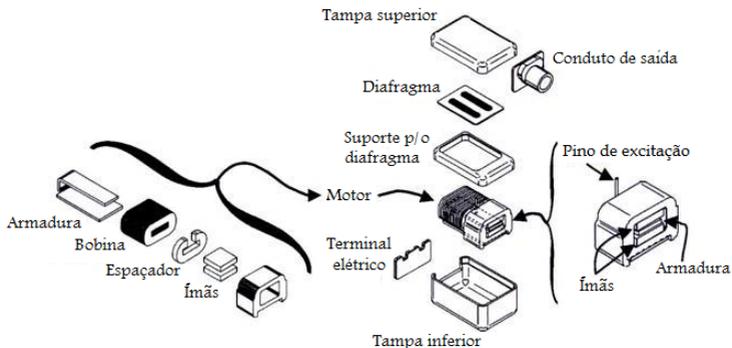


Figura 1.13: Vista explodida de um alto-falante para aparelhos auditivos (VALENTE, 2002).

O projeto de um alto-falante inclui a conflitante necessidade de um baixo consumo de energia e uma alta pressão sonora de saída. Para se conseguir uma alta pressão sonora de saída, é necessário utilizar um diafragma maior, o que aumentará o tamanho do alto-falante, ou utilizar ímãs permanentes mais potentes, o que exigiria uma quantidade maior de energia para o alto-falante funcionar, ou seja, baterias de alta capacidade devido ao aumento do consumo (DILLON, 2001). Um tamanho pequeno e um custo reduzido são outras considerações importantes no desenvolvimento de aparelhos auditivos. Quanto ao tamanho do aparelho auditivo, pode-se constatar a preocupação com esta característica analisando-se a evolução dos microfones e alto-falantes, Figura 1.14.

O tamanho e o custo dos alto-falantes são importantes no desenvolvimento de aparelhos auditivos, pois estas qualidades estão diretamente relacionadas com a estética do aparelho auditivo e com a sua competitividade no mercado.

Outro parâmetro a se considerar no projeto de alto-falantes é que o deslocamento do diafragma deve ser razoavelmente linear em função da corrente de excitação para evitar a presença da distorção no sinal de saída e não prejudicar a qualidade sonora do sinal de saída.

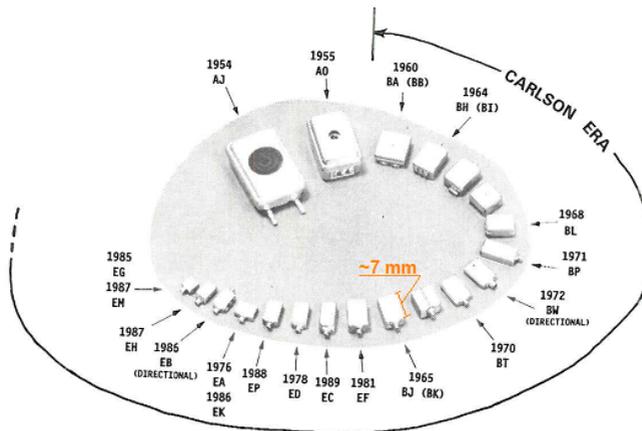


Figura 1.14: Evolução dos alto-falantes e microfones para aparelhos auditivos (KILLION, 1992).

1.1.3 Métodos de medição para aparelhos auditivos

A avaliação do desempenho de um aparelho auditivo envolve a análise de um conjunto de características de operação. Para analisar tais características, foram desenvolvidos alguns métodos de medição.

Para a definição de um método de medição adequado para alto-falantes, primeiramente, será necessário investigar os métodos de medição existentes para aparelhos auditivos. Após esta investigação, determinar-se-á aqueles métodos de medição que serão mais adequados para os alto-falantes. Caso necessário, realizar-se-ão adaptações para as medições com alto-falantes.

Os métodos de medição existentes foram padronizados para se permitir uma comparação mais adequada. Atualmente, existem dois tipos principais de métodos de medição: medição em condições reais de uso e medição em condições artificiais.

Medição em condições artificiais

As medições em condições artificiais visam a análise de aparelhos auditivos por meio de equipamentos que forneçam resultados próximos de uma medição realizada na condição real de uso destes. As medições em condições reais de uso são as medições realizadas no próprio usuário de aparelho auditivo e serão apresentadas posteriormente.

Os equipamentos utilizados para simular a condição real de uso dos aparelhos auditivos são chamados de acopladores, simuladores de orelha e manequim. Os motivos da criação destes equipamentos são a complexidade de realizar a medição em uma orelha humana e a baixa reprodutibilidade deste ensaio.

Um acoplador é uma cavidade a qual é conectado um aparelho auditivo em uma extremidade e um microfone à outra extremidade. O acoplador padrão, usado por mais de 50 anos, tem um volume de 2 cm^3 (DILLON, 2001). Este volume foi escolhido com base no volume do canal auditivo de um adulto (Figura 1.15a) com o molde, ou seja, quando um aparelho auditivo é utilizado. O acoplador não representa uma cópia fiel das propriedades acústicas de uma orelha real, mas representa um volume com dimensões padronizadas.

O NPS em uma orelha humana é consideravelmente maior que em um acoplador de 2 cm^3 , particularmente em frequências acima de 1 kHz, em que a impedância do canal auditivo diminui bastante, Figura 1.15b.

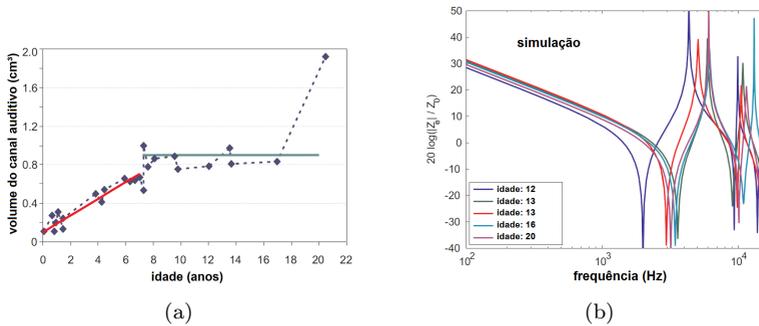


Figura 1.15: (a): Volume do canal auditivo em cm^3 em função da idade (FELS et al., 2007) e (b): Impedância do canal auditivo (FELS et al., 2007) em função da frequência.

A ANSI (ANSI, 1976) descreve os acopladores de 2 cm^3 utilizados em diversas aplicações, os mais importantes são:

Acoplador HA1 : não possui simulador de molde e é usado para aparelhos auditivos ITE, ITC e CIC, Figura 1.16a;

Acoplador HA2 : inclui um simulador de molde, o qual é conectado ao aparelho auditivo BTE por meio de um tubo, Figura 1.16b.

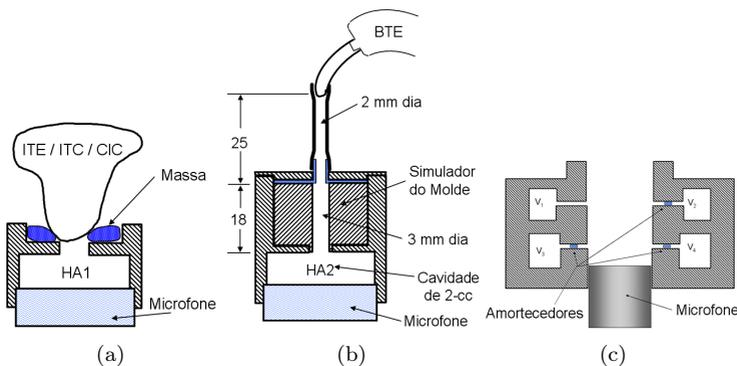


Figura 1.16: Diagrama do: (a) Acoplador HA1, (b) Acoplador HA2 e (c) Simulador de orelha (DILLON, 2001).

Um simulador de orelha busca representar a porção do canal auditivo entre a extremidade do molde e o tímpano, ou seja, a variação de impedância da orelha média e externa (VALENTE *et al.*, 2000). Sua estrutura simplificada é formada por uma cavidade central com cavidades laterais conectadas à cavidade central por meio de pequenos tubos, sendo que alguns destes possuem amortecedores (elementos que aumentam a perda viscosa), Figura 1.16c.

É importante considerar que o aparelho auditivo é fixado em uma pessoa, e que a pinna ou pavilhão auditivo, a cabeça e o torso vão influenciar no sinal sonoro que provém da fonte e chega ao microfone do aparelho.

Para simular tais modificações do sinal sonoro, utiliza-se um manequim. No caso de medições com aparelhos auditivos, uma opção é utilizar o manequim KEMAR - *Knowles Electronics Manikin for Acoustic Research*, Figura 1.17.



Figura 1.17: KEMAR - *Knowles Electronics Manikin for Acoustic Research*.

Dentro do canal auditivo do manequim KEMAR pode-se utilizar um simulador de orelha baseado no projeto de Zwislocki (BURKHARD; SACHS, 1975). Medições utilizando o manequim são, normalmente, re-

alizadas em ambientes com excelente absorção e atenuação sonora (câmara anecoica) (VALENTE et al., 2000). Este ambiente, normalmente, é utilizado porque deseja-se realizar uma análise do campo direto de forma que o campo reflexivo não interfira nas medições.

Analizador de aparelhos auditivos

Devido à necessidade de cada fabricante de aparelhos auditivos realizar medições nos seus produtos, desenvolveram-se equipamentos para possibilitar um controle de qualidade de aparelhos auditivos com um procedimento facilitado e automatizado.

Um analisador de aparelhos auditivos, Figura 1.18, também chamado de *test box*, é um equipamento utilizado para qualificação de aparelhos auditivos, que inclui um gerador de sinais, um amplificador, um analisador de sinais, um alto-falante, um acoplador ou simulador de orelha e um microfone de controle. As medições deste equipamento são realizadas em um ambiente que atenua ruídos externos e reflexões internas (minicâmara anecoica). Entretanto, estes equipamentos não devem ser utilizados na realização de medições que buscam avaliar a direcionalidade do aparelho auditivo, pois estas devem ser realizadas em câmaras anecoicas ou semianecoicas.



Figura 1.18: Analisador de aparelhos auditivos.

No analisador de aparelhos auditivos, um alto-falante gera um som com um NPS determinado pelo operador do equipamento. O microfone de controle é posicionado próximo ao microfone do aparelho auditivo para monitorar o NPS local. Caso o NPS não esteja de acordo com o determinado para teste, o analisador de aparelhos auditivos re-

alizará o ajuste de ganho do amplificador.

Para as medições com o analisador, podem-se utilizar dois tipos de sinais, um sinal senoidal, que varre automaticamente a região de frequência desejada (*sweep*), ou um sinal de banda larga, que irá representar mais precisamente como o aparelho auditivo altera a forma espectral da fala (DILLON, 2001).

Devido a este equipamento utilizar um sinal sonoro como excitação, tal método não será adequado para avaliação de alto-falantes.

Medição em condições reais de uso

Medições com o acoplador, simulador de orelha ou o manequim, são realizadas de forma mais prática, mas é importante que a resposta obtida reflita a perspectiva do usuário de um aparelho auditivo. As medições em condições reais de uso são um meio de se obter uma resposta sob a perspectiva do usuário de aparelho auditivo.

Ao longo dos últimos 15 anos, tornou-se possível realizar as medições em usuários de aparelhos auditivos utilizando-se sondas de medição, também chamadas de *probe-tubes* (DILLON, 2001). Uma sonda de medição consiste em um fino e flexível tubo que é conectado a um microfone.

Existem diversas medições padronizadas que utilizam sondas de medição, dentre elas, pode-se citar:

Resposta da orelha sem aparelho auditivo: realiza-se a medição da pressão sonora com a sonda de medição posicionada em um local específico no canal auditivo sem a presença do aparelho auditivo no usuário, Figura 1.19a. Esta medição também é conhecida como *Real-Ear Unaided Response* - REUR ;

Resposta da orelha com aparelho auditivo: realiza-se a medição da pressão sonora com a sonda de medição posicionada em um local específico no canal auditivo com a presença do aparelho auditivo no usuário e esse estando em funcionamento, Figura 1.19b. Esta medição também é conhecida como *Real-Ear Aided Response* - REAR ;

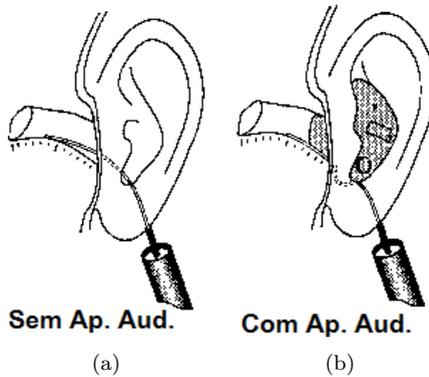


Figura 1.19: (a) REUR e (b) REAR.

Ganho de inserção na orelha: diferença em decibéis, em função da frequência, entre REAR e REUR medidos nos mesmos locais, conforme Equação (1.1). Esta medição também é conhecida como *Real-Ear Insertion Gain* - REIG ;

$$REIG(f) = REAR(f) - REUR(f). \quad (1.1)$$

Diferença entre orelha e acoplador: diferença em decibéis, em função da frequência, entre a medição em condições reais com o aparelho auditivo e a medição em condições artificiais com o acoplador, conforme Equação (1.2). Esta medição também é conhecida como *Real-Ear-to-Coupler Difference* - RECD ;

$$RECD(f) = REAR(f) - [Acoplador(f)]. \quad (1.2)$$

Para a realização da medição em condições reais de uso, é necessário ter uma fonte sonora que emita o sinal para o microfone do aparelho auditivo e um microfone de referência para se controlar o NPS próximo à orelha.

Comentários

Os principais métodos que são utilizados para avaliar o desempenho de aparelhos auditivos foram, rapidamente, apresentados nesta

seção. No entanto, o direcionamento do trabalho se dará em função do desempenho do alto-falante para aparelhos auditivos.

O método que utiliza o analisador de aparelhos auditivos não será utilizado para avaliar o alto-falante, pois este método acaba considerando a influência do ambiente externo ao aparelho auditivo e de outros componentes do aparelho auditivo, como microfone, compressor e amplificador, na resposta do alto-falante, e tais efeitos serão desconsiderados nas análises do presente trabalho. Desta forma, ao se trabalhar com as medições realizadas unicamente com o alto-falante e o seu sistema acústico acoplado, não se utilizará mais um sinal acústico de entrada, mas sim um sinal elétrico aplicado diretamente nos terminais do alto-falante. Da mesma forma, as medições em condições reais de uso e em condições artificiais (acopladores, simulador de orelha e manequim) para serem aplicadas aos alto-falantes deverão ser adaptadas utilizando um sinal elétrico para excitação e não mais um sinal sonoro.

1.2 Parâmetros de avaliação de alto-falantes

O desempenho de um aparelho auditivo, normalmente, é apresentado em termos de suas características eletroacústicas. As cinco principais características são: ganho (amplificação), nível de saturação, função resposta em frequência, distorção e consumo. Por meio destes dados, busca-se estimar a qualidade de um aparelho auditivo.

Não convém utilizar o ganho e o nível de saturação no processo de avaliação de alto-falantes, pois tais características dependem muito mais do amplificador e do processamento de sinais. Entretanto, a função resposta em frequência, a distorção e o consumo de um aparelho auditivo estão mais relacionadas com o alto-falante.

1.2.1 Distorção

Um aparelho auditivo ideal deveria ser capaz de produzir uma saída idêntica ao sinal de entrada, diferente apenas na sua amplitude. Quando o sinal de saída não reproduz exatamente o sinal de entrada, a esse efeito é dado o nome de distorção (MALTBY, 2002). Quando a saída para um sinal senoidal de entrada é distorcida, o sinal de saída deixa de ser uma onda senoidal e passa a conter componentes em outras frequências as quais não estavam presentes no sinal de entrada. A

distorção pode ser expressa por meio de um valor em dB, ou também por meio de uma porcentagem.

Quando o sinal de entrada é um sinal senoidal, os produtos de distorção ocorrem em frequências múltiplas inteiras do sinal de entrada. Conseqüentemente, este processo é chamado de distorção harmônica. Quando um sinal mais complexo é distorcido, os produtos de distorção ocorrem nas harmônicas de todas as frequências presentes no sinal de entrada e também em frequências que são combinações das harmônicas. A este processo é dado o nome distorção por intermodulação (DILLON, 2001). O nível de distorção harmônica apresentado em um sinal é referenciado como THD (*Total Harmonic Distortion*). No processo de avaliação da distorção harmônica, é necessário conhecer a amplitude do sinal senoidal e a somatória das suas harmônicas, a quantidade resultante da distorção é referenciada como THD e é dada da seguinte forma, em porcentagem e em dB (DILLON, 2001):

$$THD_{\%} = 100 \sqrt{\left(\frac{p_{2h}^2 + p_{3h}^2 + p_{4h}^2 + \dots}{p_{1h}^2 + p_{2h}^2 + p_{3h}^2 + p_{4h}^2 + \dots} \right)} \%, \quad (1.3a)$$

$$THD_{dB} = 10 \log \sqrt{\left(\frac{p_{2h}^2 + p_{3h}^2 + p_{4h}^2 + \dots}{p_{1h}^2 + p_{2h}^2 + p_{3h}^2 + p_{4h}^2 + \dots} \right)} \text{ dB}, \quad (1.3b)$$

onde p_{nh} é a pressão sonora da n -ésima harmônica. A primeira harmônica é a frequência do sinal de entrada, que representa a parte não distorcida do sinal, também chamada de fundamental.

A distorção degrada a qualidade do sinal, principalmente de sinais de fala, mesmo quando presente em quantidades moderadas. Uma distorção que representa 10% da energia do sinal total já pode degradar a qualidade da fala. Segundo Martin e Grover (1976), o efeito da distorção na inteligibilidade da fala é maior em um ambiente ruidoso do que em um ambiente silencioso.

1.2.2 Função Resposta em Frequência - FRF

A Função Resposta em Frequência (FRF) é uma função que relaciona a resposta com a excitação de um sistema. A FRF é uma ferramenta muito útil para analisar o comportamento de sistemas lineares invariantes no tempo, tais como o alto-falante para aparelhos auditivos, dentro dos seus limites usuais de trabalho. Por meio da FRF é possível obter o gráfico de resposta em frequência, que representa o compor-

tamento de um sistema na frequência. Na Figura 1.20 visualiza-se o exemplo de uma FRF para um alto-falante destinado a aparelhos auditivos.

A FRF de um alto-falante para aparelho auditivo pode ser significativamente alterado devido à mudança da impedância acústica vista pelo alto-falante. Ou seja, o comportamento do alto-falante depende do sistema acústico ao qual ele estiver acoplado. Isto indica a importância de se analisar o comportamento do alto-falante no seu ambiente de uso, ou em um ambiente suficientemente semelhante, pois se analisado o alto-falante em outro ambiente os resultados obtidos não refletirão a real perspectiva de um usuário de aparelho auditivo.

Na acústica existem dois tipos principais de impedâncias: a impedância acústica específica e a impedância acústica. A impedância acústica específica, que é útil para a análise de transmissão de ondas sonoras de um meio para outro, é uma característica do meio propagador e do tipo de onda propagante. A impedância acústica, é aplicada na análise de radiação acústica proveniente de superfícies vibrantes e na análise de transmissão sonora por meio de elementos acústicos de parâmetros concentrados e por meio de dutos (RAICHEL, 2000).

A impedância acústica específica, Z_{ac-e} , é definida como:

$$Z_{ac-e} = \frac{p}{u}, \quad (1.4)$$

onde u é a velocidade de partícula e p é a pressão sonora.

A impedância acústica, Z_{ac} , de um fluido sob ação da variação de pressão sonora, p , em uma superfície de área, A_s , é definida como:

$$Z_{ac} = \frac{p}{U}, \quad (1.5)$$

onde U representa a velocidade de volume de um fluido no elemento acústico de interesse.

A FRF é uma característica importante de se obter, pois representa o produto principal a ser fornecido pelo aparelho auditivo. Ou seja, a partir da análise da FRF será possível verificar se esta é adequado com a perda auditiva do usuário, suprimindo as necessidades deste. A obtenção da FRF pode ser realizada experimentalmente ou numericamente. O objetivo deste trabalho é obter esta característica de forma numérica, pois, desta forma, dispensar-se-á a necessidade da realização de ensaios experimentais e facilitar-se-ão as análises do comportamento do alto-falante.

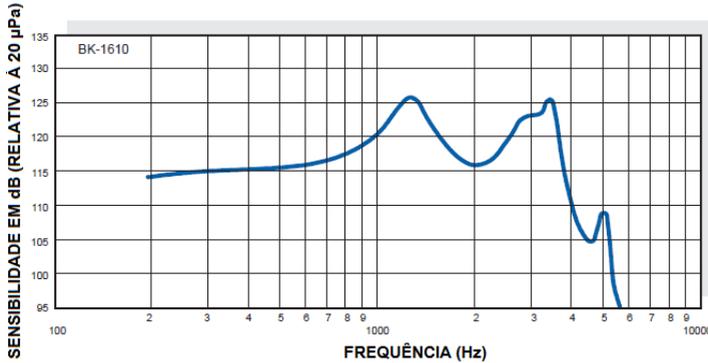


Figura 1.20: FRF típica de um alto-falante de aparelho auditivo (KNOWLES, 2009).

1.2.3 Consumo

Com o avanço tecnológico, aparelhos auditivos ficaram cada vez menores e mais potentes. Estes são alimentados, geralmente, por uma pequena bateria de 1,4 volt, que pode durar em torno de alguns dias até algumas semanas (DICRISTINA, 2010). Desta forma, o consumo se torna um ponto importante para que o usuário possa evitar a troca constante de baterias.

Alguns aparelhos auditivos estão começando a utilizar baterias recarregáveis, enquanto que em outros é possível recarregar as baterias a partir da energia solar (SOLAR EAR, 2010), Figura 1.21. Recentemente, tem-se estudado a possibilidade de alimentar o aparelho auditivo a partir da energia vibratória do usuário (caminhar, comer, falar...) (AMOR; KANOUN, 2007). Como o alto-falante é um dos principais componentes que utilizarão a energia da bateria, considerou-se importante analisar o consumo do alto-falante. A obtenção do consumo do alto-falante será realizada com base nos valores de tensão elétrica, V , e corrente elétrica, I , referentes ao alto-falante. A partir destes dados, é possível obter a potência elétrica, P , consumida pelo alto-falante.



Figura 1.21: Aparelho auditivo recarregável a energia solar (SOLAR EAR, 2010).

1.3 Métodos de caracterização experimental de fontes

Alto-falantes de aparelhos auditivos podem ser vistos como fontes acústicas conectadas a dutos. Fontes em dutos são, frequentemente, encontradas em sistemas mecânicos. Nesses sistemas, a fonte é o componente ativo (Ex.: Motores, alto-falantes e exaustores) e a carga é o componente passivo (Ex.: Mufflers, dutos e terminações). O comportamento acústico destes sistemas dependem da interação fonte-carga.

Alguns métodos foram desenvolvidos para poder avaliar as características da fonte, os quais podem ser agrupados em métodos diretos e indiretos. O método baseado na função resposta em frequência também é apresentado, mas, assim como os métodos diretos e indiretos, também é essencialmente experimental e baseado no domínio da frequência.

Alguns métodos aqui apresentados utilizam analogias elétricas e se mostraram úteis para prever a performance acústica de sistemas (CROCKER, 1998). Para prever o som radiado por uma fonte sonora, utilizando a analogia elétrica, será necessário ter o conhecimento da fonte de pressão (correspondente à tensão de circuito aberto de uma fonte elétrica) e a impedância da fonte (correspondente à impedância interna de uma fonte elétrica) (MUNJAL, 1987). A partir destas duas características, é possível prever a resposta do sistema na faixa de frequência de interesse.

1.3.1 Método baseado na Função Resposta em Frequência

O método baseado na Função Resposta em Frequência, tem sido utilizado para modelar diversos sistemas como motores, circuitos elétricos, amplificadores, sistemas mecânicos e alto-falantes (BAKSHI; GOYAL, 2009). Este método é utilizado no domínio da frequência, e desta forma é possível particionar o sistema em diversos blocos funcionais (alto-falante e dutos, para o exemplo da Figura 1.22). Para cada bloco, é possível representar o comportamento na frequência do componente por meio de uma função de transferência, ou também chamada de Função Resposta em Frequência (FRF). A partir de dados experimentais ou analíticos, é possível obter as FRF's dos componentes do sistema e manipulando os blocos funcionais (FRF's) é possível obter a FRF isolada de um sistema desejado. Como as FRF de sistemas podem ser facilmente obtidas experimentalmente, isto caracteriza uma vantagem em utilizar este método.

Como exemplo, tem-se o caso da obtenção da FRF do alto-falante para aparelho auditivo. O experimento a se analisar é apresentado na Figura 1.23, e o sistema é composto pelo alto-falante, tubo flexível, cavidade, e o microfone captando a pressão sonora. Na Figura 1.22, o bloco H1 representa a FRF Pressão/Tensão do alto-falante (saída do alto-falante/terminais do alto-falante - P1/E1) e o bloco H2 a FRF Pressão/Pressão (mic. acoplador/saída do alto-falante - P2/P1). O objetivo da utilização do método é obter a FRF do alto-falante a partir da FRF global (H3 - Pressão/Tensão (mic. acoplador/terminais do alto-falante - P2/E1), Figura 1.24) e a FRF dos dutos (H2 - Pressão/Pressão (mic. acoplador/entrada sistema acústico - P2/P1)). O sistema global, (H3 = H1H2), utilizado no experimento, é apresentado na Figura 1.23.

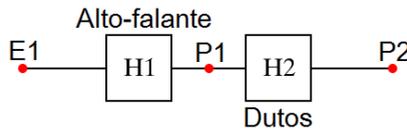


Figura 1.22: Diagrama de blocos do sistema analisado experimentalmente.

Este método, embora possa ser aplicado ao alto-falante para aparelho auditivo, não é recomendado, pois o método somente será eficiente quando a fonte a ser caracterizada não for significativamente

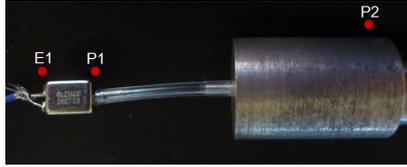


Figura 1.23: Experimento analisado.

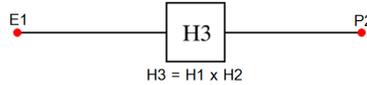


Figura 1.24: Pressão (mic. acoplador)/Tensão (terminais do alto-falante).

alterada pela carga sob teste. Como o comportamento do alto-falante é alterado significativamente devido ao sistema acústico (carga) ao qual ele estiver acoplado, a FRF obtida para o alto-falante somente representará bem o sistema acústico ensaiado experimentalmente e não será uma boa representação para outros sistemas acústicos a se simular.

1.3.2 Método Direto

O método direto é fundamentado na hipótese de que, se ondas acústicas “suficientemente fortes” forem direcionadas a uma máquina (fonte analisada), o campo de pressão resultante vai ser mais ou menos independente do som radiado pela máquina, e a análise do campo de pressão deverá fornecer a impedância da fonte. O som enviado pela fonte sonora para determinar a impedância da máquina deve predominar por toda a faixa de frequência de interesse. De forma geral, a relação sinal-ruído deve ser de, no mínimo, 10 dB (CROCKER, 1998). O método direto é adequado somente para determinar uma das duas características da fonte, que é a sua impedância.

1.3.3 Método Indireto

O método indireto faz uso do fato de que, quando uma fonte com características internas (fonte de pressão e impedância), é conectada a uma carga, a potência acústica de saída vai estar em função não apenas

da carga, mas também da fonte. Conectando-se a fonte a diferentes cargas e medindo-se a potência acústica de saída, é possível organizar o número necessário de equações e resolvê-las, simultaneamente, para extrair as características da fonte.

O Método de Duas Cargas é um exemplo de método indireto, pois está baseado na realização de dois experimentos com duas cargas distintas, e a partir dos dados obtidos nos experimentos é possível caracterizar uma fonte. Este método já foi aplicado para alto-falantes de aparelhos auditivo (EGOLF; LEONARD, 1977), e neste caso o alto-falante deve ser modelado com base em duas variáveis de entrada (tensão e corrente elétrica) e duas variáveis de saída (pressão sonora e velocidade de volume), e o sistema acústico, também, em duas variáveis de entrada (pressão sonora e velocidade de volume) e duas variáveis de saída (pressão sonora e velocidade de volume). Logo, para representar o alto-falante e o sistema acústico acoplado a ele será necessário a utilização de matrizes. As matrizes representando o comportamento de cada componente do sistema também são referenciadas como matrizes de transferência, e o método que tem como base a utilização destas é referenciado como Método das Matrizes de Transferência.

1.4 Objetivos e contribuições

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um método para caracterização de alto-falantes para aparelhos auditivos de forma que seja possível avaliar o comportamento do alto-falante em condições reais de uso e obter o NPS ao qual um usuário de aparelho auditivo estaria sujeito. Para alcançar tal objetivo, realizou-se uma pesquisa nos métodos experimentais existentes para caracterização e avaliação de aparelhos auditivos. Após a pesquisa, foi implementado um método experimental existente na literatura capaz de simular o comportamento do alto-falante para aparelhos auditivos (MDC).

Objetivos específicos:

- Implementar as metodologias de caracterização e avaliação descritas na literatura;
- Implementar e validar os métodos analíticos e/ou numéricos que permitam avaliar o alto-falante em condições reais de uso.

As contribuições esperadas para este trabalho são fornecer uma nova perspectiva na maneira de integrar o alto-falante no desenvolvimento de aparelhos auditivos e melhorar o processo de adaptação do

usuário ao aparelho auditivo realizado pelo fonoaudiólogo, pois os métodos utilizados em alguns casos não contemplam a influência do alto-falante na resposta fornecida ao usuário.

1.5 Organização da dissertação

Este trabalho de pesquisa representa um dos primeiros trabalhos focados em aparelhos auditivos no Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA-UFSC), sendo assim, considerou-se importante apresentar um breve panorama do universo dos aparelhos auditivos, conforme apresentado no Capítulo 1, e, em seguida, aprofundar-se mais especificamente no que tange o alto-falante destes equipamentos.

No Capítulo 2 é apresentado o Método de Matrizes de Transferência (MMT). Este método é utilizado para representar diversos sistemas e simular o comportamento destes em outras condições desejadas. Sendo o alto-falante para aparelhos auditivos um dos sistemas possíveis de se simular utilizando o MMT, abordaram-se, neste capítulo, as formulações específicas para desenvolver um modelo representativo do alto-falante e de seu sistema de transmissão sonora até a orelha humana.

A partir do Capítulo 3 em diante, são apresentadas as análises experimentais e a definição dos procedimentos para tais análises. No Capítulo 3 são apresentadas as etapas necessárias para se obter o comportamento do alto-falante para simulação via MMT e são analisadas algumas das características eletroacústicas dos alto-falantes. O enfoque, para tais análises, está em apresentar os resultados preliminares obtidos pelo MMT em conjunto com o Método de Duas Cargas (MDC) e confirmar que os critérios para utilização deste último não foram violados, validando, preliminarmente, a metodologia.

No Capítulo 4 são apresentadas as análises de mais duas características dos alto-falantes, a distorção e o consumo. Neste capítulo, também é apresentada uma análise da impedância elétrica do alto-falante, pois esta característica está relacionada com o consumo.

No Capítulo 5 é proposto um ensaio experimental que está bem próximo da condição real de uso para aparelhos auditivos. Os resultados numéricos, obtidos por meio do MMT e do MDC, são comparados com os resultados experimentais para validação do modelo numérico do alto-falante. Também são apresentadas no Capítulo 5 algumas análises para dar suporte a um modelo analítico mais refinado.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho e

a proposta final de uma metodologia para análise das características do alto-falante para aparelhos auditivos. E, finalizando-se o trabalho, expõem-se algumas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

MÉTODO DAS MATRIZES DE TRANSFERÊNCIA

2.1 Introdução

O Método das Matrizes de Transferência (MMT) tem sido utilizado na representação de sistemas elétricos, mecânicos e acústicos ou, até mesmo, os três sistemas acoplados, como é exemplificado na Figura 2.1. Na Figura 2.1b, este sistema eletro-mecânico-acústico é representado por meio de matrizes de transferência e as variáveis envolvidas são:

1. Sistema elétrico: tensão de entrada (E_i) e saída (E_o), e corrente de entrada (I_i) e saída (I_o);
2. Sistema mecânico: força de entrada (F_i) e saída (F_o), e velocidade de entrada (W_i) e saída (W_o);
3. Sistema acústico: pressão sonora de entrada (P_i) e saída (P_o), e velocidade de volume de entrada (U_i) e saída (U_o).

A utilização do MMT é bastante conveniente devido à simplicidade em sua formulação e resolução numérica. A propriedade de trabalhar em cascata é uma das razões de sua simplicidade, pois ela permite formular modelos independentes e distintos e combiná-los pela simples multiplicação das matrizes de cada sistema isolado. Desta forma, é

possível desenvolver modelos de sistemas complexos a partir da combinação de modelos de sistemas simples.

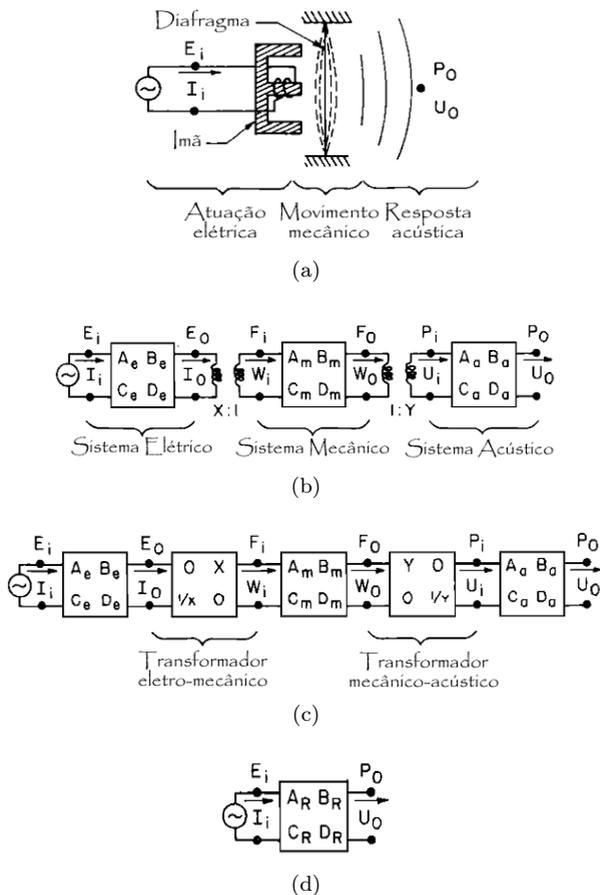


Figura 2.1: Transdutor eletromagnético típico: (a) Diagrama esquemático, (b) Análogo utilizando matrizes de transferência vinculadas por transformadores, (c) Análogo utilizando apenas matrizes de transferência, e (d) Análogo utilizando uma única matriz de transferência (EGOLF; LEONARD, 1977).

Usualmente, o MMT é formulado para um sistema de equações de duas variáveis, tensão e corrente para sistemas elétricos, força e velocidade para sistemas mecânicos, e pressão e velocidade de volume para sistemas acústicos. Na acústica, o método tem sido aplicado para

sistemas de parâmetros concentrados e/ou elementos unidimensionais (elementos nos quais a dimensão da seção transversal é pequena, comparada ao comprimento de onda de interesse) (KULKARNI, 2003).

2.2 Matrizes de transferência na acústica

As matrizes de transferência têm sido utilizadas na acústica para sistemas de dutos, mas a propriedade de cascata possibilita representar outros sistemas, como silenciadores (THIEME, 2000), cavidades acústicas (SANTOS et al., 2007), linhas de dutos com ressonadores (KULKARNI, 2003) e circuitos típicos de aparelhos auditivos (EGOLF; LEONARD, 1977), sendo a última aplicação a razão do MMT ser conveniente para este trabalho.

O aparelho auditivo tem a função de proporcionar a pressão sonora no tímpano do usuário segundo a necessidade deste. O sinal de pressão sonora no tímpano é o resultado da participação de cada componente do sistema acústico do alto-falante até o tímpano. Este sistema acústico compreende os componentes necessários para que o sinal acústico gerado pelo alto-falante chegue até o tímpano. Este sistema em conjunto com o alto-falante e o tímpano é apresentado na Figura 1.3. Inicialmente, o som é gerado pelo alto-falante e transmitido ao tímpano por meio do tubo curvado (ear-hook), do tubo de conexão com molde, do molde (com ou sem ventilação) e, finalmente, por meio do canal auditivo.

Para modelar este sistema acústico, será utilizada a teoria da propagação sonora em tubos com ou sem perdas. O tímpano será modelado por meio de uma impedância acústica que represente o seu comportamento acústico. Esta impedância será utilizada como uma impedância acústica de terminação no modelo de matrizes de transferência.

O alto-falante será caracterizado a partir do Método de Duas Cargas (MDC), que é um método experimental utilizado para determinar as propriedades de transdutores eletroacústicos, como alto-falantes e microfones e que será discutido em mais detalhes na Subseção 2.2.5. A Tabela 2.1 apresenta de forma concisa os métodos utilizados para se obter as matrizes de transferência de cada componente do sistema do aparelho auditivo ao usuário.

Tabela 2.1: Componentes e métodos utilizados na elaboração do modelo de matrizes de transferência.

Componente	Método utilizado para determinar as matrizes de transferência
<i>Alto-falante</i>	Método de Duas Cargas
<i>Tubo curvado</i>	Propagação em tubos (com perdas)
<i>Tubo</i>	Propagação em tubos (com perdas)
<i>Molde</i>	Propagação em tubos (com perdas)
<i>Canal auditivo</i>	Propagação em tubos (com perdas)
<i>Orelha humana</i>	Impedância acústica
<i>Microfone</i>	Impedância acústica
<i>Simulador de orelha</i>	Impedância acústica

2.2.1 Matrizes de transferência para elementos acústicos

Com a finalidade de se obter a matriz de transferência para a propagação sonora em tubos, será necessário primeiro obter as respectivas soluções de pressão e velocidade de partícula em diferentes pontos do sistema de dutos.

Para tais soluções, será considerado um fluido ideal e a condução térmica entre elementos de volume adjacentes será desprezada. Desta forma, o processo termodinâmico relacionado à propagação de ondas sonoras é considerado isentrópico. As equações básicas a serem utilizadas são:

1. Continuidade: $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0$,
2. Quantidade de Movimento: $\rho \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} \right] + \vec{\nabla} p = 0$,
3. Relação termodinâmica (Processo isentrópico): $\frac{\partial p}{\partial t} = c_0^2 \frac{\partial \rho}{\partial t}$,

onde c_0 é uma constante, u é a velocidade de partícula, ρ é a densidade do meio e p é pressão sonora do meio. A densidade do meio, a qual é composta por um valor de equilíbrio ρ_0 e um pequeno valor variável no tempo ρ' é definida como:

$$\rho = \rho_0 + \rho'. \quad (2.1)$$

A pressão sonora do meio, a qual é composta por um valor de equilíbrio p_0 e um pequeno valor variável no tempo p' é definida como:

$$p = p_0 + p'. \quad (2.2)$$

Combinando a relação termodinâmica com a equação da continuidade, obtém-se o seguinte resultado:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + c_0^2 \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0. \quad (2.3)$$

Eliminando termos de derivadas aplicadas a constantes, e linearizando as equações (termos de segunda ordem ou de ordem mais elevada são desprezados), e tendo em vista as diferenças de ordem de grandeza, obtém-se:

$$\frac{\partial p'}{\partial t} + \rho_0 c_0^2 \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \quad (2.4)$$

e

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{\nabla} p' = 0. \quad (2.5)$$

Eliminando a velocidade de partícula pela combinação das Equações (2.4) e (2.5), obtém-se a equação da onda:

$$\nabla^2 p' - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = 0, \quad (2.6)$$

onde c_0 é a velocidade do som no meio para pequenas perturbações, e o operador Laplaciano ∇^2 tem a seguinte forma:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (2.7)$$

Em tubos cilíndricos, em que o diâmetro for suficientemente pequeno em relação à frequência de propagação do som, o campo sonoro pode ser considerado plano, ou seja, a pressão sonora e a velocidade de partícula são constantes ao longo da seção transversal do tubo. Esta condição é satisfeita de acordo com o seguinte critério (MUNJAL, 1987):

$$ka_n < 1,84(1 - M^2) \quad (2.8)$$

onde,

$$k = \frac{\omega}{c_0} \quad (2.9)$$

é o número de onda, e ω é a frequência angular, $\omega = 2\pi f$, a_n é o raio do tubo, e M é o número de Mach. O número de Mach é uma unidade de medida de velocidade definida como a relação entre a velocidade do objeto c_{obj} , no caso do tubo é a velocidade do fluido, e a velocidade do som c_0 , $M = \frac{c_{obj}}{c_0}$. Em um fluido estacionário, analisado na faixa de frequência até 12,8 kHz, é uma boa aproximação assumir ondas planas em qualquer tubo com um diâmetro interno menor que 15,7 mm.

Para ondas planas, o som se propaga somente em uma direção e a equação da onda simplifica-se para:

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = 0. \quad (2.10)$$

Considerando que o comportamento no tempo para a pressão sonora pode ser descrito por meio de uma função senoidal (comportamento harmônico no tempo), a Equação (2.10) se torna a Equação de Helmholtz:

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} - k^2 p' = 0. \quad (2.11)$$

A solução geral para a Equação (2.11) é dada por:

$$\tilde{p}' = \left(\tilde{A}_{sol} e^{-jkx} + \tilde{B}_{sol} e^{+jkx} \right) e^{j\omega t}. \quad (2.12)$$

A partir da Equação (2.5), é possível obter a solução para a velocidade de partícula, que, para ondas planas, é:

$$\tilde{u} = -\frac{1}{j\omega\rho} \frac{\partial \tilde{p}'}{\partial x} = \frac{1}{\rho_0 c_0} \left(\tilde{A}_{sol} e^{-jkx} - \tilde{B}_{sol} e^{+jkx} \right) e^{j\omega t}. \quad (2.13)$$

A velocidade de volume, que é a integral da velocidade de partícula ao longo da seção transversal do tubo, é definida, para ondas planas, como:

$$\tilde{U} = \int_S \tilde{u} dS = S \tilde{u} = \frac{S}{\rho_0 c_0} \left(\tilde{A}_{sol} e^{-jkx} - \tilde{B}_{sol} e^{+jkx} \right) e^{j\omega t}, \quad (2.14)$$

onde $\rho_0 c_0$ é a impedância característica do meio, e S a área da seção transversal do tubo.

2.2.2 Matriz de transferência de dutos (sem perdas)

Para explicar a propagação sonora em tubos, o caso em que são desconsideradas as perdas é descrito primeiramente. Um tubo cilíndrico, como mostrado na Figura 2.2, pode ser considerado como um sistema de quatro parâmetros quando o som se propaga como ondas planas.

A propagação em um tubo cilíndrico, Figura 2.2, é definida pelo sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} p_2 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ U_1 \end{bmatrix}, \quad (2.15)$$

onde p_1 é a pressão sonora de entrada, p_2 a pressão sonora de saída, U_1 a velocidade de volume de entrada e U_2 a velocidade de volume de saída.

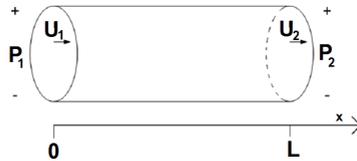


Figura 2.2: Tubo cilíndrico.

É possível determinar os quatro parâmetros da matriz de transferência que relaciona as variáveis de entrada e saída do sistema de equações a partir das seguintes expressões:

$$A = \left. \frac{p_2}{p_1} \right|_{U_1=0}, B = \left. \frac{p_2}{U_1} \right|_{p_1=0}, C = \left. \frac{U_2}{p_1} \right|_{U_1=0}, D = \left. \frac{U_2}{U_1} \right|_{p_1=0}. \quad (2.16)$$

Aplicando as Equações (2.12) e (2.14), para os pontos 0 e L do tubo da Figura 2.2, obtém-se:

$$p_1 = A_{sol} + B_{sol}, \quad (2.17)$$

$$U_1 = (A_{sol} - B_{sol}) \frac{S}{\rho_0 c_0}, \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned}
p_2 &= \tilde{A}_{sol} e^{-jkL} + \tilde{B}_{sol} e^{+jkL} \\
&= (\tilde{A}_{sol} + \tilde{B}_{sol}) \cos(kL) - j(\tilde{A}_{sol} - \tilde{B}_{sol}) \sin(kL) \\
&= p_1 \cos(kL) - j \frac{\rho_0 c_0}{S} U_1 \sin(kL)
\end{aligned} \tag{2.19}$$

e

$$\begin{aligned}
U_2 &= \left(\tilde{A}_{sol} e^{-jkL} - \tilde{B}_{sol} e^{+jkL} \right) \frac{S}{\rho_0 c_0} \\
&= \frac{(\tilde{A}_{sol} - \tilde{B}_{sol}) S}{\rho_0 c_0} \cos(kL) - j \frac{(\tilde{A}_{sol} + \tilde{B}_{sol}) S}{\rho_0 c_0} \sin(kL) \\
&= U_1 \cos(kL) - j \frac{S}{\rho_0 c_0} p_1 \sin(kL).
\end{aligned} \tag{2.20}$$

As Equações (2.19) e (2.20) podem ser escritas na forma matricial, como segue abaixo:

$$\begin{bmatrix} p_2 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(kL) & -j \frac{\rho_0 c_0}{S} \sin(kL) \\ -j \frac{S}{\rho_0 c_0} \sin(kL) & \cos(kL) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ U_1 \end{bmatrix}. \tag{2.21}$$

Com a matriz de transferência definida para um tubo qualquer, é possível encontrar a pressão e velocidade de volume de saída do tubo a partir da pressão e velocidade de volume de entrada.

2.2.3 Matriz de transferência de dutos (com perdas)

Na Subseção 2.2.2, foi apresentada a matriz de transferência de um duto considerando a propagação sonora sem perdas. Na presente subseção, será apresentada a matriz de transferência para a propagação sonora em um duto considerando os efeitos de absorção do som, que, anteriormente, foram menosprezados. Quando um tubo possui um diâmetro consideravelmente pequeno, as perdas na sua parede terão uma influência significativa na propagação sonora. Os mecanismos responsáveis pelas perdas sonoras são as transferências irreversíveis de momento e calor devido à viscosidade e condutividade térmica, respectivamente (TEMKIN, 1981).

Elementos acústicos, como os tubos, também podem ser representados como linhas de transmissão elétricas, sendo a pressão sonora análoga à tensão elétrica e a velocidade de volume análoga à corrente. A Figura 2.3 é a representação de uma linha de transmissão por meio

de um circuito, a qual consiste em uma impedância em série Z_{lt-s} ,

$$Z_{lt-s} = (R_{ra} + j\omega L_{ma}), \quad (2.22)$$

e uma impedância em paralelo Y_{lt-p} ,

$$Y_{lt-p} = (G_{ca} + j\omega C_c). \quad (2.23)$$

A componente R_{ra} (resistência) é a resistência acústica, que descreve as perdas devido à viscosidade, L_{ma} (indutância) é a massa acústica de ar, G_{ca} (condutância) é a condutância acústica, que representa as perdas térmicas e C_c (capacitância) é a compliância do ar no tubo, que representa a rigidez do fluido.

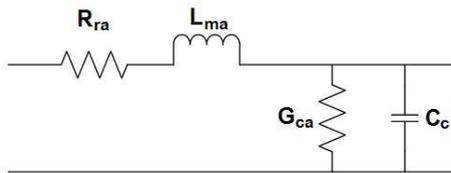


Figura 2.3: Modelo de linha de transmissão.

A linha de transmissão pode ser definida em termos da sua impedância característica Z_c ,

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_{lt-s}}{Y_{lt-p}}}, \quad (2.24)$$

e da sua constante de propagação Γ_n ,

$$\Gamma_n = \sqrt{Z_{lt-s} Y_{lt-p}}. \quad (2.25)$$

A matriz de transferência para uma linha de transmissão e, consequentemente, para um tubo com perdas é definida como

$$\begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\Gamma_n l_n) & Z_c \sinh(\Gamma_n l_n) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\Gamma_n l_n) & \cosh(\Gamma_n l_n) \end{bmatrix}, \quad (2.26)$$

onde

$$\Gamma_n = j \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{1 + 2(\gamma - 1) \frac{J_1(\alpha a_n)}{\alpha a_n J_0(\alpha a_n)}}{1 - \frac{2J_1(\beta a_n)}{\beta a_n J_0(\beta a_n)}}, \quad (2.27)$$

onde a_n é o raio de um tubo qualquer e l_n é o comprimento de um tubo qualquer. A impedância característica é dada por:

$$Z_c = \frac{\rho_0 c_0}{\pi a_n^2} \sqrt{\frac{1}{(1 - \frac{2J_1(\beta a_n)}{\beta a_n J_0(\beta a_n)})(1 + 2(\gamma - 1) \frac{J_1(\alpha a_n)}{\alpha a_n J_0(\alpha a_n)})}}, \quad (2.28)$$

onde

$$\alpha = \sqrt{\frac{-j\omega\rho\sigma}{\mu}}, \quad (2.29)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{-j\omega\rho}{\mu}}, \quad (2.30)$$

J_0 e J_1 são as funções cilíndricas de Bessel de ordem zero e de primeira ordem, σ é o número de Prandtl e μ é a viscosidade absoluta do meio. O uso das Equações (2.27) e (2.28) é baseado em vários critérios, conforme abaixo (EGOLF; LEONARD, 1977):

1. O amortecimento é um fenômeno dependente das paredes do tubo devido ao atrito do meio com a parede e às perdas térmicas existentes na parede;
2. A parede do tubo é considerada rígida;
3. A parede do tubo é considerada isotérmica (igual temperatura em qualquer ponto);
4. O tubo é longo o bastante para suprimir os efeitos radiais ($l_n \gg a_n$);
5. O fluido no tubo é considerado contínuo;
6. O fluido no tubo é excitado por perturbações de pequena amplitude;
7. O fluido no tubo é tal que $\frac{\mu}{\rho c_0 a_n} \ll 1$;
8. A frequência de excitação ω é tal que $\frac{\mu\omega}{\rho c_0^2} \ll 1$ e $\frac{\omega a_n}{c_0} \ll 1$;
9. A pressão sonora é uniforme ao longo da seção transversal do tubo (ondas planas).

2.2.4 Impedância de terminação

Formulações gerais

No desenvolvimento do modelo do aparelho auditivo, será necessário representar o comportamento de componentes por meio de parâmetros concentrados (impedância). Para estes componentes, será obtido o seu modelo equivalente em matrizes de transferência ou utilizada uma impedância equivalente. Quando esta impedância equivalente for usada para finalizar um circuito, esta é dita como de terminação. A formulação para aplicação destas impedâncias no modelo de matrizes de transferência pode ser encontrada no Anexo A. A seguir, são apresentados os componentes utilizados neste trabalho que tiveram o seu comportamento acústico representado por meio de uma impedância de terminação.

Microfone

Para representar o comportamento do microfone, foi utilizado um circuito elétrico equivalente que representa a impedância acústica do microfone.

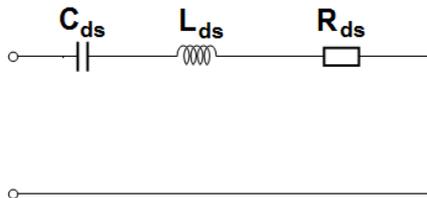


Figura 2.4: Modelo simplificado representando a impedância acústica do microfone (BRÜEL & KJÆR, 1996).

A impedância do microfone, Z_L , proveniente do modelo da Figura 2.4, pode ser calculada usando a seguinte equação:

$$Z_L = \frac{1}{j\omega C_{ds}} + j\omega L_{ds} + R_{ds} \quad \text{Ns/m}^5. \quad (2.31)$$

Tabela 2.2: Valores dos parâmetros concentrados do modelo do microfone (BRÜEL & KJÆR, 1996).

Símbolo	Elemento do modelo	Valor	Unidade
C_{ds}	Complância do diafragma	$2,83 \times 10^{-13}$	m^5/N
L_{ds}	Massa do diafragma	896	kg/m^4
R_{ds}	Resistência do diafragma	$56,2 \times 10^6$	Ns/m^5

Simulador de orelha

Para comparação dos resultados experimentais e numéricos, utilizou-se um circuito elétrico equivalente que representa o comportamento acústico do simulador de orelha, Anexo B. Este circuito elaborado por BRÜEL & KJÆR (2010) é baseado nos critérios estabelecidos pela norma IEC 60711:1981, e é utilizado como uma representação válida para o simulador de orelha. O simulador de orelha também é conhecido como acoplador IEC 711, e tem sido utilizado para verificações em aparelhos auditivos.

A partir deste circuito, determinou-se uma impedância equivalente que pudesse ser utilizada como impedância de terminação no modelo de matrizes de transferência.

Impedância de tubo aberto: Flangeado e Não-Flangeado

Um dos componentes de um aparelho auditivo é a ventilação, que pode ser representada por meio da aproximação de um tubo aberto flangeado. Esta aproximação é considerada válida, pois, se analisado dimensionalmente, a área da saída da ventilação é muito menor que a área do molde no entorno. A impedância de radiação de um tubo aberto flangeado (tubo com extremidade aberta em uma parede rígida) é idêntica à impedância de radiação de um pistão aplicado em um *affle*, rígido e plano. A impedância de radiação, de um pistão circular de raio a_p , aplicado em um *affle* é dada por (PIERCE, 1989):

$$Z_f = \frac{\rho_0 c_0}{A_p} \left(1 - \frac{J_1(2ka_p)}{ka_p} + j \frac{H_1(2ka_p)}{ka_p} \right), \quad (2.32)$$

onde J_1 é a função de Bessel de primeira ordem, e H_1 é a função de Struve de primeira ordem, sendo que a área do pistão é $A_p = \pi a_p^2$.

Outra condição que também pode ser utilizada na construção do modelo de matrizes de transferência é a de um tubo aberto não-flangeado. O tubo aberto não-flangeado tem o comportamento acústico idêntico ao de um pistão circular em uma terminação não-flangeada, que, segundo [Pierce \(1989\)](#), o pistão tem uma impedância de radiação, para $ka_p \ll 1$, dada pela seguinte equação:

$$Z_{nf} = \rho_0 c_0 \left[\frac{1}{4} ka_p^2 + j0,6133ka_p \right]. \quad (2.33)$$

Esta aproximação poderá ser utilizada para representar a resposta de um alto-falante radiando em campo livre, e para representar a saída da ventilação em regiões de baixa frequência.

Orelha humana

Os modelos elaborados neste trabalho, inicialmente, utilizaram a impedância acústica do microfone para representar o comportamento acústico do tímpano. Com o objetivo de conseguir uma representação mais adequada, será necessário elaborar um modelo que utilize a impedância acústica da orelha humana, ao invés de utilizar apenas a impedância acústica do diafragma do microfone.

Para conseguir representar o comportamento acústico da orelha humana, foi utilizada uma analogia elétrica que forneceu um circuito elétrico equivalente desta. A partir do circuito elétrico, obteve-se uma impedância acústica equivalente e utilizou-se esta como impedância de terminação no modelo de matrizes de transferência. Este circuito elétrico é apresentado no Anexo B.

Em 1962, [Zwislocki \(1962\)](#) propôs um circuito elétrico equivalente para representar a orelha média, dividido em cinco blocos. O primeiro bloco representa as cavidades da orelha média, o segundo as perdas no tímpano. Na realidade, o tímpano vibra em uma série de segmentos. A parte do tímpano que vibra em fase com a estrutura ossicular é representada no terceiro bloco. O quarto bloco lida com a perda de energia da junta incudo-estapédica devido à junção elástica entre estes dois ossículos. O quinto bloco é análogo à ação do estribo e à impedância da cóclea.

Na Figura B.2 (Anexo B), apresenta-se o circuito elétrico com os respectivos blocos supracitados. Existem, ainda, blocos para repre-

sentação de alguns efeitos não-lineares como o reflexo acústico, que é uma contração muscular devido aos altos níveis sonoros, e o ligamento anular, que, acima da máxima atividade do músculo estapédico (120 dB NPS), limita o deslocamento do estribo (PASCAL et al., 1998).

A consideração dos efeitos não-lineares implicaria em mudanças no modelo do alto-falante e na forma de propagação sonora em dutos. Devido a estas condições representarem a minoria dos casos encontrados em aplicação, julgou-se desnecessária a utilização de tais efeitos.

Foi utilizado no trabalho um segundo modelo para representação da orelha humana, também baseado no modelo de Zwislocki, mas proposto por WALLACE JR, R.L. (1975), conforme o circuito elétrico apresentado na Figura B.3 (Anexo B).

2.2.5 Método de Duas Cargas

O Método de Duas Cargas (MDC) é usado neste trabalho para determinar o comportamento dinâmico de um transdutor eletroacústico, definido por meio de uma matriz de transferência. Este método tem o objetivo de caracterizar uma fonte por meio de dois experimentos aos quais a fonte é submetida a duas cargas distintas. Para o caso de uma fonte elétrica, fcarga é o termo utilizado para referenciar a impedância elétrica na qual a fonte estará acoplada. Para o caso do alto-falante para aparelhos auditivos, que é uma fonte sonora, o termo carga referenciará o sistema acústico (impedância acústica) ao qual o alto-falante estará acoplado.

Antes de demonstrar o método aplicado para o alto-falante, será apresentado o método aplicado para um simples circuito elétrico. O circuito elétrico é apresentado na Figura 2.5.

Para o circuito apresentado na Figura 2.5, deseja-se determinar a impedância interna em série, Z_S , do circuito demonstrado na Figura 2.5, considerando-se que a tensão, E_C , é desconhecida. Com intuito de usar o MDC, o circuito é carregado com duas impedâncias (cargas) conhecidas, uma por vez, e são obtidas as tensões (magnitude e fase) aplicadas em cada impedância e para cada frequência de interesse. Essas tensões são utilizadas na equação para determinar Z_S .

Aplicando a equação do divisor de tensão aos circuitos (b) e (c) da Figura 2.5, obtém-se as seguintes equações:

$$V = E_C \left[\frac{Z_1}{Z_S + Z_1} \right] \quad (2.34)$$

e

$$V' = E_C \left[\frac{Z_2}{Z_S + Z_2} \right]. \quad (2.35)$$

Após isolar E_C na Equação (2.34) e substituir na Equação (2.35), obtemos Z_S :

$$Z_S = \frac{V' - V}{\frac{V}{Z_1} - \frac{V'}{Z_2}}. \quad (2.36)$$

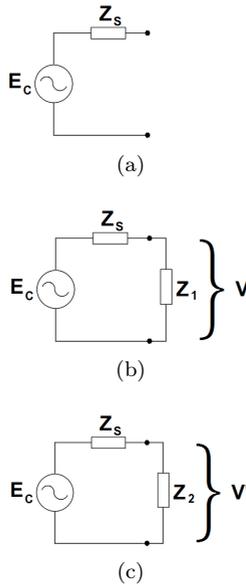


Figura 2.5: (a) Fonte de tensão com impedância interna em série, (b) Aplicação da impedância Z_1 à fonte de tensão e (c) Aplicação da carga Z_2 à fonte de tensão.

Desta forma, obtém-se uma equação para Z_S em termos das impedâncias Z_1 e Z_2 , e das tensões medidas nestas impedâncias. Para a definição de quais impedâncias (cargas) devem ser utilizadas existem três restrições, as quais resultarão em erros significantes no cálculo de Z_S . A primeira restrição é definida para o caso em que as impedâncias Z_1 e Z_2 são escolhidas de tal forma que $Z_1 \cong Z_2$ para uma frequência qualquer analisada. Nesta frequência:

$$V = V' \pm \epsilon \quad (2.37)$$

e

$$\frac{V}{Z_1} = \frac{V'}{Z_2} \pm \xi \quad (2.38)$$

o que resulta em

$$Z_S = \frac{\pm \epsilon}{\pm \xi}. \quad (2.39)$$

É possível que o pequeno valor de tensão elétrica ϵ e/ou ξ seja da mesma ordem de grandeza que a incerteza do instrumento utilizado para obter as tensões V e V' . Para esta condição, o valor calculado para a impedância Z_S será inconsistente com a impedância real.

Para o caso em que as impedâncias Z_1 e Z_2 são definidas como $Z_1 \ll Z_S$ e $Z_2 \ll Z_S$ nas frequências analisadas, então, nestas frequências:

$$\frac{V}{Z_1} = \frac{E_C}{Z_S} \pm \eta \quad (2.40)$$

e

$$\frac{V'}{Z_2} = \frac{E_C}{Z_S} \pm \psi \quad (2.41)$$

que, substituindo na Equação (2.36), obtém-se

$$Z_S = \frac{(V' - V)}{(\pm \eta \pm \psi)}. \quad (2.42)$$

É possível que o pequeno valor de tensão elétrica η e/ou ψ também seja da mesma ordem de grandeza que a incerteza do instrumento utilizado para obter as tensões V e V' . Para esta condição, o valor calculado para a impedância Z_S também será inconsistente com a impedância real.

Para o último caso, quando as impedâncias Z_1 e Z_2 são definidas como $Z_1 \gg Z_S$ e $Z_2 \gg Z_S$, nas frequências analisadas, então, nestas:

$$V = E_C \pm \nu \quad (2.43)$$

e

$$V' = E_C \pm \zeta \quad (2.44)$$

que, substituindo na Equação (2.36), obtém-se

$$Z_S = \frac{(\pm \zeta \pm \nu)}{\left(\frac{V}{Z_1} - \frac{V'}{Z_2}\right)}. \quad (2.45)$$

É possível que o pequeno valor de tensão elétrica ζ e/ou ν também seja da mesma ordem de grandeza que a incerteza do instrumento utilizado para obter as tensões V e V' . Para esta condição, o valor calculado para a impedância Z_S também será inconsistente com a impedância real.

A análise apresentada ilustra os efeitos de violar uma das três restrições pertinentes à escolha das impedâncias (cargas) no método. Estes efeitos são demonstrados facilmente para um circuito elétrico simplificado, mas podem não ser intuitivamente óbvios para os casos de sistemas mais complexos.

Para aplicar o MDC aos alto-falantes para aparelhos auditivos, será necessário utilizar matrizes de transferência com quatro parâmetros, ao invés de utilizar as impedâncias de parâmetros concentrados. Isto se deve ao fato de que a maioria dos sistemas acústicos se comportam como sistemas multivariáveis com duas entradas e duas saídas. Então, uma representação adequada são as matrizes de transferência utilizando quatro parâmetros.

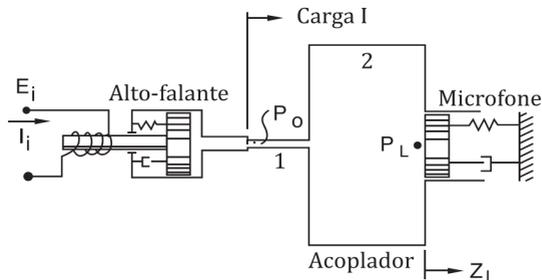
Como foi visto anteriormente, para modelar os tubos de conexão e o acoplador será utilizada a teoria de propagação sonora em dutos considerando as perdas visco-térmicas. Para a modelagem do microfone, utilizar-se-á a impedância acústica fornecida pela Brüel & Kjær (BRÜEL & KJÆR, 1996). Com estas informações, será possível, então, desenvolver 4 equações para determinar a matriz de transferência para o alto-falante.

Nas Figuras 2.6 e 2.7 são apresentados os diagramas experimentais para o MDC aplicado ao alto-falante, e os modelos de matrizes de transferência respectivos aos dois experimentos. A matriz de transferência com o índice (R) representa o alto-falante, remetendo ao fato de que o alto-falante para aparelhos auditivos comumente é citado como “*receiver*”, as matrizes restantes representam o sistema acústico de transmissão sonora até o microfone conectado ao acoplador. Este sistema acústico pode ser representado por um conjunto de tubos, os quais, conhecendo os seus diâmetros e comprimentos, têm as suas matrizes de transferência definidas pela Equação (2.26). A impedância de terminação Z_L representa a impedância acústica do microfone.

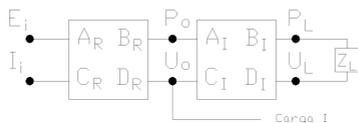
A partir do modelo de matrizes de transferência desenvolvido, é possível, então, obter as seguintes equações para o sistema da Figura 2.6:

$$E_i = A_R P_o + B_R U_o, \quad (2.46)$$

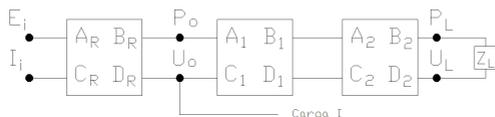
$$I_i = C_R P_o + D_R U_o, \quad (2.47)$$



(a)



(b)



(c)

Figura 2.6: Carga I: (a) Diagrama esquemático experimental, (b) Representação em matrizes de transferência, e (c) Representação em matrizes de transferência expandida.

$$P_o = A_I P_L + B_I U_L, \quad (2.48)$$

$$U_o = C_I P_L + D_I U_L, \quad (2.49)$$

$$P_L = U_L Z_L. \quad (2.50)$$

Substituindo a Equação (2.50) nas Equações (2.48) e (2.49), obtém-se:

$$P_o = \left(A_I + \frac{B_I}{Z_L} \right) P_L \quad (2.51)$$

e

$$U_o = \left(C_I + \frac{D_I}{Z_L} \right) P_L. \quad (2.52)$$

E substituindo as Equações (2.51) e (2.52) nas Equações (2.46)

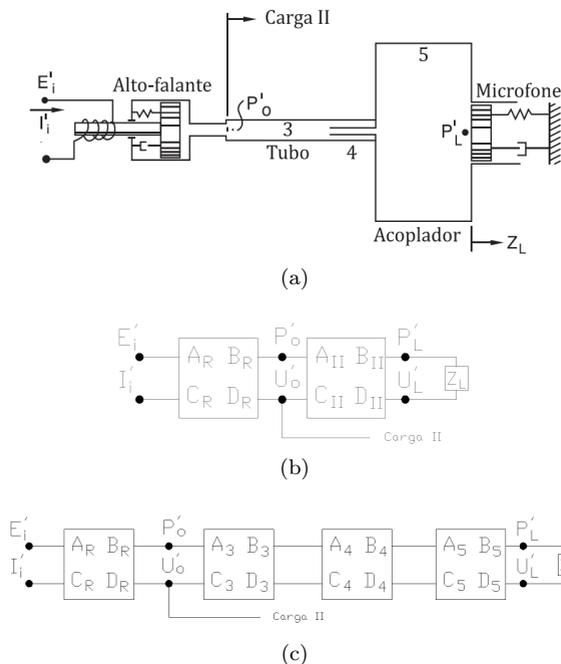


Figura 2.7: Carga II: (a) Diagrama esquemático experimental, (b) Representação em matrizes de transferência, e (c) Representação em matrizes de transferência expandida.

e (2.47), obtém-se:

$$E_i = \left[A_R \left(A_I + \frac{B_I}{Z_L} \right) + B_R \left(C_I + \frac{D_I}{Z_L} \right) \right] P_L \quad (2.53)$$

e

$$I_i = \left[C_R \left(A_I + \frac{B_I}{Z_L} \right) + D_R \left(C_I + \frac{D_I}{Z_L} \right) \right] P_L. \quad (2.54)$$

As equações para o sistema da Figura 2.7 são as seguintes:

$$E'_i = A_R P'_o + B_R U'_o, \quad (2.55)$$

$$I'_i = C_R P'_o + D_R U'_o, \quad (2.56)$$

$$P'_o = A_{II} P'_L + B_{II} U'_L, \quad (2.57)$$

$$U'_o = C_{II}P'_L + D_{II}U'_L, \quad (2.58)$$

$$P'_L = U'_L Z_L, \quad (2.59)$$

onde o índice (') indica uma mudança nos valores das variáveis originais devido à aplicação de uma nova impedância acústica ao alto-falante.

Utilizando o mesmo procedimento aplicado anteriormente à primeira impedância acústica, é possível obter as equações de E'_i e I'_i , que são:

$$E'_i = \left[A_R \left(A_{II} + \frac{B_{II}}{Z_L} \right) + B_R \left(C_{II} + \frac{D_{II}}{Z_L} \right) \right] P'_L \quad (2.60)$$

e

$$I'_i = \left[C_R \left(A_{II} + \frac{B_{II}}{Z_L} \right) + D_R \left(C_{II} + \frac{D_{II}}{Z_L} \right) \right] P'_L. \quad (2.61)$$

Sabendo-se que as variáveis E_i , P_L , E'_i e P'_L podem ser medidas experimentalmente, então, as Equações (2.53) e (2.60) representam duas equações com duas variáveis desconhecidas: A_R e B_R . Consequentemente, pode-se utilizar estas duas equações para obter A_R e B_R . Da mesma forma, pode-se obter C_R e D_R a partir das Equações (2.54) e (2.61). Resolvendo os sistemas, obtêm-se as seguintes soluções para os quatro parâmetros da matriz de transferência do alto-falante:

$$A_R = \frac{Z_L \left(\frac{C_{II}Z_L + D_{II}}{P_L/E_i} - \frac{C_I Z_L + D_I}{P'_L/E'_i} \right)}{(A_I Z_L + B_I)(C_{II} Z_L + D_{II}) - (A_{II} Z_L + B_{II})(C_I Z_L + D_I)}, \quad (2.62)$$

$$B_R = \frac{Z_L \left(\frac{A_I Z_L + B_I}{P'_L/E'_i} - \frac{A_{II} Z_L + B_{II}}{P_L/E_i} \right)}{(A_I Z_L + B_I)(C_{II} Z_L + D_{II}) - (A_{II} Z_L + B_{II})(C_I Z_L + D_I)}, \quad (2.63)$$

$$C_R = \frac{Z_L \left(\frac{C_{II}Z_L + D_{II}}{P_L/I_i} - \frac{C_I Z_L + D_I}{P'_L/I'_i} \right)}{(A_I Z_L + B_I)(C_{II} Z_L + D_{II}) - (A_{II} Z_L + B_{II})(C_I Z_L + D_I)}, \quad (2.64)$$

e

$$D_R = \frac{Z_L \left(\frac{A_I Z_L + B_I}{P'_L/I'_i} - \frac{A_{II} Z_L + B_{II}}{P_L/I_i} \right)}{(A_I Z_L + B_I)(C_{II} Z_L + D_{II}) - (A_{II} Z_L + B_{II})(C_I Z_L + D_I)}. \quad (2.65)$$

Conforme exemplificado, anteriormente, para um circuito elétrico, existem algumas condições nas quais o MDC fornecerá resultado ruins.

Resultados errôneos serão obtidos quando, em alguma frequência, forem encontradas as seguintes condições:

$$\begin{bmatrix} A_I & B_I \\ C_I & D_I \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} A_{II} & B_{II} \\ C_{II} & D_{II} \end{bmatrix}, \quad (2.66)$$

$$\frac{A_I Z_L + B_I}{C_I Z_L + D_I} \cong \frac{A_{II} Z_L + B_{II}}{C_{II} Z_L + D_{II}}, \quad (2.67)$$

ambas

$$\frac{A_I Z_L + B_I}{C_I Z_L + D_I} \ll \frac{B_R}{A_R} \text{ e } \frac{A_{II} Z_L + B_{II}}{C_{II} Z_L + D_{II}} \ll \frac{B_R}{A_R}, \quad (2.68)$$

ambas

$$\frac{A_I Z_L + B_I}{C_I Z_L + D_I} \gg \frac{B_R}{A_R} \text{ e } \frac{A_{II} Z_L + B_{II}}{C_{II} Z_L + D_{II}} \gg \frac{B_R}{A_R}, \quad (2.69)$$

ambas

$$\frac{A_I Z_L + B_I}{C_I Z_L + D_I} \ll \frac{D_R}{C_R} \text{ e } \frac{A_{II} Z_L + B_{II}}{C_{II} Z_L + D_{II}} \ll \frac{D_R}{C_R}, \quad (2.70)$$

ambas

$$\frac{A_I Z_L + B_I}{C_I Z_L + D_I} \gg \frac{D_R}{C_R} \text{ e } \frac{A_{II} Z_L + B_{II}}{C_{II} Z_L + D_{II}} \gg \frac{D_R}{C_R}. \quad (2.71)$$

Resultados precisos de A_R , B_R , C_R e D_R serão obtidos nas frequências em que as condições supracitadas não existirem. Outra restrição, para utilização do MDC, é que o alto-falante precisa operar em uma região linear. Esta análise da linearidade do alto-falante será apresentada na Subseção 3.3.1.

Restrição de ondas planas

As cargas para caracterização utilizadas no MDC são compostas de um tubo e uma cavidade acústica. O objetivo do seguinte estudo é apresentar alguns aspectos construtivos importantes na definição desta cavidade acústica, pois, se não considerados estes aspectos, a matriz de transferência do alto-falante poderá fornecer valores errôneos.

O modelo utilizado para os tubos no sistema acústico acoplado ao alto-falante foi baseado na condição de ondas planas. Nesta condição, o perfil de pressão sonora, p , e velocidade de partícula, u , apresenta um comportamento plano ao longo da seção transversal do tubo, Figura 2.8. Portanto, para que o resultado experimental seja condizente com o resultado numérico, é necessário que o experimento se enquadre dentro

desta condição.

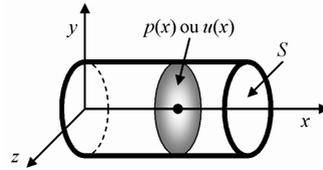


Figura 2.8: Perfil de onda plano para um duto.

Para uma faixa de frequência até 6,4 kHz, qualquer tubo com diâmetro menor que 31,4 mm é considerado aceitável para a condição de ondas planas. Considerando que a aplicação do MMT é proposta para o ramo de aparelhos auditivos, dificilmente esta restrição será violada, pois o maior diâmetro envolvido seria o do canal auditivo, e este possui um valor em torno de 9 mm. O limite de 6,4 kHz foi escolhido baseado na região de frequência fornecida nas informações técnicas dos alto-falantes comerciais. O diâmetro máximo do tubo para a faixa de frequência analisada foi determinado com base na Equação (2.8).

Na região de transição entre o tubo de conexão e a cavidade de 2 cm³, é possível constatar um perfil de onda não-plano (EGOLF, 1977), Figura 2.9b e Figura 2.9c. Este perfil é originado devido à característica não-planar das ondas sonoras nas regiões de descontinuidade (difração) e ao atrito do fluido com as paredes do acoplador. Por isto, além da restrição de diâmetro do tubo para garantir a condição de onda plana, também é necessária uma distância adequada entre a descontinuidade e o microfone. Esta distância possibilitará que as ondas sonoras procedentes do tubo de conexão possam restituir a configuração de onda plana.

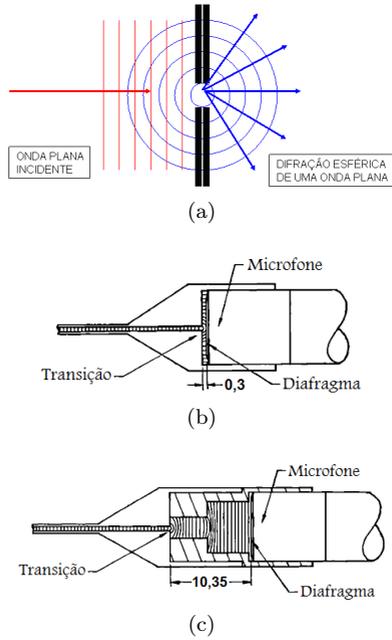


Figura 2.9: Restrição de onda plana (unidades em mm): (a) Difração, (b) Microfone a uma distância inadequada da transição (EGOLF, 1977), (c) Microfone a uma distância adequada da transição (EGOLF, 1977).

CAPÍTULO 3

ANÁLISES EXPERIMENTAIS DO MMT

3.1 Procedimento experimental e equipamentos (MMT)

Os objetivos desta seção são apresentar as etapas necessárias para se obter o comportamento do alto-falante por meio da simulação via MMT, apresentar alguns resultados preliminares do MMT, e verificar as condições nas quais os resultados obtidos via MMT serão confiáveis.

Para a simulação do comportamento do alto-falante, é necessário, primeiramente, caracterizar o alto-falante, ou seja, obter sua matriz de transferência. Para obter esta matriz de transferência, é necessário utilizar o MDC. Este método exige a utilização de duas cargas distintas para a caracterização de uma fonte qualquer. As duas cargas, no caso do alto-falante para aparelho auditivo, foram dois sistemas acústicos acoplados ao alto-falante. Estes sistemas acústicos são compostos de um tubo flexível e uma cavidade. Uma vez definidos os sistemas acústicos, realizam-se os experimentos para a coleta de dados necessários ao MDC. Após coletados os dados experimentais, utilizam-se estes dados em um algoritmo desenvolvido em Matlab e calculam-se os parâmetros da matriz de transferência do alto-falante, de acordo com o procedimento visto na Subseção 2.2.5, e, conseqüentemente, possibilita-se a simulação de outros casos para verificação do comportamento do alto-falante.

Para realizar os dois experimentos do MDC, foram utilizados os

seguintes equipamentos:

- Analisador de sinais (Hardware): Brüel & Kjær PULSE Portable PULSE - 3560C;
- Analisador de sinais (Software): Brüel & Kjær PULSE LabShop Version 10.1;
- Microfones: G.R.A.S - Sound & Vibration 1/2" Prepolarized Pressure Microphone 40AQ;
- Pré-amplificadores: G.R.A.S - Sound & Vibration 1/2" ICP Pre-amplifier 26CA;
- Matriz de contato (Protoboard) e componentes eletrônicos;
- Acoplador de 2 cm³, fabricado pelo IVA - UFSC;
- Tubos flexíveis de 1,3 mm de diâmetro interno e comprimentos diversos;
- Alto-falantes: Knowles Electronics, BK-21610 e Sonion, 1958e.

A fim de se calcular os quatro parâmetros da matriz de transferência do alto-falante, é necessário obter as correntes que circulam neste. Para tal procedimento, será utilizado um resistor de 10 ohms em série com o alto-falante. Utilizando este resistor, será possível obter, de forma indireta, a corrente no alto-falante. Utilizando a Equação (4.1), as tensões no resistor V_i (sistema acústico I) e V'_i (sistema acústico II) são dadas por:

$$V_i = 10I_i \quad (3.1)$$

e

$$V'_i = 10I'_i, \quad (3.2)$$

onde I_i e I'_i são as correntes no alto-falante para o sistema acústico I e sistema acústico II, respectivamente. Essa relação só pode ser considerada como verdadeira se a impedância do alto-falante for significativamente maior que a impedância do resistor em toda a região de frequência analisada.

O esquema para os experimentos do MDC utilizou um analisador de sinais Brüel & Kjær PULSE para aquisição dos dados experimentais, o próprio gerador de sinais do PULSE para excitação do alto-falante, um acoplador de 2 cm³, um tubo flexível, um pré-amplificador e um microfone de 1/2 polegada que foi conectado ao acoplador de 2 cm³. Utilizando-se este esquema para dois sistemas acústicos diferentes, foi

possível determinar os quatro parâmetros da matriz de transferência do alto-falante. Como exemplo, dois diagramas esquemáticos são apresentados para obtenção dos quatro parâmetros da matriz de transferência do alto-falante, Figuras 3.1 e 3.2. Exemplo das montagens utilizadas nos ensaios experimentais são apresentadas na Figura 3.3.

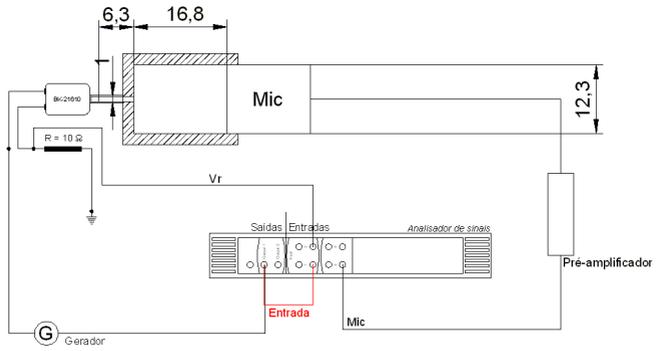


Figura 3.1: Diagrama esquemático experimental para obtenção dos quatro parâmetros do alto-falante (sistema acústico I), dimensões em milímetros.

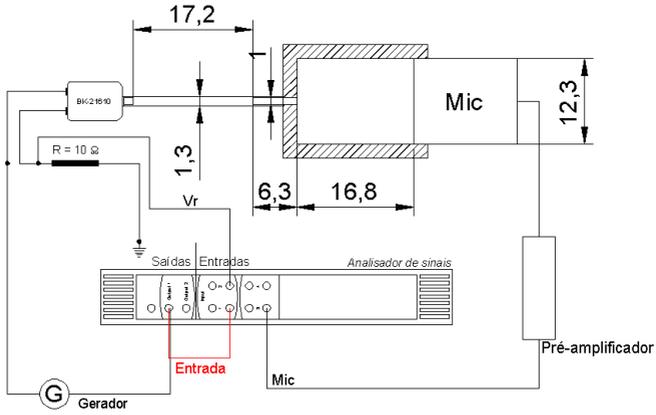


Figura 3.2: Diagrama esquemático experimental para obtenção dos quatro parâmetros do alto-falante (sistema acústico II), dimensões em milímetros.

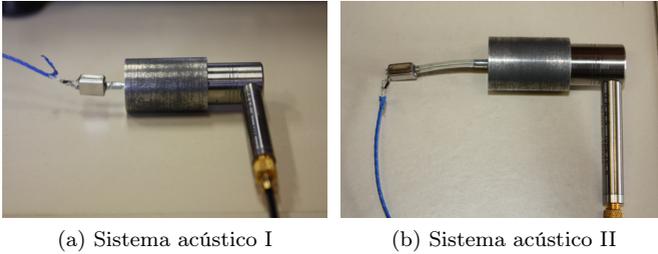


Figura 3.3: Dois sistemas acústicos acoplados ao alto-falante.

O procedimento do MDC exige a utilização de duas cargas distintas, conforme descrito na Subseção 2.2.5. Neste trabalho, as cargas utilizadas são definidas como um tubo conectado ao alto-falante e este tubo conectado a uma cavidade de 2 cm^3 . Como a cavidade nas duas cargas possui as mesmas dimensões (raio e comprimento), a única distinção entre essas cargas ocorre no comprimento do tubo de conexão entre o alto-falante e a cavidade.

Portanto, para identificar as duas cargas utilizadas na elaboração do modelo do alto-falante, via MDC, é utilizada uma nomenclatura que indica o comprimento do tubo para conexão à cavidade. Para o exemplo das Figuras 3.1 e 3.2, a nomenclatura que utilizar-se-ia é: “*configuração/sistema 6,3 - 23,5 mm*”.

Depois de obtidos os dados experimentais, foi utilizado um algoritmo elaborado em Matlab, conforme Anexo C, para processar os dados, calcular os quatro parâmetros da matriz de transferência do alto-falante e simular outros casos de interesse.

Com intuito de verificar o modelo MMT, obteve-se uma resposta experimental para a mesma condição simulada no modelo MMT e realizou-se a comparação dos dois resultados, conforme será discutido na Seção 3.2. Para os experimentos realizados, o sinal de entrada utilizado foi do tipo ruído branco (0-6,4 kHz), tensão elétrica, e o sinal de saída obtido foi a pressão sonora no microfone (0-6,4 kHz).

Para verificar a confiabilidade da resposta experimental, obteve-se a coerência entre a pressão sonora medida no microfone e a tensão aplicada no alto-falante. A coerência é uma função que indica o quanto o sinal de saída está linearmente relacionado com o sinal de entrada. A coerência atinge o valor unitário quando o sinal de saída está linearmente relacionado com o sinal de entrada, e valor nulo, quando o sinal de saída não está linearmente relacionado com o sinal de entrada (SHIN; HAMMOND, 2008).

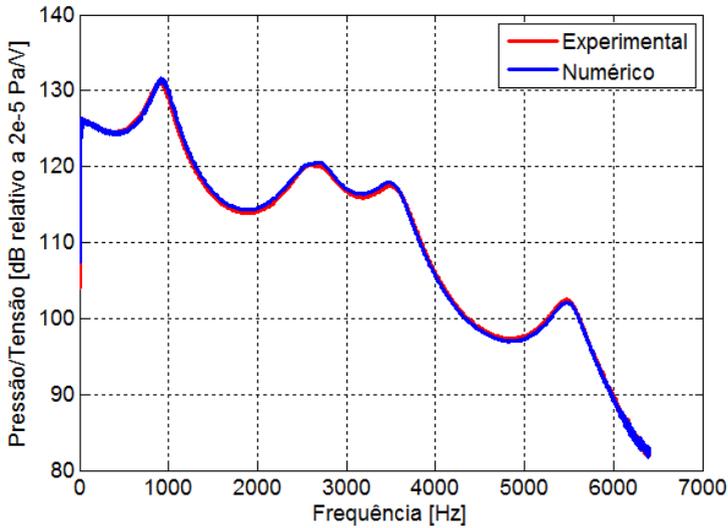
3.2 Resultados preliminares

Nesta seção, será apresentado um caso de verificação do modelo numérico obtido via MMT. Para este modelo, foi utilizado o MDC para caracterização do alto-falante, a teoria de propagação em dutos (com perdas) para a representação do sistema acústico acoplado ao alto-falante, Subseção 2.2.3, e a impedância do microfone fornecida pela BRÜEL & KJÆR (1996). Este sistema acústico definido para ensaio foi utilizado para dois modelos de alto-falantes e os resultados experimentais foram utilizados como referência para a verificação do modelo numérico (MMT).

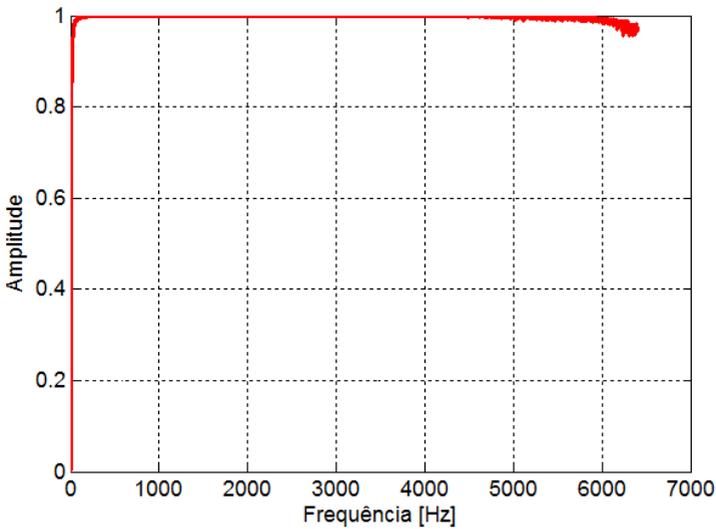
Os gráficos nas Figuras 3.4a e 3.5a apresentam as FRF's Pressão/Tensão obtidas experimentalmente e via simulação numérica, para o sistema acústico conforme a Figura 3.7, em que L_{tubo} é igual a 45,23 mm, e para os modelos, respectivamente, 1958e - Sonion e BK-21610 - Knowles. As Figuras 3.4b e 3.5b apresentam as coerências para as medições experimentais das FRF's Pressão/Tensão.

Observando os gráficos das coerências, Figuras 3.4b e 3.5b, é possível verificar que a amplitude é unitária em praticamente todo o espectro de frequência analisado. Desta forma, os valores de coerência indicam que a resposta experimental é confiável e pode ser utilizada como referência para comparação com os resultados numéricos.

Para a simulação via MMT, a matriz de transferência do alto-falante foi obtida via MDC utilizando a configuração 6,3 - 23,5 mm. Verificando os resultados experimentais e numéricos, Figura 3.4a e 3.5a, constatou-se uma boa concordância entre estes. Logo, espera-se que outros casos simulados fornecerão resultados em concordância com a situação experimental.

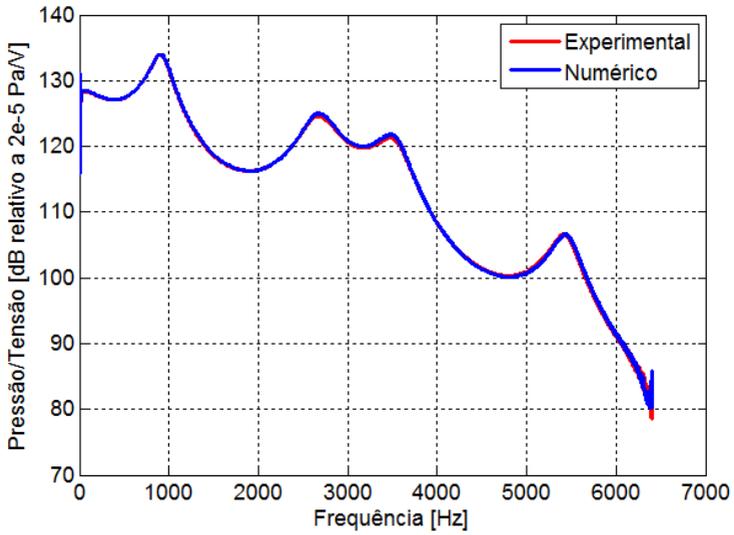


(a)

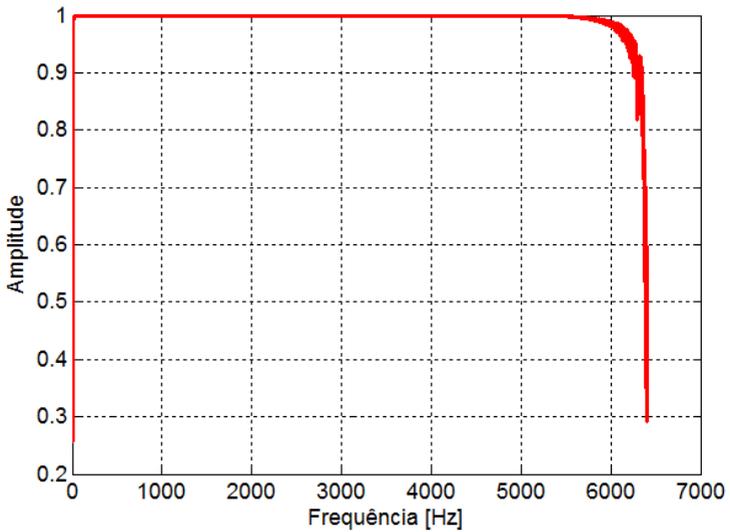


(b)

Figura 3.4: Método de Duas Cargas aplicado ao Modelo 1958e [Sonion]: (a) FRF Pressão/Tensão experimental e numérica e (b) Coerência Pressão/Tensão do resultado experimental.



(a)



(b)

Figura 3.5: Método de Duas Cargas aplicado ao Modelo BK-21610 [Knowles]: (a) FRF Pressão/Tensão experimental e numérica e (b) Coerência Pressão/Tensão do resultado experimental.

3.3 Verificação de condições (MMT & MDC)

Com o intuito de garantir a confiabilidade do modelo do alto-falante, obtido via MMT e MDC, foi realizada uma análise das condições que devem ser obedecidas e das que devem ser evitadas na elaboração deste modelo. Estas condições e as suas respectivas análises serão apresentadas nas subseções seguintes.

3.3.1 Análise de linearidade

Conforme citado na Subseção 2.2.5, a utilização do método proposto restringe-se a sistemas que possuam comportamento linear. Ou seja, observando-se a relação saída-entrada do sistema, esta deve apresentar uma proporção que se mantém constante independente da amplitude do sinal de entrada. Considerando esta restrição, realizaram-se medições experimentais da FRF Pressão/Tensão para diferentes níveis de tensão de entrada. O sistema sob teste era composto de um alto-falante, um tubo flexível para conexão, um acoplador de 2 cm³ e um microfone. Por meio destes experimentos foi possível analisar o alto-falante e determinar se este se comportava de forma linear.

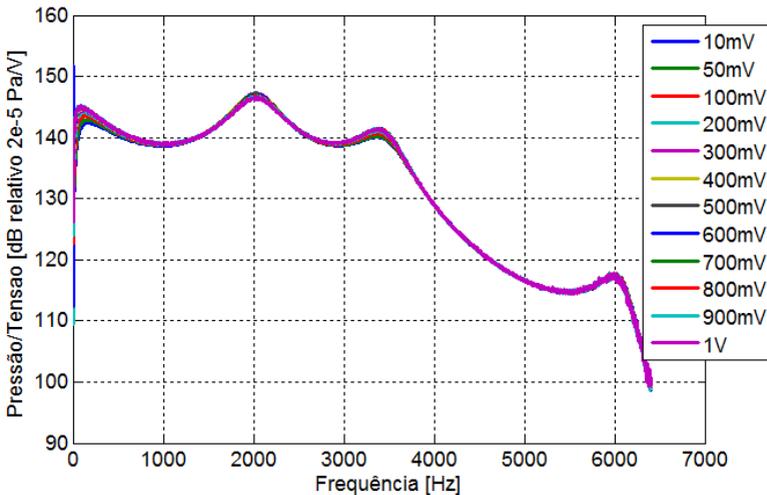


Figura 3.6: FRF Pressão/Tensão - Alto-falante 1958 [Sonion].

Observando-se os gráficos de FRF, Figura 3.6, pode-se constatar

que a relação pressão-tensão mantém-se, praticamente, constante. Ou seja, o aumento da tensão representa um aumento de mesma proporção na pressão sonora. Estes resultados indicam que, para os níveis de tensão aplicada entre 10 mV e 1 V e dentro da região de frequência analisada (0-6,4 kHz), o alto-falante apresenta um comportamento que pode-se considerar linear para o fim desejado, ou seja, a obtenção das FRF's Pressão/Tensão. Desta forma, o MMT pode ser aplicado de forma a se obter resultados confiáveis.

3.3.2 Análise da influência do resistor

O resistor é utilizado neste método como um meio indireto para obter a corrente consumida pelo alto-falante. No entanto, na condição real de funcionamento deste, o resistor não estará presente. Considerando este fato, será necessário verificar o quanto o comportamento do alto-falante será alterado devido à presença do resistor, e se tal alteração é aceitável. Posteriormente, será obtida a curva de impedância do alto-falante, e esta apresentará valores da ordem de 100 ohms, o que representa uma impedância considerável em relação à impedância do resistor proposto por [Egolf e Leonard \(1977\)](#). No entanto, a fim de se confirmar a não interferência do resistor no comportamento do alto-falante, realizou-se a presente análise. Esta, foi baseada em medições experimentais da pressão sonora obtida em um microfone acoplado a uma cavidade de 2 cm³. O sistema acústico utilizado nesta análise é apresentado na Figura 3.7, em que L_{tubo} é igual a 50,2 mm.

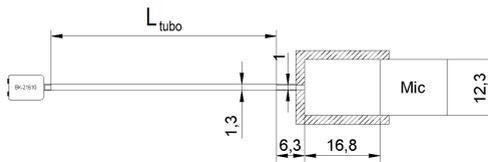


Figura 3.7: Sistema acústico utilizado na análise da influência do resistor.

Observando-se a Figura 3.8, é possível constatar que a resposta de pressão sonora não é alterada significativamente para nenhum dos dois resistores utilizados no circuito. Desta forma, o modelo obtido refletirá o comportamento típico de um alto-falante, mesmo quando

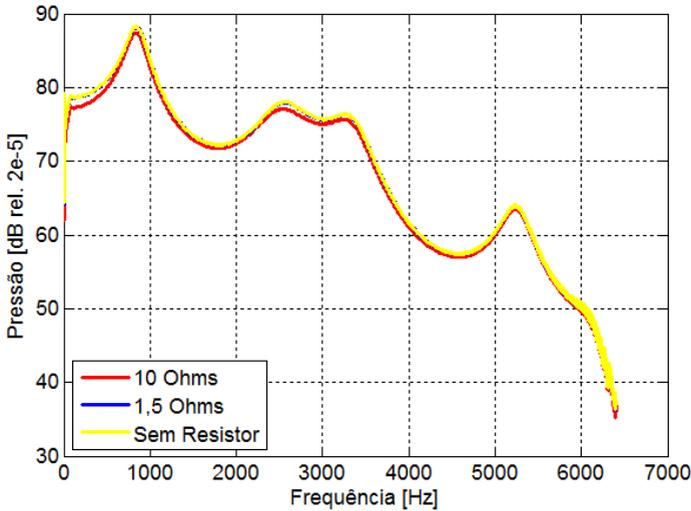


Figura 3.8: Efeito do resistor na resposta de pressão do alto-falante para o modelo BK-21610.

utilizado o resistor de 10 ou 1,5 ohms nas medições.

3.3.3 Análise das condições de erro do MDC

O MDC é um método para caracterização de fontes, esta caracterização é baseada em dois experimentos com duas cargas distintas. A definição destas duas cargas deve ser realizada de forma a evitar algumas condições para que se obtenha bons resultados. Estas condições foram apresentadas na Subseção 2.2.5, e quando elas ocorrerem os resultados fornecidos pelo modelo numérico, via MDC, não estarão em concordância com o comportamento do sistema físico real. É importante perceber que estas condições estão, diretamente, relacionadas com as duas cargas utilizadas no MDC. No caso dos alto-falantes para aparelhos auditivos, estas cargas são os sistemas acústicos acoplados ao alto-falante. Os objetivos desta subseção são:

1. Elaborar 3 modelos numéricos de um mesmo alto-falante, via MDC, sendo que cada modelo será elaborado baseado em 3 duplas de cargas distintas;

2. Obter uma FRF Pressão/Tensão para cada modelo numérico, sendo que as 3 FRF's serão para um mesmo sistema acústico;
3. Obter a resposta experimental para o sistema acústico simulado e verificar as divergências entre a FRF experimental e as FRF's numéricas;
4. Analisar as condições da Subsecção 2.2.5 e verificar a relação destas com as divergências entre a FRF experimental e as FRF's numéricas;
5. Apresentar algumas conclusões segundo os resultados obtidos.

O sistema acústico utilizado como base para a verificação experimental-numérica é apresentado na Figura 3.7, sendo que $L_{\text{Tubo}} = 93,30$ mm. As FRF's experimental e numéricas para este sistema acústico são apresentadas na Figura 3.9. Os erros das FRF's numéricas referente à FRF experimental são apresentados na Figura 3.10.

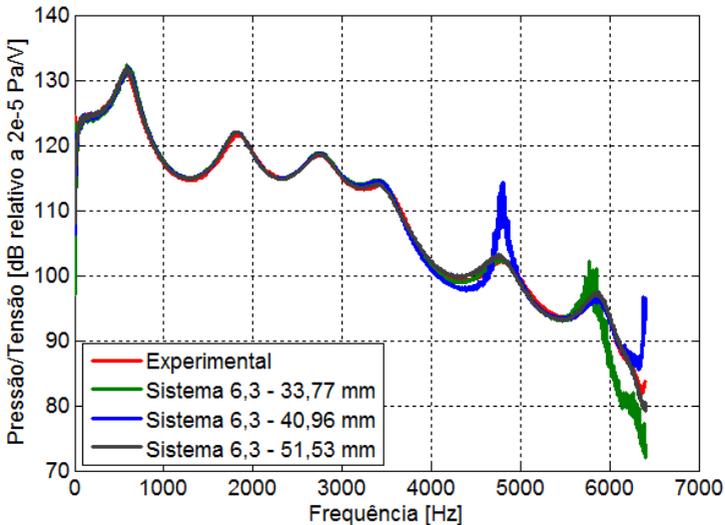


Figura 3.9: FRF Pressão/Tensão considerando diversas cargas para caracterização do alto-falante.

A seguir serão apresentadas as condições de erro do MDC, Subsecção 2.2.5, e suas respectivas análises. A primeira condição analisada é referente à Equação (2.66). Cada modelo do alto-falante (MDC) é

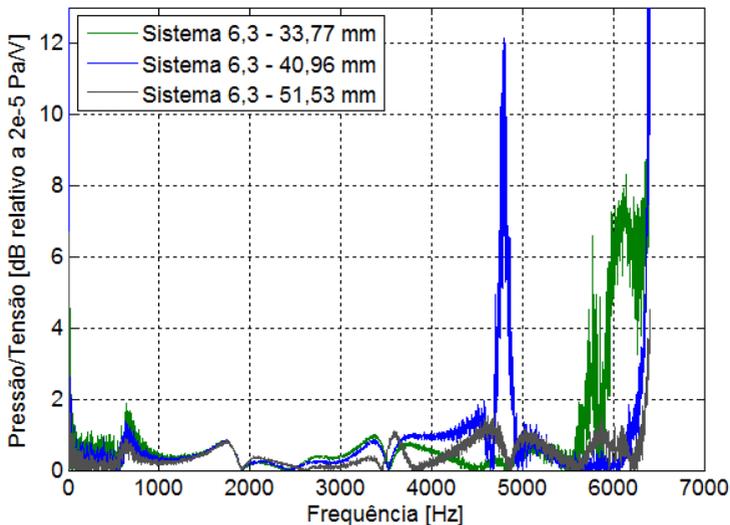


Figura 3.10: Erros dos modelos referentes à FRF Pressão/Tensão obtida experimentalmente.

elaborado com base em uma dupla de sistemas acústicos, estes sistemas acústicos podem ser representados através de matrizes de transferência e estas matrizes de transferência possuem quatro parâmetros.

Tendo a Equação (2.66) como condição de erro para o modelo obtido via MDC, são apresentados nas Figuras 3.11 e 3.12, respectivamente, o módulo e a fase de cada parâmetro da matriz de transferência de cada sistema acústico utilizado para elaboração do modelo do alto-falante. A condição da Equação (2.66) será satisfeita quando os valores dos parâmetros forem semelhantes e, desta forma, o modelo numérico obtido para as cargas com parâmetros semelhantes fornecerá uma, provável, resposta divergente da resposta experimental. Esta situação pode ser verificada observando-se a FRF, para o sistema 6,3 - 40,96 mm, na região de frequência próximo a 5000 Hz, pois neste ponto a FRF numérica diverge da experimental, e neste mesmo ponto os parâmetros do sistema acústico 6,3 mm é semelhante ao sistema acústico 40,96 mm, Figuras 3.11 e 3.12.

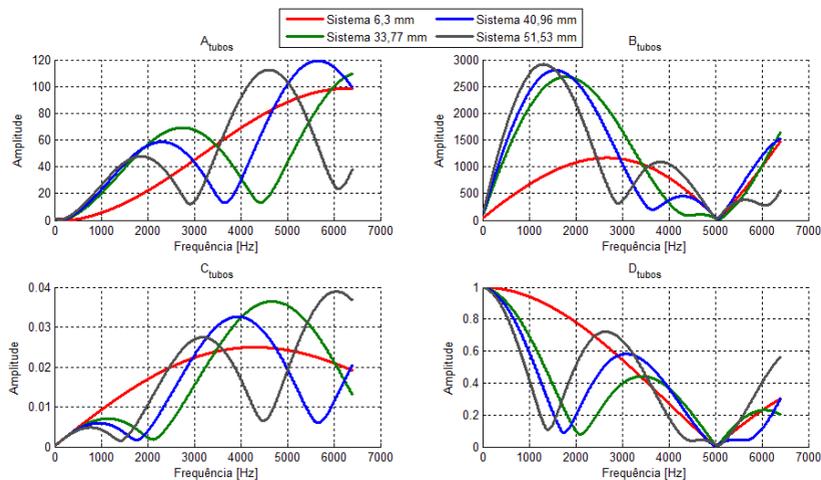


Figura 3.11: Módulo dos quatro parâmetros das cargas de caracterização.

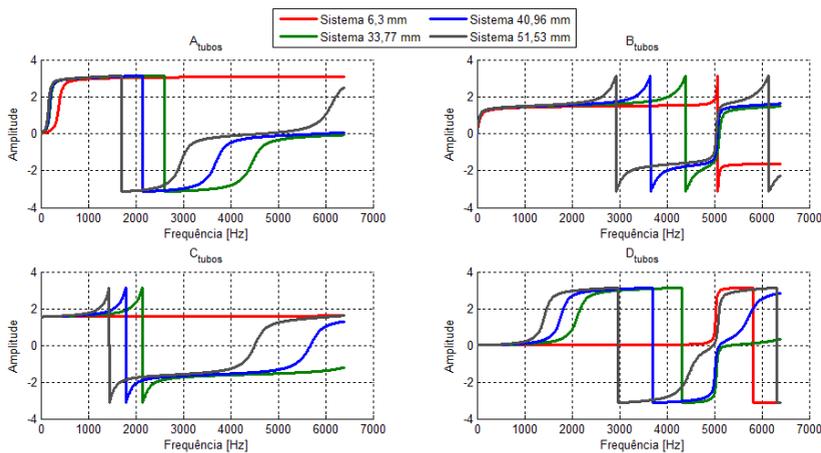


Figura 3.12: Fase dos quatro parâmetros das cargas para caracterização.

A segunda condição analisada é referente à Equação (2.67), para analisar tal condição, foi apresentada a equação $\frac{A_{CG}Z_L+B_{CG}}{C_{CG}Z_L+D_{CG}}$ para cada sistema acústico, Figura 3.13. O índice (CG) indica qual sistema acústico o parâmetro da matriz de transferência é referente (sistema acústico I ou II). Quando $\frac{A_I Z_L+B_I}{C_I Z_L+D_I} = \frac{A_{II} Z_L+B_{II}}{C_{II} Z_L+D_{II}}$ a condição referente à Equação (2.67) será satisfeita e desta forma, o modelo numérico obtido para as cargas com parâmetros semelhantes fornecerá uma, provável, resposta divergente da resposta experimental. Da mesma forma que a primeira condição, na região próximo de 5000 Hz é possível verificar que a segunda condição para o sistema 6,3 mm apresenta valores semelhantes ao sistema 40,96 mm, o que resulta nos resultados numéricos divergentes dos experimentais, Figura 3.9.

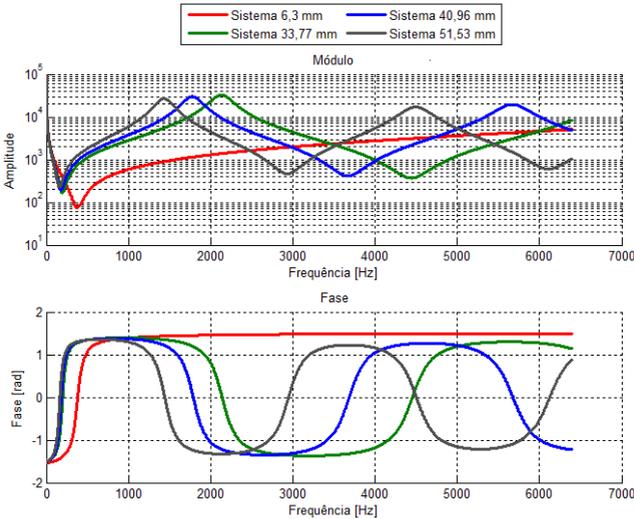


Figura 3.13: Análise da condição referente à Equação (2.67) para as diversas cargas para caracterização.

A terceira condição é analisada com base nas Equações (2.68), (2.69), (2.70) e (2.71). Para facilitar a análise desta condição as equações retrocitadas foram modificadas da seguinte forma:

Equação (2.68) altera para $\frac{A_I Z_L+B_I}{C_I Z_L+D_I} \frac{A_R}{B_R} \ll 1$ e $\frac{A_{II} Z_L+B_{II}}{C_{II} Z_L+D_{II}} \frac{A_R}{B_R} \ll 1$;

Equação (2.69) altera para $\frac{A_I Z_L+B_I}{C_I Z_L+D_I} \frac{A_R}{B_R} \gg 1$ e $\frac{A_{II} Z_L+B_{II}}{C_{II} Z_L+D_{II}} \frac{A_R}{B_R} \gg 1$;

Equação (2.70) altera para $\frac{A_I Z_L+B_I}{C_I Z_L+D_I} \frac{C_R}{D_R} \ll 1$ e $\frac{A_{II} Z_L+B_{II}}{C_{II} Z_L+D_{II}} \frac{C_R}{D_R} \ll 1$;

Equação (2.71) altera para $\frac{A_I Z_L + B_I}{C_I Z_L + D_I} \frac{C_R}{D_R} \gg 1$ e $\frac{A_{II} Z_L + B_{II}}{C_{II} Z_L + D_{II}} \frac{C_R}{D_R} \gg 1$.

Quando as equações acima forem satisfeitas, o modelo numérico, provavelmente, apresentará divergências em relação a resposta experimental. No entanto, nas Figuras 3.14, 3.15 e 3.16 é possível observar que os valores referentes a terceira condição são próximos a 100 ou 0,01 em vários pontos. Logo, conclui-se que valores 100 vezes maiores ou menores que a unidade não satisfarão a terceira condição de erro, pois se assim fosse o modelo numérico apresentaria vários pontos divergentes da resposta experimental. As equações apresentadas nos gráficos das Figuras 3.14, 3.15 e 3.16 são $\frac{A_{CG} Z_L + B_{CG}}{C_{CG} Z_L + D_{CG}} \frac{A_R}{B_R}$ e $\frac{A_{CG} Z_L + B_{CG}}{C_{CG} Z_L + D_{CG}} \frac{C_R}{D_R}$ para cada sistema acústico.

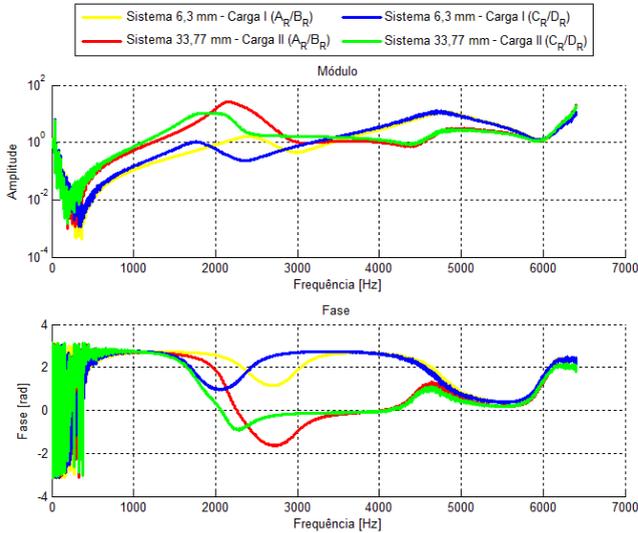


Figura 3.14: Análise da condição referente às Equações (2.68), (2.69), (2.70) e (2.71) para a configuração 6,3 - 33,77 mm

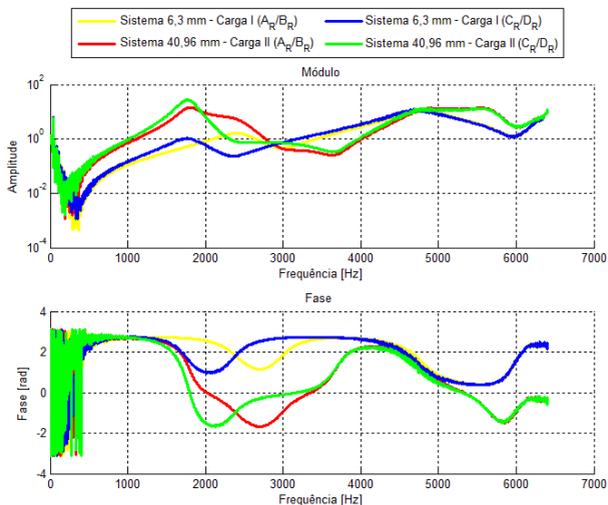


Figura 3.15: Análise da condição referente às Equações (2.68), (2.69), (2.70) e (2.71) para a configuração 6,3 - 40,96 mm

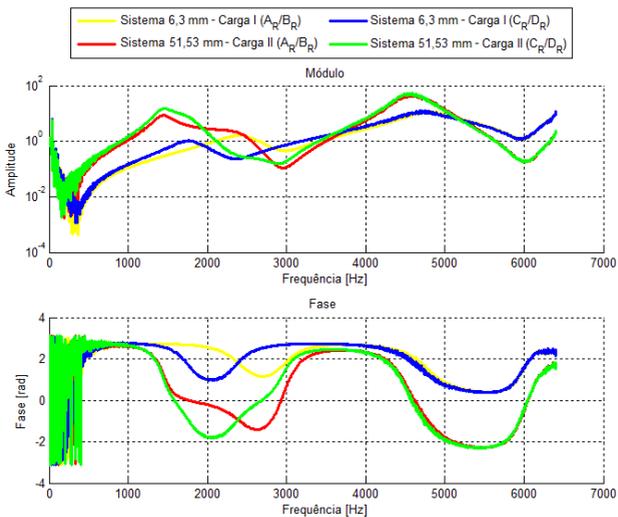


Figura 3.16: Análise da condição referente às Equações (2.68), (2.69), (2.70) e (2.71) para a configuração 6,3 - 51,53 mm

3.3.4 Análise do material dos tubos

O MMT permite incluir as dimensões dos diversos tubos e, desta forma, montar o circuito acústico desejado para simulação. Infelizmente, o método não contempla o tipo de material que compõe as paredes dos tubos onde ocorre a propagação sonora, e assume que o tubo possui paredes rígidas. Com o intuito de verificar o quanto o material das paredes pode influenciar na resposta do alto-falante, realizaram-se algumas medições experimentais das FRF's Pressão/Tensão. O experimento realizado utiliza um sistema acústico conforme a Figura 3.7, em que L_{tubo} é igual a 18,34 mm. Os tubos de conexão utilizados foram definidos de forma que os comprimentos fossem iguais, mas que se distinguíssem pelo tipo de material. As curvas na Figura 3.17 apresentam uma diferença mínima entre os tipos de materiais dos tubos e isto leva a concluir que os materiais dos tubos exercem pouca influência na resposta do alto-falante.

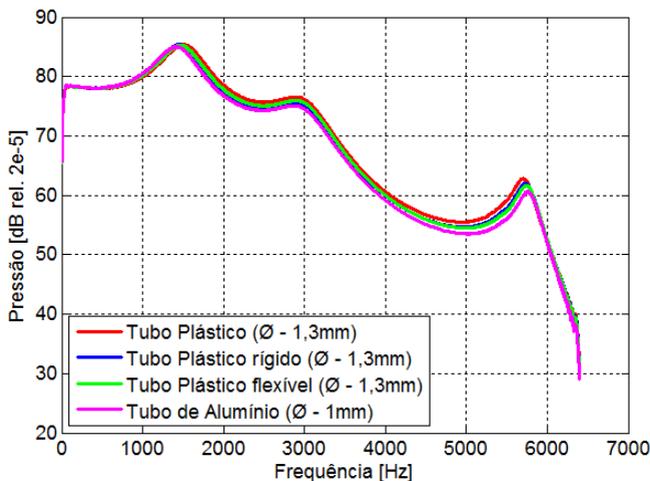


Figura 3.17: FRF Pressão/Tensão para tubos de diferentes materiais.

3.4 Análise do modelo numérico até 12,8 kHz

Nas Subseções 2.2.3 e 2.2.5 foi visto que a propagação sonora em dutos assumindo ondas planas e o MDC são dependentes da frequência

de análise. Segundo a Subseção 2.2.3, quanto maior a frequência, maior é a possibilidade de que o critério 8 seja violado e os resultados simulados não estejam mais de acordo com os reais. Segundo a Subseção 2.2.5, foi visto que o método é dependente do comportamento das cargas para caracterização, e este varia de acordo com a frequência analisada. Logo, constatou-se a necessidade de verificar a eficiência do modelo em regiões de frequência acima de 6,4 kHz, esta verificação foi realizada por meio de medições com o alto-falante até a frequência de 12,8 kHz para análise. O sistema acústico para verificação experimental-numérica é apresentado na Figura 3.7, em que L_{tubo} é igual a 93,30 mm, o modelo de alto-falante analisado foi o Sonion 1958e. O modelo numérico para o alto-falante (MDC) foi elaborado segundo a configuração 6,3 - 23,50 mm.

A Figura 3.18 apresenta os resultados experimentais e numéricos para um sistema acústico acoplado ao alto-falante analisado até a frequência de 12,8 kHz. Apesar dos resultados terem algumas divergências pontuais, a eficiência do modelo é razoavelmente boa e será um diferencial para análise de aparelhos auditivos, pois esta região de frequência normalmente não é fornecida nas informações técnicas dos alto-falantes comerciais, mas os modelos mais modernos de alto-falantes já procuram atuar também nestas regiões de frequência.

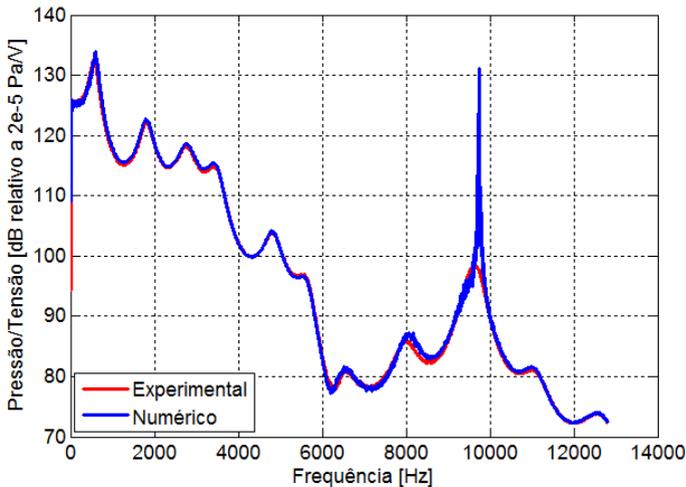


Figura 3.18: FRF Pressão/Tensão para uma análise até 12,8 kHz, para o sistema acústico 99,60 mm.

3.5 Simulador de orelha (Experimental x Numérico)

O simulador de orelha é um dos equipamentos utilizados para a análise do alto-falante. Esta análise com o simulador de orelha, normalmente, é realizada experimentalmente, mas a partir do método aqui proposto existe a possibilidade de realizá-la numericamente. Para a análise numérica, utiliza-se o MMT, e o simulador de orelha é representado como uma matriz de transferência elaborada com base em um circuito elétrico equivalente proposto por BRÜEL & KJÆR (2010), Anexo B. A partir deste circuito elétrico, pôde-se obter uma impedância equivalente, e utilizar esta como impedância de terminação no modelo numérico (MMT). Desta forma, tornou-se possível realizar uma comparação experimental-numérica para saber se o modelo numérico representa adequadamente a condição experimental.

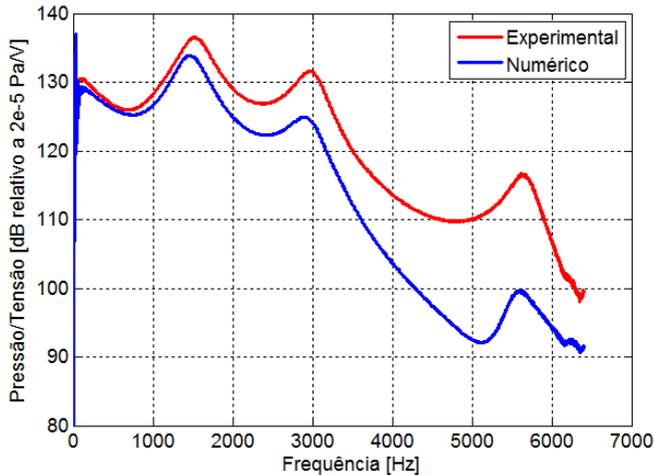


Figura 3.19: FRF Pressão/Tensão para um sistema acústico utilizando o simulador de orelha.

Na Figura 3.19, é apresentada a comparação experimental-numérica para a FRF Pressão/Tensão, e observa-se que até 1,5 kHz há boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos. No entanto, após 1,5 kHz, os resultados apresentam valores discrepantes. Portanto, para simulações em regiões de frequência acima de 1,5 kHz, não é aconselhável utilizar o modelo proposto, pois este apresenta resultados divergentes dos experimentais. A metodologia para elabo-

ração do modelo do simulador de orelha foi utilizada corretamente, logo, acredita-se que o circuito elétrico equivalente não é preciso para a representação do equipamento.

3.6 Análise de variabilidade

Com o objetivo de determinar a variabilidade da resposta de um modelo de alto-falante, analisou-se uma amostra de 5 elementos do modelo BK-21610 da fabricante Knowles Electronics. Para realizar o experimento de teste, selecionou-se os 5 elementos deste modelo de alto-falante, e obteve-se as FRF's Pressão/Tensão e os valores de THD para cada elementos.

O sistema acústico utilizado nesta análise é apresentado na Figura 3.7, em que L_{tubo} é igual a 34,66 mm. Observa-se no gráfico das FRF's, Figura 3.20, que um dos 5 elementos obteve um comportamento significativamente diferente, mas que ficou restrito à região de frequência entre 5500 Hz e 6500 Hz. Outro parâmetro útil para analisar a variabilidade do alto-falante é o desvio padrão, este parâmetro indica como os valores se comportam quando distantes da média. O desvio padrão da FRF dos elementos, segundo a região de frequência analisada, é apresentado na Figura 3.21.

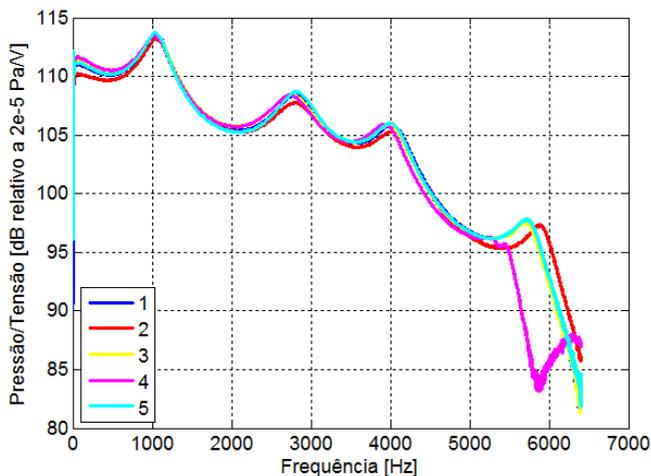


Figura 3.20: Variabilidade da FRF Pressão/Tensão para os 5 elementos do modelo BK-21610.

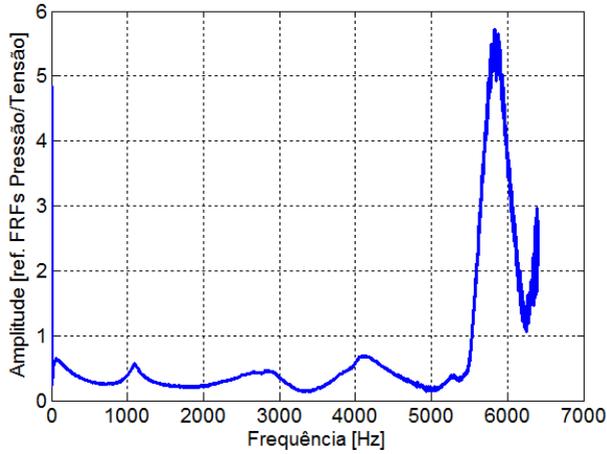


Figura 3.21: Desvio padrão da FRF Pressão/Tensão para os 5 elementos do modelo BK-21610.

Para obter os níveis de distorção, utilizou-se o sistema acústico da Figura 4.1, aplicou-se um sinal de tensão com amplitude de $765 \text{ mV}_{\text{rms}}$ para as respectivas frequências fundamentais e analisou-se até a frequência de 20 kHz, utilizando-se 6400 linhas de resolução. Os resultados de THD para as frequências analisadas são apresentados na Figura 3.22. Da mesma forma que foi obtido o desvio padrão para a FRF, na Figura 3.23 é apresentado o desvio padrão da THD para os 5 elementos.

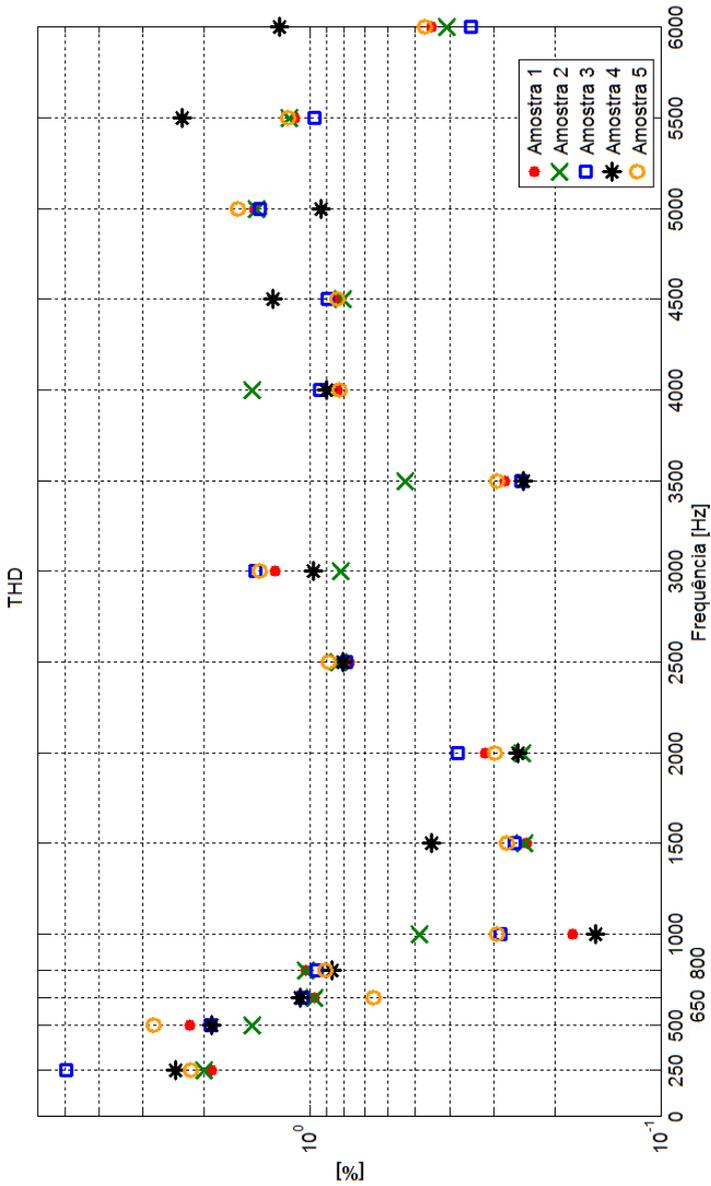


Figura 3.22: Variabilidade da THD para 5 elementos do modelo BK-21610.

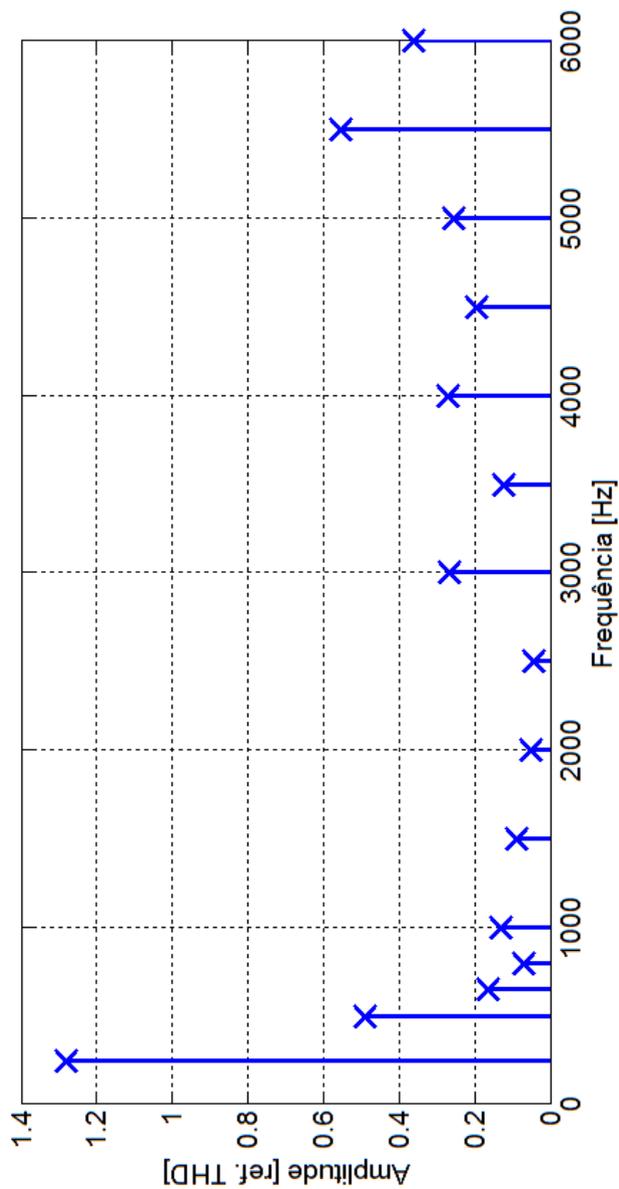


Figura 3.23: Desvio padrão da THD para os 5 elementos do modelo BK-21610.

3.7 Discussão de resultados

No presente capítulo, foi possível apresentar as etapas necessárias para utilização do MMT e MDC para alto-falantes para aparelhos auditivos e verificar que os experimentos necessários são de fácil aplicação. Após a aplicação dos métodos, foi possível apresentar alguns resultados preliminares para dois modelos de alto-falante e constatar que os resultados numéricos apresentaram boa concordância com os resultados experimentais, comprovando a eficiência dos métodos. Também foram apresentadas, neste capítulo, as condições que deveriam ser evitadas e as condições que deveriam ser obedecidas para se obter um modelo em concordância com a situação experimental.

Neste capítulo, também foi apresentada uma análise do modelo numérico acima de 6,4 kHz, e este apresentou bons resultados. Esta foi uma análise importante, pois o desenvolvimento de novos aparelhos auditivos tem se direcionado para respostas em altas frequências. Na proposta de análise do simulador de orelha, via MMT, foi constatado que os resultados não estiveram em concordância com o experimental e acredita-se que o circuito elétrico equivalente utilizado para representar o simulador de orelha não seja adequado.

Concluindo o capítulo, foi analisada a variabilidade de uma amostra de 5 elementos do modelo BK-21610 e acredita-se que o comportamento de cada elemento de um mesmo modelo pode ser alterado significativamente e recomenda-se que se realize o MDC para cada elemento que deseja-se obter a matriz de transferência, mesmo que se trate de um mesmo modelo de alto-falante.

Sendo assim, os resultados apresentados neste capítulo se mostraram favoráveis à utilização do MMT para simulação do comportamento do alto-falante. No capítulo 5 tem-se o objetivo de aplicar o método para sistemas mais complexos e avaliar, novamente, o desempenho do modelo do alto-falante. Esta análise será realizada com a utilização do manequim KEMAR devido à semelhança com o sistema físico real em que o aparelho auditivo estará em uso.

No capítulo seguinte será apresentada a análise de mais duas características eletroacústicas importantes na avaliação de um alto-falante, a distorção e o consumo, sendo que a FRF, outra característica eletroacústica importante na avaliação de alto-falantes, já foi apresentada neste capítulo.

CAPÍTULO 4

DISTORÇÃO E CONSUMO

4.1 Análise de distorção

Idealmente, o objetivo do aparelho auditivo é reproduzir um sinal sonoro idêntico ao captado pelo microfone, mas amplificado de tal forma a compensar a perda auditiva do usuário. No entanto, nem sempre é possível reproduzir um sinal sonoro idêntico ao captado pelo microfone devido à influência dos componentes do aparelho auditivo durante o tratamento do sinal captado. Logo, o sinal de saída, que deveria ser uma réplica amplificada do sinal captado, acaba contendo sinais espúrios. Esses sinais adicionais podem ser o ruído, a interferência ou a distorção, e são definidos como:

Ruído: É um produto indesejado que está presente no sinal de saída, independente de existir ou não um sinal de entrada aplicado ao aparelho auditivo. Pode ser intrínseco ao aparelho auditivo, que neste caso é chamado ruído interno, ou pode ser gerado a partir de alguma fonte não-acústica, que, neste caso, é referenciado como interferência. O ruído também pode ser entendido como sons desagradáveis e indesejados (GERGES, 2000), mas tal definição é mais concernente ao ambiente do que ao equipamento em si;

Interferência: É a produção de ruído na saída do aparelho auditivo originada por um campo magnético, eletrostático ou eletromagnético próximo ao aparelho auditivo;

Distorção: É um produto indesejado que está presente no sinal de saída apenas quando existir um sinal de entrada aplicado no aparelho auditivo. A sua existência é identificada mais como um sinal de saída de baixa qualidade do que como um produto adicional ao sinal de saída.

Dos três sinais adicionais apresentados anteriormente, apenas a distorção foi analisada neste trabalho, deixando os outros dois como sugestão de análise para trabalhos futuros. Existem dois tipos de distorção, a distorção harmônica e a distorção por intermodulação, mas a análise aqui proposta focará apenas na distorção harmônica. Esta escolha é justificada devido à distorção harmônica ser o tipo recomendado para análise segundo a norma de especificação das características de aparelhos auditivos (ANSI, S3.22-2003, 2003). Quanto aos valores máximos de THD, a recomendação dada pela ANSI (ANSI, S3.22-2003, 2003) é que estes estejam abaixo de 10%.

Para determinar o nível de distorção harmônica (THD) do alto-falante, a análise neste trabalho foi realizada de forma experimental. O experimento para quantificação da THD do alto-falante foi realizado com os seguintes procedimentos:

1. Definição do sistema acústico ao qual o alto-falante estará acoplado;
2. Aplicação de um sinal senoidal com frequência definida;
3. Determinação da amplitude das harmônicas de pressão sonora referentes à frequência do sinal aplicado.

A partir dos dados fornecidos pelo experimento supracitado e utilizando as Equações (1.3a) e (1.3b), é possível determinar a THD do alto-falante sob análise. No entanto, os valores de THD podem ser alterados devido à influência de alguns parâmetros na medição.

O objetivo desta seção é variar alguns parâmetros inerentes à medição de THD e verificar qual a influência destes nos valores de THD. Os parâmetros analisados foram:

1. Frequência máxima para análise;
2. Número de linhas para a faixa de frequência sob análise;
3. Sistema acústico acoplado ao alto-falante;
4. Amplitude e frequência da excitação.

Os equipamentos e o diagrama esquemático para a medição de THD foram semelhantes aos explanados na Seção 3.1, sendo a não utilização do resistor a única diferença no sistema de medição. Esta análise utilizou um sistema acústico acoplado ao alto-falante, Figura 4.1, e realizaram-se medições de THD, variando-se gradativamente cada parâmetro a ser analisado.

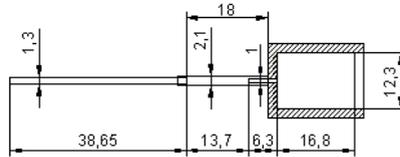


Figura 4.1: Sistema acústico acoplado ao alto-falante para a análise de distorção.

Para analisar a influência dos parâmetros supracitados nos valores de THD, foram utilizados os gráficos apresentados nas Figuras 4.2 e 4.3. A Figura 4.2 apresenta os valores de THD segundo a variação do parâmetro sob análise. A Figura 4.3 apresenta o desvio de THD em relação à média de THD. Para obter este gráfico, primeiro, determinou-se a média de THD para os três primeiros tipos de análise (frequência máxima, número de linhas e sistemas acústicos), após obtida esta média, calculou-se o desvio em relação a esta média e qual a porcentagem que este desvio representava em relação à média. A média da THD para os três primeiros tipos de análises foi de aproximadamente 0,9%.

Para a frequência máxima, constatou-se que a variação deste parâmetro pouco alterou os valores de THD, pois o desvio em relação à média estava abaixo de 1%. Ou seja, todos os valores de THD estiveram bastante semelhantes. Isto mostra que os harmônicos de maior ordem têm pouca influência no valor de THD.

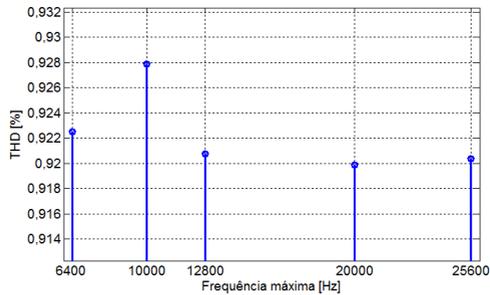
Para o número de linhas, constatou-se que a variação deste parâmetro alterou um pouco os valores de THD, mas a variação não foi significativa. Analisando-se o desvio em relação à média, este apresentou valores mais significativos quando se utilizou um número de linhas abaixo de 1600 para a análise até 6400 Hz. Logo, para uma análise até 6400 Hz, recomenda-se utilizar no mínimo 1600 linhas de resolução para obtenção dos valores de THD.

Para a análise dos diferentes sistemas acústicos acoplados ao alto-falante, houve uma diferença considerável nos valores de THD, Figura 4.2. A explicação para tal diferença nos resultados de distorção é justificada observando-se a Figura 4.4. Nesta, é apresentada a FRF

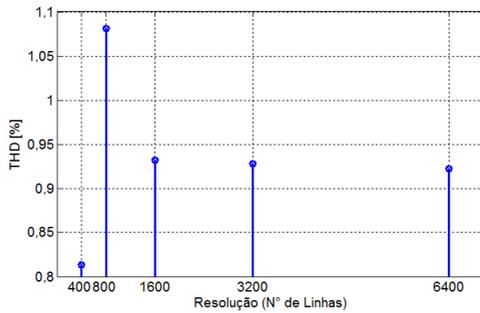
Pressão/Tensão (mic. acoplador/terminais do alto-falante) para os dois casos com maior discrepância nos valores de THD (sistema acústico 4 e 5). Considerando que a análise de THD é realizada para a frequência de 500 Hz, e que se aplique a mesma amplitude para o sinal de tensão, o sistema acústico 4 obterá um NPS maior para a fundamental e menor para as harmônicas em relação ao sistema acústico 5.

Analisando-se as Equações (1.3a) e (1.3b), pode-se constatar que a THD é diretamente afetada pelas amplitudes da fundamental e suas harmônicas. Sendo assim, para análise de um mesmo alto-falante, pode-se obter valores consideravelmente diferentes de THD, somente alterando-se a carga para realização do ensaio. Portanto, para uma correta análise qualitativa e comparativa de um alto-falante, deve-se utilizar o mesmo sistema acústico acoplado ao alto-falante na comparação entre diversos modelos.

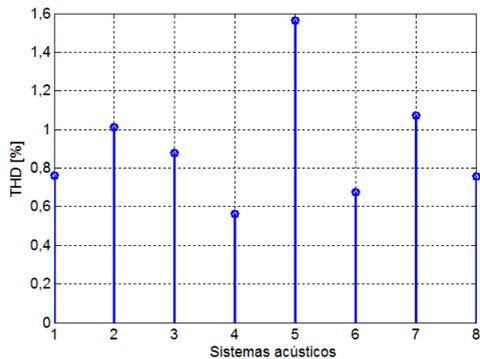
Na Figura 4.5, é apresentada uma análise do nível de THD segundo a amplitude e a frequência de excitação do alto-falante. Como já era previsto, o aumento da tensão aplicada resulta em um aumento do nível de THD, isto devido às limitações mecânicas do alto-falante. A variação de THD segundo a frequência de excitação também variará devido àquela estar relacionada com FRF do sistema ao qual o alto-falante estiver acoplado.



(a)

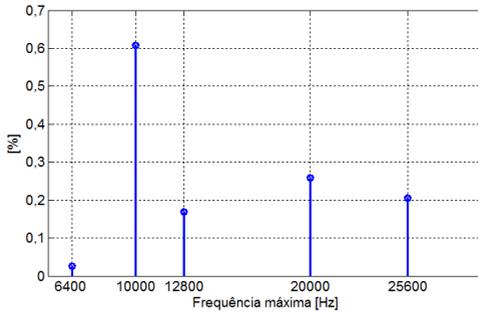


(b)

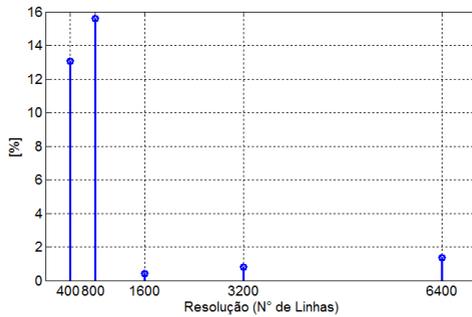


(c)

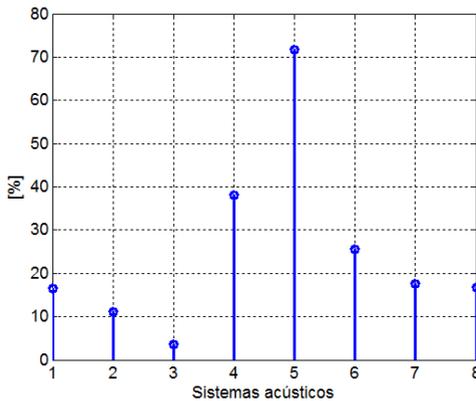
Figura 4.2: THD analisada segundo: (a) Frequência máxima para análise, (b) Número de linhas para a faixa de frequência sob análise e (c) Sistemas acústicos acoplados ao alto-falante.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.3: (a) Desvio em relação à média para as frequências máximas analisadas, (b) Desvio em relação à média para os números de linhas analisados e (c) Desvio em relação à média para os sistemas acústicos acoplados ao alto-falante.

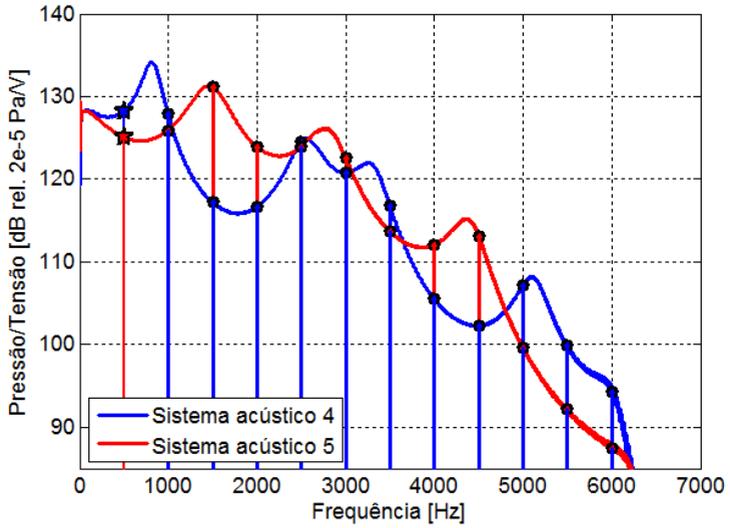


Figura 4.4: FRF Pressão/Tensão para os sistemas acústicos 4 e 5.

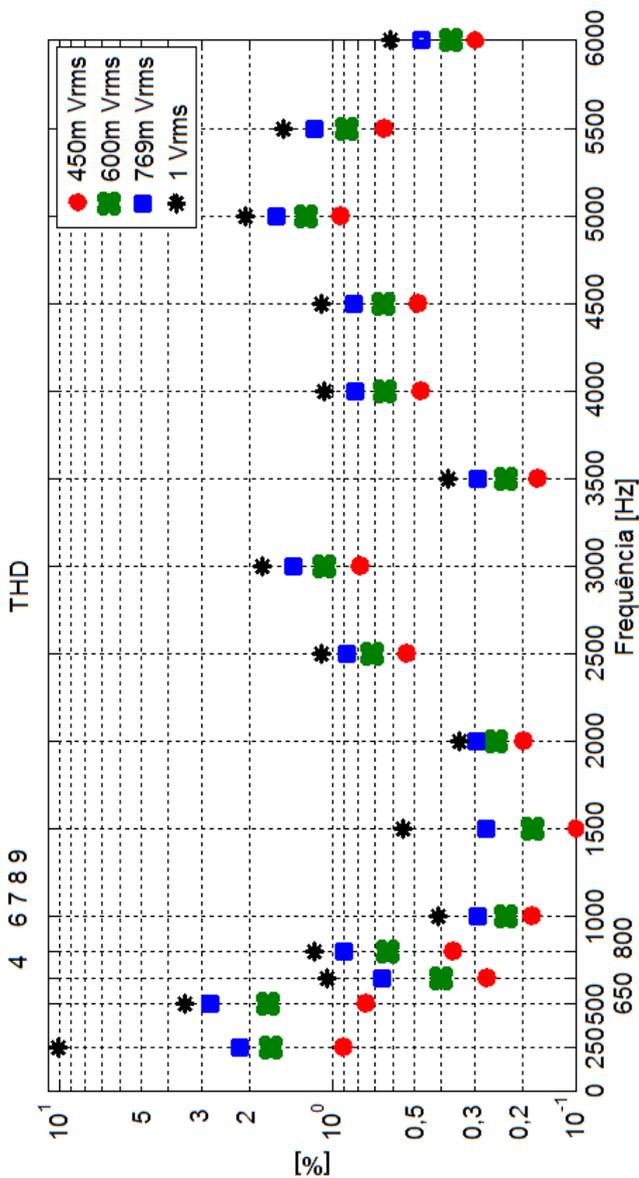


Figura 4.5: Distorção para as seguintes condições: (1) 1,5 ohms; 6400 Linhas; 25,6 kHz; 450m Vrms, (2) 1,5 ohms; 6400 Linhas; 25,6 kHz; 600m Vrms, (3) 1,5 ohms; 6400 Linhas; 25,6 kHz; 769m Vrms e (4) 1,5 ohms; 6400 Linhas; 25,6 kHz; 1 Vrms.

4.2 Análise de consumo

A utilização do MDC, neste trabalho, exige a coleta de dados da corrente consumida pelo alto-falante. A aplicação deste método foi apresentada no capítulo anterior, e verificando-se os dados de corrente consumida pelo alto-falante foi possível constatar que esta depende do sistema acústico ao qual o alto-falante estiver acoplado. Tendo este indicativo como base, o objetivo desta seção foi analisar o consumo de um alto-falante segundo a variação do sistema acústico acoplado a ele. A partir dos resultados obtidos, foi possível apresentar algumas conclusões.

O consumo é um dos parâmetros de análise que pode ser obtido facilmente, tanto experimental como numericamente. No entanto, utilizar o método numérico é mais vantajoso, pois este não necessita dos ensaios experimentais para cada condição a se simular. Numericamente (por meio do MMT), é necessário obter-se a corrente consumida a partir da definição no sinal de tensão aplicado. O procedimento por etapas, para se obter a corrente pelo MMT, será o seguinte:

- 1:** Definir o sistema acústico ao qual o alto-falante estará submetido (tubos, cavidades e impedâncias);
- 2:** Definir o sinal de excitação, ou seja, a tensão elétrica aplicada ao alto-falante;
- 3:** Obter o resultado de pressão sonora para o sinal de excitação no ponto desejado;
- 4:** A partir do resultado de pressão sonora, obter a corrente elétrica;
- 5:** Aplicar os dados obtidos na equação de potência, $P = VI$, onde, P é a potência elétrica, V é a tensão elétrica e I a corrente elétrica.

Como citado anteriormente, a corrente elétrica consumida pelo alto-falante depende do sistema acústico acoplado ao alto-falante, consequentemente o consumo do alto-falante também dependerá deste. A corrente elétrica está relacionada com a impedância elétrica, Equação (4.1), logo, esta também variará de acordo com o sistema acústico acoplado ao alto-falante. Com o intuito de verificar qual a relação da impedância elétrica com o consumo do alto-falante, nesta seção também será apresentado o comportamento da impedância elétrica para um alto-falante acoplado a diversos sistemas acústicos. Para tal análise,

será necessário ter conhecimento das seguintes equações:

$$V = Z_{el}I, \quad (4.1)$$

$$P = VI, \quad (4.2)$$

$$E = Pt, \quad (4.3)$$

onde Z_{el} é a impedância elétrica, E é a energia e t o tempo.

Primeiramente, é possível verificar que a pressão sonora do alto-falante varia dependendo do sistema acústico acoplado a ele, Figuras 4.6 e 4.7. A comprovação de que a corrente elétrica também dependerá do sistema acústico acoplado ao alto-falante é apresentada nas Figuras 4.8 e 4.9. Por último, é possível verificar que a impedância elétrica, também é variável segundo o sistema acústico acoplado ao alto-falante, Figuras 4.10 e 4.11. Portanto, a partir destes dados, é possível verificar que dependendo do sistema acústico, o alto-falante alterará o seu comportamento elétrico. Conhecendo a relação entre a corrente elétrica e a energia consumida, Equações (4.2) e (4.3), é possível concluir que o consumo do alto-falante dependerá do sistema acústico ao qual ele estiver acoplado.

Analisando a Tabela 4.1, que apresenta a potência consumida para os respectivos sistemas acústicos acoplados ao alto-falante, é possível comprovar a afirmação referente ao consumo do alto-falante. A média obtida para os sistemas da Tabela 4.1 foi 1,876 miliwatts e o desvio padrão foi igual a 1.71e-6.

Tabela 4.1: Potência consumida para o alto falante BK-21610 considerando um sinal de excitação de 450 mVrms (6,4 kHz - 6400 Linhas).

Sistema acústico	Consumo (miliwatts)
Tubo 6,30 mm + Cavidade 2 cm ³	1,873
Tubo 23,50 mm + Cavidade 2 cm ³	1,876
Tubo 27,77 mm + Cavidade 2 cm ³	1,874
Tubo 33,77 mm + Cavidade 2 cm ³	1,874
Tubo 40,96 mm + Cavidade 2 cm ³	1,875
Tubo 51,53 mm + Cavidade 2 cm ³	1,877
Tubo 99,60 mm + Cavidade 2 cm ³	1,877
Tubo 115 mm + Cavidade 2 cm ³	1,878

No entanto, ao analisar-se a Tabela 4.1, é possível constatar que o desvio do consumo global para cada sistema acústico em relação à

média está em torno de 0,1%, e este valor não representa uma mudança significativa. Ou seja, de forma geral, o consumo global do alto-falante é muito semelhante para diversos sistemas acústicos, mas, para uma frequência específica, o consumo varia significativamente. Segundo os dados de FRF Pressão/Tensão, corrente elétrica e impedância elétrica do alto-falante, respectivamente, Figuras 4.6 e 4.7, Figuras 4.8 e 4.9 e Figuras 4.10 e 4.11, é possível verificar, também, a relação entre a impedância elétrica e o NPS fornecido pelo alto-falante. Esta relação é comprovada, pois o aumento da impedância elétrica (Figuras 4.10 e 4.11) representa uma redução na corrente consumida (Figuras 4.8 e 4.9). Em consequência da redução da corrente elétrica, ocorrerá uma redução da energia transmitida, Equações (4.2) e (4.3), pois a tensão elétrica permanece constante no espectro de frequência. Desta forma, o pico da impedância elétrica representa uma redução na corrente elétrica e, conseqüentemente, uma redução no NPS, Figuras 4.6 e 4.7, devido às relações envolvidas nas transferências de energia.

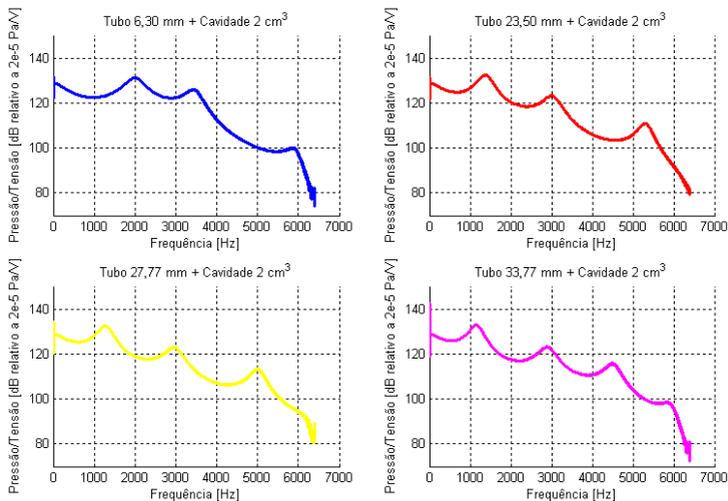


Figura 4.6: FRF's Pressão/Tensão (6,4 kHz - 6400 Linhas) para um alto-falante acoplado a diversos sistemas acústicos.

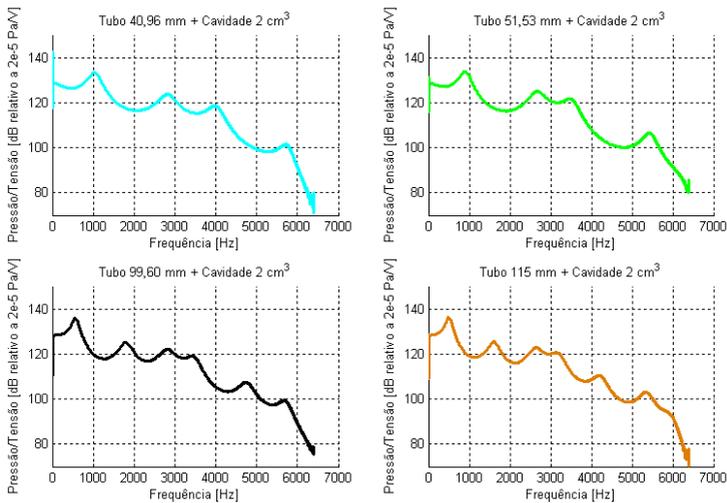


Figura 4.7: FRF's Pressão/Tensão (6,4 kHz - 6400 Linhas) para um alto-falante acoplado a diversos sistemas acústicos.

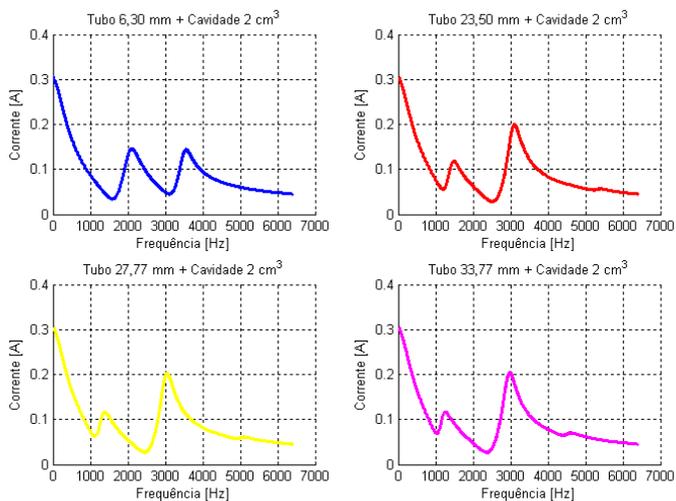


Figura 4.8: Corrente elétrica referente à excitação de 1 V (6,4 kHz - 6400 Linhas) para um alto-falante acoplado a diversos sistemas acústicos.

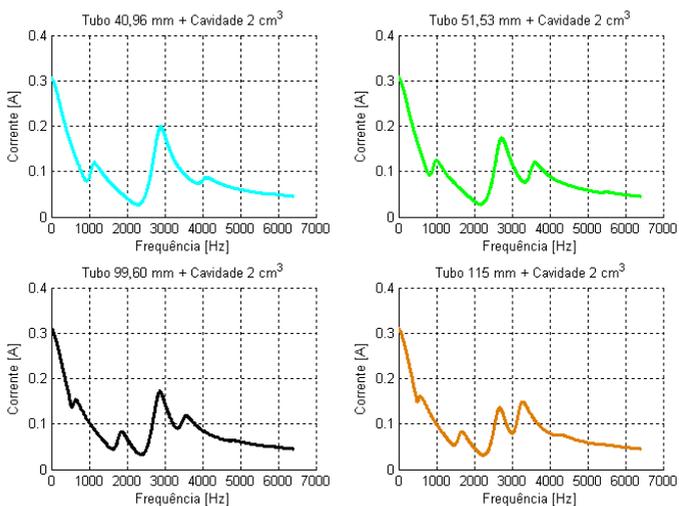


Figura 4.9: Corrente elétrica referente à excitação de 1 V (6,4 kHz - 6400 Linhas) para um alto-falante acoplado a diversos sistemas acústicos.

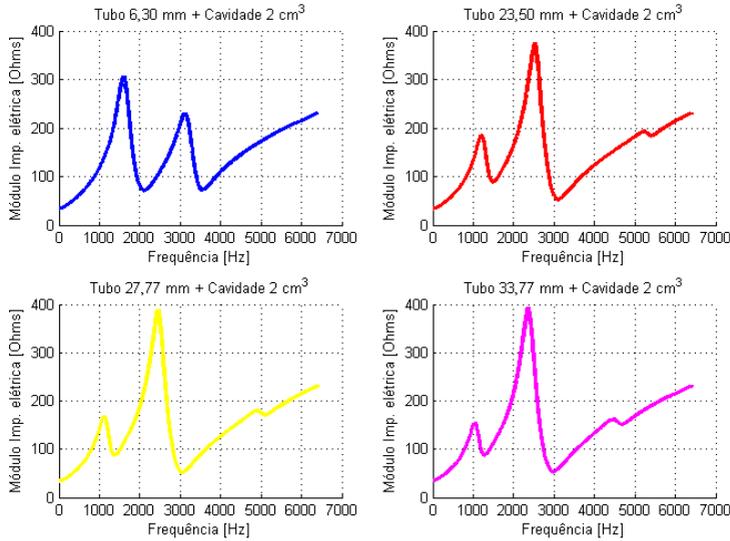


Figura 4.10: Módulo da impedância elétrica para um alto-falante acoplado a diversos sistemas acústicos.

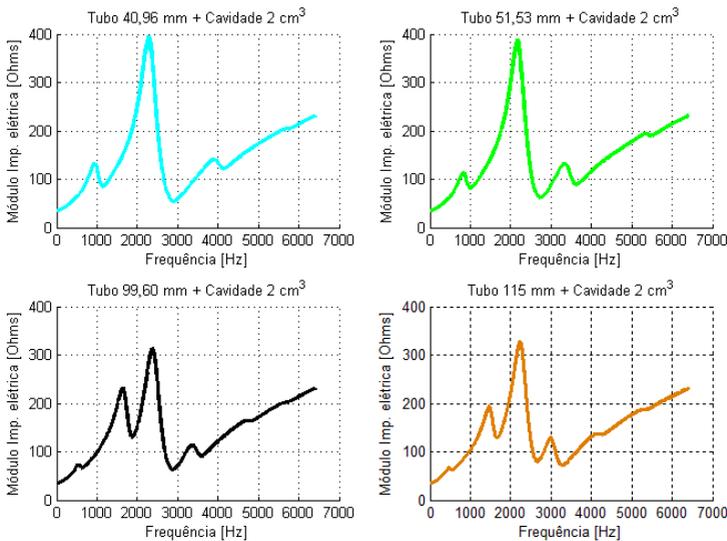


Figura 4.11: Módulo da impedância elétrica para um alto-falante acoplado a diversos sistemas acústicos.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE EM CONDIÇÕES DE USO ARTIFICIAIS

5.1 Introdução

A simulação de um sistema físico real tem o objetivo analisar sistemas verificando como estes se comportam em diferentes situações. Desta forma, é possível avaliar um sistema físico real sem incorrer nas despesas, demoras e riscos, em geral, inevitáveis, nos ensaios sob condições reais que, em especial para os aparelhos auditivos, envolvem seres humanos.

A simulação do sistema físico real pode ser realizada por meio de modelos análogos ou analíticos. No caso dos aparelhos auditivos, a simulação análoga busca representar, por meio de um sistema físico similar, a condição real e pode ser realizada utilizando o manequim KEMAR, Figura 1.17, já a simulação analítica pode ser realizada por meio do MMT. As análises apresentadas neste capítulo são ditas em condições de uso artificiais, pois elas buscam representar, por meio de outros sistemas, a situação real de um aparelho auditivo em funcionamento, ou seja, aplicado na orelha humana. Estas condições foram utilizadas com o objetivo de validar a metodologia analítica (MMT), proposta para a análise do alto-falante, para um caso mais complexo.

5.2 Descrição do sistema físico aproximado (KEMAR)

A simulação análoga será realizada utilizando o sistema físico aproximado chamado KEMAR. O desenvolvimento do manequim KEMAR foi baseado nas dimensões antropométricas médias para um humano adulto (BURKHARD; SACHS, 1975). Este manequim é uma ferramenta para auxiliar as medições e estudos da performance de aparelhos auditivos. A análise do comportamento das ondas sonoras, quando incidem na cabeça e torso humano, e a análise de efeitos, tais como difração e reflexão, são estudos que podem ser realizados por meio de ensaios com o manequim KEMAR.

Na Figura 5.1, é apresentado o sistema físico aproximado utilizado para simulação das condições de uso para aparelhos auditivos. Este sistema é composto pela parte externa (cabeça, orelha, carcaça do aparelho auditivo, alto-falante, molde e torso) e a parte interna (cavidade representando o canal auditivo e o microfone representando o tímpano). Para confeccionar o molde utilizado no KEMAR foi necessário obter a impressão da orelha externa e, a partir desta impressão, elaborar o molde em acrílico. Este molde tem a forma idêntica da orelha externa moldada e deste modo proporciona uma ótima conexão entre o aparelho auditivo e a cavidade representante do canal auditivo. Esta cavidade foi fabricada pelo LVA e tem o volume de 2 cm^3 .

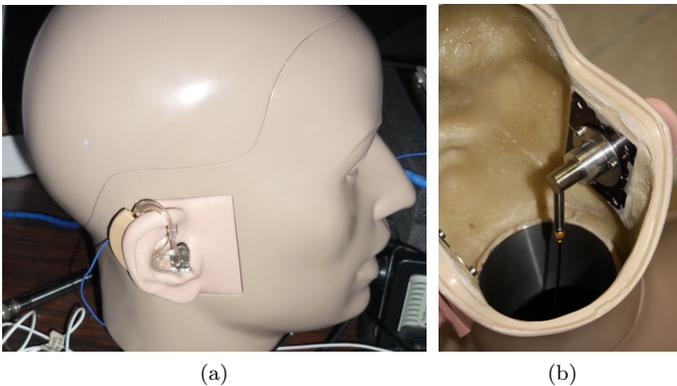


Figura 5.1: Parte (a) Externa e (b) Interna do sistema físico aproximado utilizado para análise em condições de uso artificiais de aparelhos auditivos.

Na análise apresentada neste capítulo será necessário obter a FRF Pressão/Tensão referente à pressão sonora na saída da ventilação do molde do KEMAR. Esta é uma informação importante, pois a partir desta é possível obter um indicativo referente à probabilidade de ocorrência de retroalimentação. Para obter esta FRF, experimentalmente, foi necessário utilizar um sistema específico para esta medição. Este sistema é apresentado na Figura 5.2 e será referenciado como Sonda de Medição Pontual (SMP).

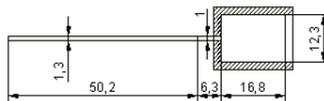


Figura 5.2: Sonda de Medição Pontual - SMP.

A utilização da SMP foi necessária devido às dimensões do microfone de 1/2 polegada influenciarem a resposta de pressão sonora na saída da ventilação. O procedimento adotado para a medição com a SMP é o simples posicionamento do tubo flexível no ponto desejado para medição.

O tubo flexível utilizado na SMP possibilita medições pontuais com a mínima influência no campo acústico sob análise. No entanto, a utilização do sistema tubo flexível-acoplador modificará a resposta de pressão sonora obtida no microfone da SMP. Para eliminar a influência deste sistema na resposta do microfone da SMP, foi necessário realizar uma calibração.

Tal calibração foi realizada na câmara anecoica, com uma fonte sonora emitindo um sinal de banda larga a 1 metro da SMP. A fonte sonora (alto-falante eletrodinâmico comum) possui resposta aproximadamente plana na região de frequência analisada (0-6,4 kHz) e o diagrama para o procedimento de calibração é apresentado na Figura 5.3. A partir do experimento de calibração, obtém-se a FRF P2/P1, (P1 - Pressão no ponto 1; P2 - Pressão no ponto 2). A multiplicação da FRF P2/P1 pela resposta de pressão obtida pela SMP anulará a influência do tubo flexível e acoplador, e obter-se-á, então, a resposta real no ponto desejado.

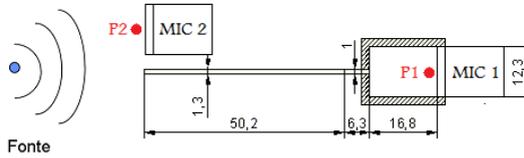


Figura 5.3: Diagrama da calibração da SMP.

5.3 Descrição do modelo analítico (MMT)

O sistema físico aproximado foi utilizado para validar o MMT em uma situação mais próxima da condição real de uso e para um sistema mais complexo que os estudados no Capítulo 3. Na Figura 5.4, é apresentado o diagrama esquemático do experimento realizado com o modelo análogo. O modelo analítico foi elaborado com base no MDC (alto-falante) e nas dimensões dos dutos do experimento. Um segundo diagrama para este experimento e a representação deste via matrizes de transferência são apresentados na Figura 5.5.

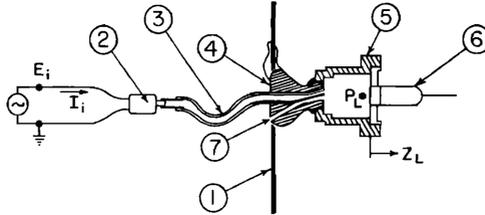


Figura 5.4: Sistema físico aproximado: (1) Orelha (KEMAR); (2) Alto-falante; (3) Tubo curvado (ear-hook) + tubo de conexão com molde; (4) Molde; (5) Acoplador; (6) Microfone e (7) Ventilação.

São representados, na Figura 5.5a, o alto-falante, o tubo de conexão entre o alto-falante e o tubo curvado (1), o tubo curvado (2), o tubo de conexão entre o tubo curvado e a cavidade do canal auditivo (3), a ventilação (4) e a cavidade do canal auditivo (5) e (6). O procedimento para aplicação das matrizes de transferência em paralelo (ventilação) é exposto no Anexo A.

Para o modelo (MMT) elaborado, representação do sistema físico aproximado, foi utilizado o MDC para caracterização do alto-falante, a teoria de propagação em dutos (com perdas) para a representação dos tubos acoplados ao alto-falante, Subseção 2.2.3, a impedância acústica

do microfone, fornecida pela BRÜEL & KJÆR (1996), como impedância de terminação para a representação o comportamento acústico do microfone e a impedância acústica de um pistão flangeado e não-flangeado, como impedância de terminação para a representação do comportamento acústico da saída da ventilação.

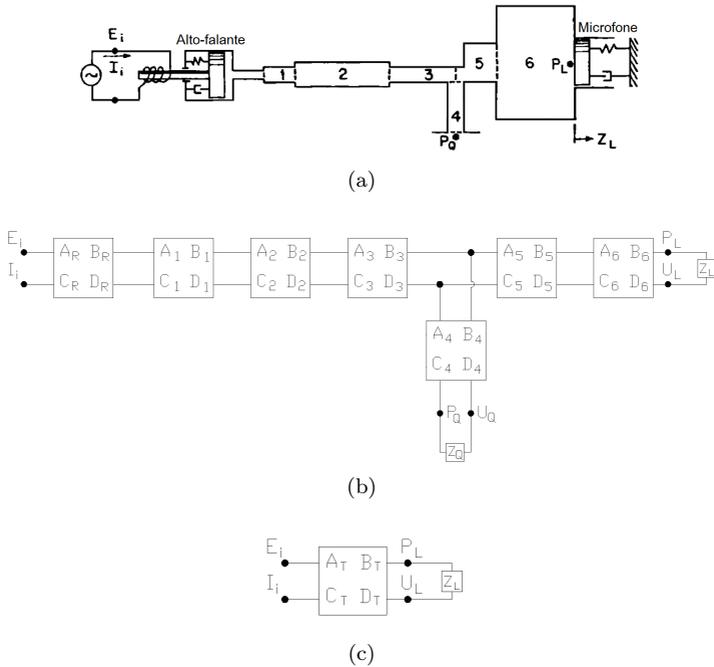


Figura 5.5: Experimento sob teste: (a) Diagrama esquemático, (b) Modelo pelo MMT para o experimento, (c) Modelo reduzido (MMT) para o experimento.

5.4 Resultados preliminares

Tanto o modelo análogo (experimental) quanto o modelo analítico (numérico) foram elaborados com o objetivo de fornecer a resposta do sistema físico real, ou seja, refletir a condição de uso de um aparelho auditivo. Nesta seção, será apresentado um comparativo entre o modelo análogo e o analítico, e o objetivo dela é demonstrar que o modelo analítico é capaz de representar sistemas mais complexos de

forma confiável. O gráfico na Figura 5.6 apresenta o resultado experimental (KEMAR) e numérico (MMT), para a FRF Pressão/Tensão referente ao microfone captando a pressão no acoplador (localização equivalente à do tímpano). O resultado experimental com o KEMAR representa um bom exemplo para verificação da qualidade do modelo analítico, pois é possível obter facilmente as dimensões do sistema acústico acoplado ao alto-falante e a complexidade do modelo é considerável devido à semelhança com o sistema físico real.

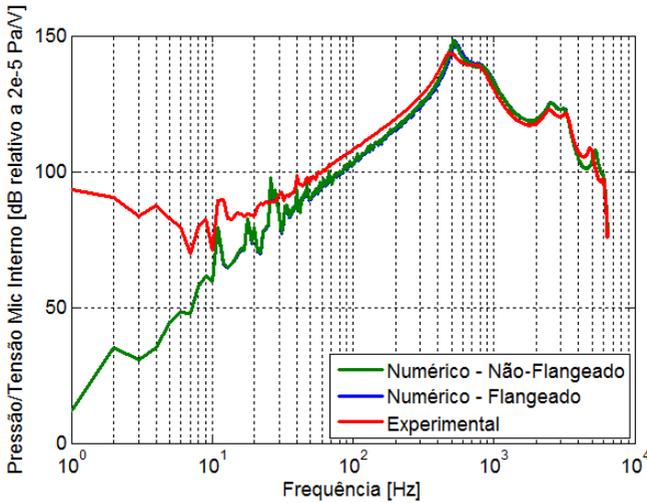


Figura 5.6: FRF Pressão/Tensão (acoplador) para um aparelho auditivo BTE.

Observando-se os resultados, Figura 5.6, é possível verificar que há boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos, e também que há a queda em baixa frequência devido à existência da ventilação. Foram elaborados dois modelos numéricos, o Flangeado e o Não-Flangeado, a diferença é referente à impedância de terminação utilizada na saída da ventilação, tal alteração não afetou a FRF Pressão/Tensão referente ao microfone do acoplador, mas afetará, significativamente, a FRF Pressão/Tensão referente ao microfone da saída da ventilação, conforme pode ser observado na Figura 5.7.

Continuando a análise comparativa, também foi verificada a FRF Pressão/Tensão, mas agora captando a pressão sonora referente à saída da ventilação. O resultado experimental foi obtido com SMP, conforme indicado na Seção 5.2, e a comparação entre os resultados experimentais

e numéricos são apresentados na Figura 5.7. O resultado numérico foi obtido via MMT, e a diferença entre os dois resultados é que a impedância de terminação para a saída da ventilação em um caso foi considerada como sendo a impedância acústica para um tubo aberto flangeado e em outro caso foi considerada como sendo a impedância acústica para um tubo aberto não-flangeado. Observando-se a Figura 5.7, é possível verificar que até, aproximadamente, 500 Hz o modelo com a impedância de tubo aberto flangeado apresenta resultados em melhor concordância que o modelo com a impedância de tubo aberto não-flangeado. Este fato é devido à dimensão do comprimento de onda para a frequência em análise. Para frequências mais baixas o molde acaba não representando um obstáculo significativo para as ondas sonoras e a ventilação radia de forma semelhante à condição de campo livre. No entanto, para frequências mais altas o comprimento de onda é menor e o molde acaba representando um obstáculo significativo e esta condição se torna semelhante à condição de tubo aberto flangeado. Desta forma, sugere-se, para representação do comportamento da ventilação, a utilização da impedância de tubo aberto não-flangeado até, aproximadamente, 500 Hz, e após este limite é conveniente utilizar a impedância de tubo aberto flangeado.

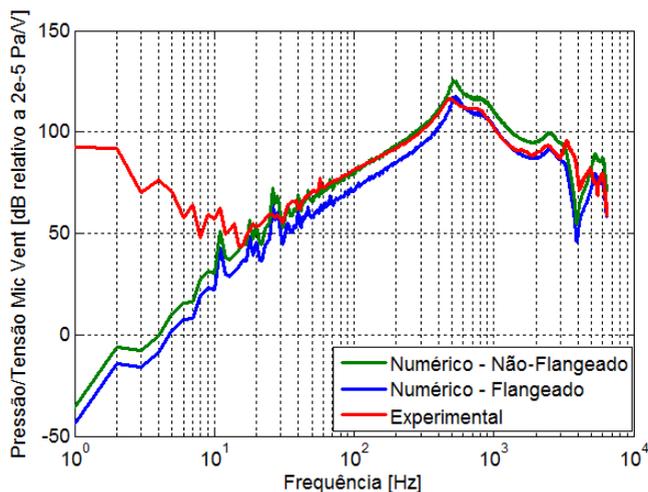


Figura 5.7: FRF Pressão/Tensão obtida para a saída da ventilação para o aparelho auditivo BTE.

5.5 Análise da geometria do canal auditivo

Na elaboração do modelo analítico, um dos componentes do modelo é o canal auditivo. Para representar o canal auditivo, pode-se utilizar a aproximação de um único cilindro, mas, na realidade, o canal auditivo possui uma geometria bastante diferente de um cilindro, conforme observado na Figura 5.8. O objetivo da análise desta seção é determinar se o detalhamento geométrico do canal auditivo altera significativamente a resposta do alto-falante. O estudo de [Egolf et al. \(1993\)](#), possibilitou dividir o canal auditivo em trinta seções de 1 mm de espessura, Figura 5.9. A partir deste estudo, foi possível obter um diâmetro equivalente para cada seção transversal do canal auditivo. Utilizando os valores de diâmetro e comprimento das seções transversais nas matrizes de transferência para propagação sonora em tubos (com perdas), foi possível construir um modelo em maior conformidade com o canal auditivo.

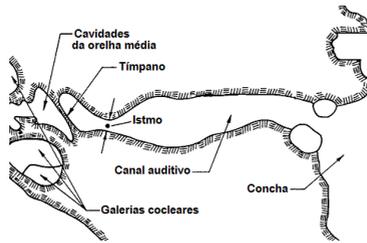


Figura 5.8: Geometria do canal auditivo ([EGOLF et al., 1993](#)).

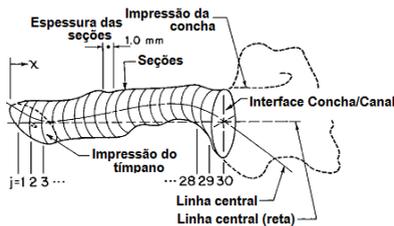


Figura 5.9: Geometria particionada do canal auditivo ([EGOLF et al., 1993](#)).

O diâmetro utilizado para a representação do canal auditivo em um único cilindro foi definido a partir da média dos trinta diâmetros

obtidos pelo estudo de [Egolf et al. \(1993\)](#), e o resultado obtido foi de 7,84 mm. Conforme observado o gráfico na Figura 5.10, a mudança mais significativa é observada após 9 kHz. Portanto, para simulações usuais até 6,4 kHz, é possível utilizar a representação do canal auditivo como um único cilindro, já que a diferença observada é menor e tempo de cálculo da resposta será menor (Matlab).

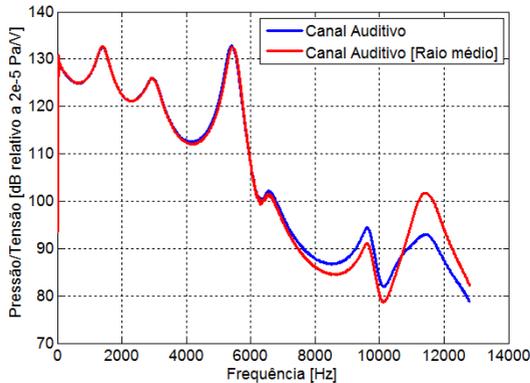


Figura 5.10: FRF Pressão/Tensão para o canal auditivo representado por um único cilindro e por trinta cilindros.

5.6 Impedância do Microfone x Orelha Humana

Os modelos do MMT utilizados anteriormente tinham como impedância de terminação a impedância acústica do microfone. Como o objetivo do modelo é simular as condições de uso para aparelhos auditivos, uma análise foi realizada com o objetivo de comparar os resultados obtidos utilizando dados da literatura científica para a impedância acústica do tímpano. Utilizando-se estas impedâncias, foi possível realizar um comparativo entre as respostas do alto-falante, e seu sistema acústico acoplado, considerando um microfone e considerando a orelha humana.

Com base nos circuitos elétricos apresentados nas Figuras B.2 e B.3 (Anexo B), que representam o comportamento acústico da orelha humana, foi possível determinar uma impedância equivalente para cada circuito e utilizá-las no modelo de matrizes de transferência, ao invés de utilizar a impedância do diafragma do microfone.

A partir dos resultados, Figura 5.11, foi possível constatar que a resposta utilizando a impedância da orelha média, baseada no modelo de Pascal et al. (1998), acarreta uma pequena queda em baixa frequência em comparação com a resposta utilizando a impedância do diafragma do microfone. Já para o modelo de WALLACE JR, R.L. (1975), foi possível constatar uma diferença um pouco mais significativa no nível da resposta, mas o comportamento da curva permaneceu bastante semelhante. No entanto, o modelo de WALLACE JR, R.L. (1975) contempla apenas a representação do tímpano.

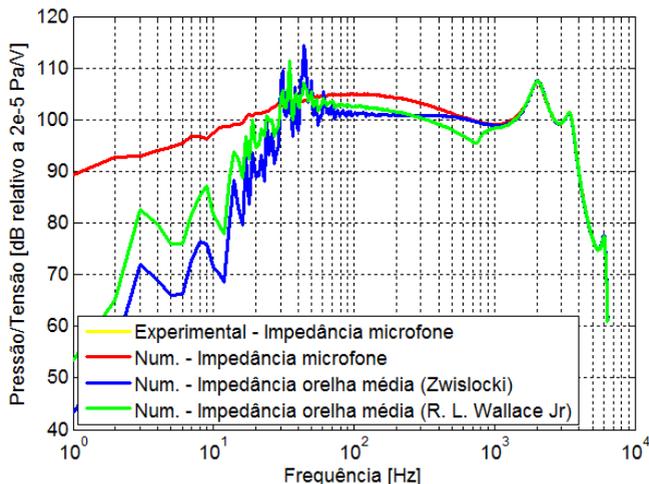


Figura 5.11: Resposta para os sistemas utilizando a impedância do microfone e da orelha humana.

5.7 Análise de retroalimentação

A microfonia, ou retroalimentação, é um fenômeno encontrado em aparelhos auditivos e pode ser originada de duas formas: internamente e externamente. A microfonia interna é caracterizada pelas oscilações que retornam ao microfone por caminhos internos ao aparelho auditivo, sendo as vibrações do alto-falante a principal fonte causadora. A microfonia externa é causada pelo vazamento do som do canal auditivo, principalmente por meio da ventilação do molde. O objetivo desta ventilação é reduzir o efeito de oclusão, mas, ao mesmo tempo, ela acaba se tornando uma fonte sonora próxima ao microfone. Este pro-

blema é, particularmente, importante para aparelhos ITE, pois nestes o microfone do aparelho auditivo se localiza bem próximo à ventilação. Quando este som do alto-falante retorna ao microfone, completa-se um ciclo sonoro indesejado, resultando na microfonia.

O molde para o aparelho auditivo pode ter alguns tipos de ventilação e, para cada tipo de ventilação, o nível de pressão sonora na sua saída será alterado. O MMT permite obter a pressão sonora em diversos pontos do circuito acústico em estudo, inclusive na saída da ventilação.

Tendo em vista um estudo de retroalimentação, foram elaborados dois modelos para representar dois tipos de ventilação. Utilizando estes modelos, foi possível obter a pressão sonora na saída da ventilação e, conseqüentemente, estimar qual o tipo de ventilação que está mais suscetível à retroalimentação. Os dois tipos de ventilação simulados são ilustrados nas Figuras 5.12b e 5.12c.

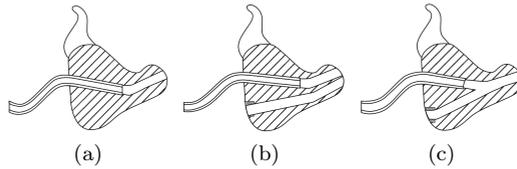


Figura 5.12: Tipos de moldes em aparelhos auditivos: (a) Molde ocluso, (b) Molde com ventilação paralela e (c) Molde com ventilação Y.

Na Figura 5.13, é apresentada a FRF Pressão/Tensão referente ao microfone do acoplador e, na Figura 5.14, é apresentada a FRF Pressão/Tensão referente à saída da ventilação. Analisando a Figura 5.13, é possível observar o efeito de oclusão e as diferenças de pressão sonora para o usuário devido ao tipo de ventilação. Para os dois tipos de ventilação foi possível observar uma resposta bem semelhante, sendo a diferença maior apenas na localização do primeiro pico e que a ventilação Y apresenta uma queda maior em baixa frequência. Analisando-se a Figura 5.14, para os mesmos diâmetros do canal de ventilação ($\phi = 1,1$ mm), é possível obter um indicativo de que a ventilação Y apresenta uma tendência maior que a ventilação paralela para ocorrência de retroalimentação, e que isto se deve aos maiores NPS apresentados na saída da ventilação Y. Aumentando-se o diâmetro do canal de ventilação, é possível observar um aumento da pressão sonora na saída da ventilação e o primeiro pico é deslocado para frequências mais altas.

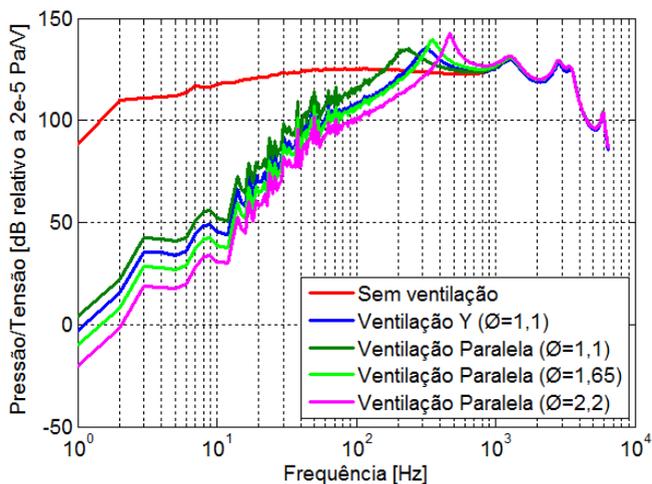


Figura 5.13: FRF Pressão/Tensão (acoplador) para tipos de ventilação.

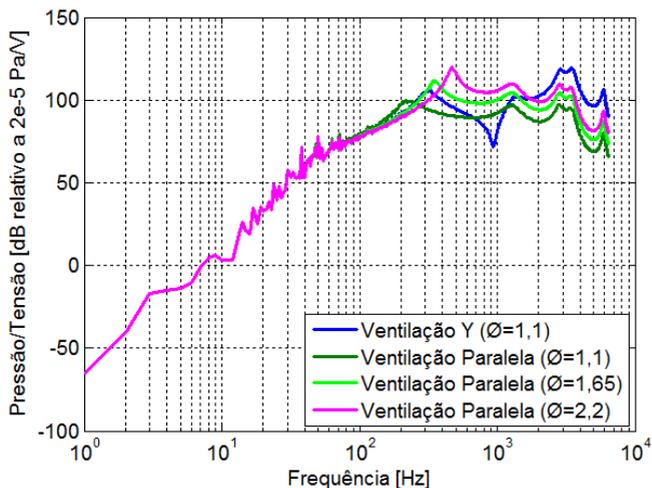


Figura 5.14: FRF Pressão/Tensão (ventilação) para tipos de ventilação.

5.8 Comparação experimental (Acopladores x KEMAR)

De acordo com a literatura científica, o simulador de orelha foi desenvolvido para simular a impedância acústica da orelha humana que varia de acordo com a frequência (FELS et al., 2007), e que o acoplador de 2 cm^3 não está apto para representar. Com o intuito de verificar estas afirmações, foram realizados quatro experimentos utilizando-se o acoplador de 2 cm^3 e o simulador de orelha, Figura 5.15.

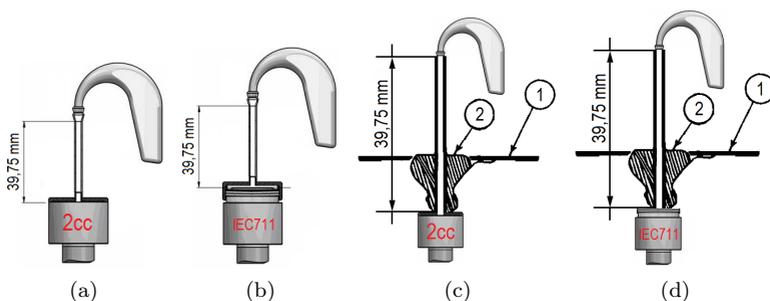


Figura 5.15: Diagramas esquemáticos para o: (a) 1º Experimento, (b) 2º Experimento, (c) 3º Experimento e (d) 4º Experimento. Para (c) e (d), 1 e 2 indicam, respectivamente, orelha e molde.

No primeiro experimento, utilizou-se um alto-falante acoplado a um aparelho auditivo BTE, um tubo para conexão e o acoplador de 2 cm^3 , Figura 5.16a. No segundo experimento utilizou-se o mesmo alto-falante acoplado a um aparelho auditivo BTE, o mesmo tubo de conexão do primeiro experimento, mas utilizou-se o simulador de orelha no lugar do acoplador de 2 cm^3 , Figura 5.16b. Para o terceiro e quarto experimento, o alto-falante, aparelho auditivo e tubo foram os mesmos utilizados anteriormente. No entanto, no terceiro experimento, acrescentou-se o molde e a cavidade para representação do canal auditivo, volume de aproximadamente 2 cm^3 para esta cavidade, e realizaram-se as medições no manequim KEMAR. No quarto experimento, acrescentou-se o molde e o simulador de orelha, e realizaram-se as medições no manequim KEMAR. Na Figura 5.16 são apresentados os sistemas acústicos dos experimentos analisados na presente seção.

No gráfico apresentado na Figura 5.17 observa-se que as tendências das respostas ficaram semelhantes, havendo apenas uma diferença de nível para o simulador de orelha. O gráfico da impedância acústica

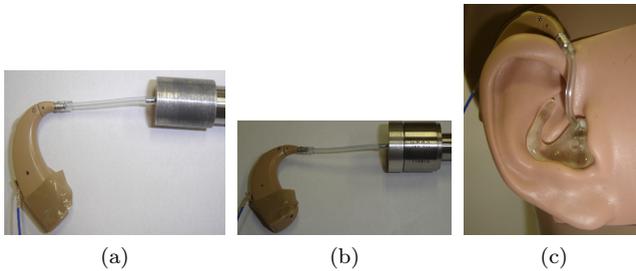


Figura 5.16: Experimentos realizados utilizando: (a) Acoplador de 2 cm³, (b) Simulador de orelha e (c) KEMAR.

do simulador de orelha é apresentado na Figura 5.18, e os valores em cada frequência são apresentados na Tabela 5.1. A impedância acústica do simulador de orelha, em 500 Hz, é correspondente ao volume de ar de 1,260 cm³ (ANSI, S3.25-2009, 2009). Logo, para um volume menor a consequência é que se tenha uma pressão sonora maior, o que justifica a diferença de nível.

Também é possível observar na Figura 5.17, que as respostas do 1° e 3° experimento foram bastante semelhantes, pois o volume das duas cavidades são iguais e o molde, por ser ocluso, acaba funcionando apenas como um meio de conexão, tornando os sistemas acústicos dos dois experimentos iguais. Logo, para ensaios com moldes oclusos é mais vantajoso utilizar apenas o acoplador de 2 cm³, pois a montagem do sistema acústico e a realização das medições são mais fáceis.

O sistema acústico do 1° experimento pode ser dito como perfeitamente ocluso, já o sistema acústico do 3° experimento, devido ao encaixe do molde com a orelha externa, não é perfeitamente vedado e é possível que haja um pequeno vazamento, e isto acaba resultando em uma pequena queda em baixa frequência, conforme observado na Figura 5.17.

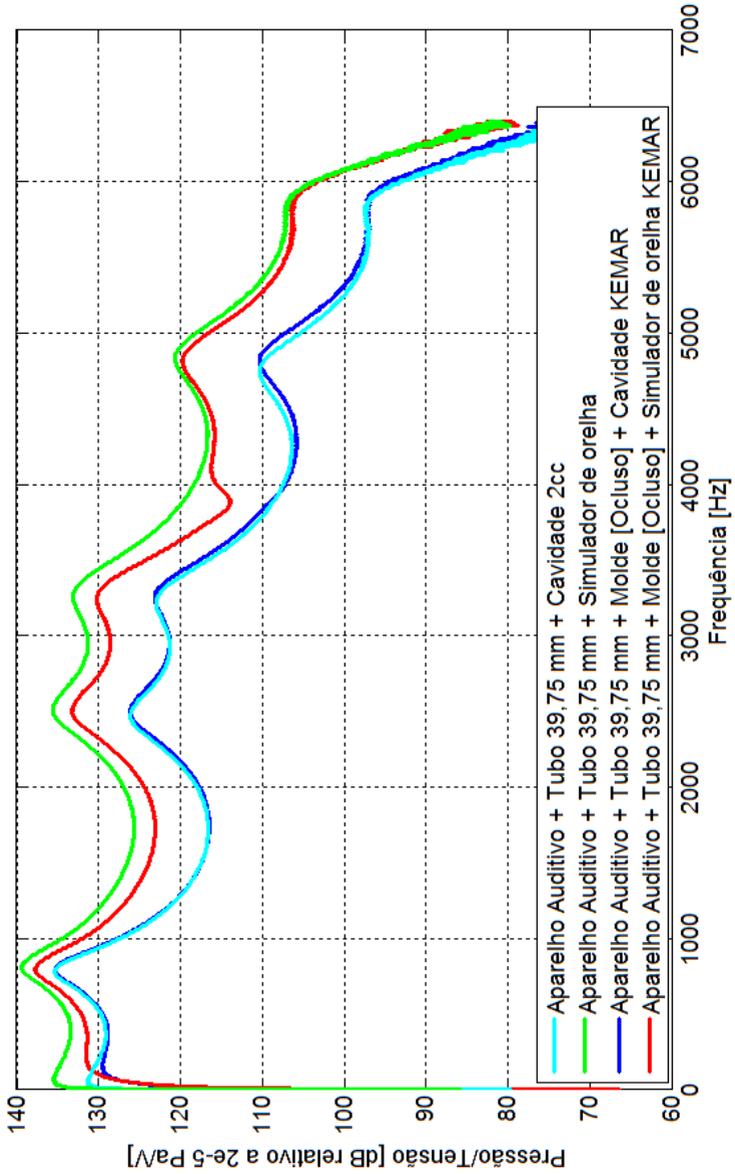


Figura 5.17: FRF Pressão/Tensão para os 4 experimentos realizados.

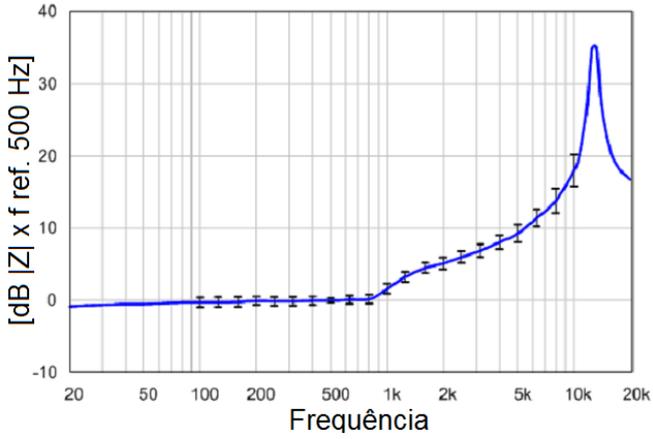


Figura 5.18: Impedância acústica do simulador de orelha (IEC 711), relativo ao nível em 500 Hz ($35,9 \text{ MPa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$), com as tolerâncias máximas (ANSI, S3.25-2009, 2009)

5.8 Comparação experimental (Acopladores x KEMAR) 107

Tabela 5.1: Impedância acústica do simulador de orelha (ANSI, S3.25-2009, 2009).

Frequência [Hz]	Impedância [MPa.s/m ³]	Impedância [dB ref. 1 MPa.s/m ³]	Tolerância [dB]
100	173,8	44,8	±0,7
125	139,6	42,9	±0,7
160	109,7	40,8	±0,7
200	89,1	39,0	±0,6
250	70,8	37,0	±0,6
315	56,2	35,0	±0,6
400	44,7	33,0	±0,6
500	35,9	31,1	±0,3
630	28,8	29,2	±0,6
800	22,9	27,2	±0,6
1000	21,6	26,7	±0,7
1250	20,9	26,4	±0,7
1600	18,8	25,5	±0,7
2000	16,2	24,2	±0,8
2500	14,3	23,1	±0,8
3150	12,6	22,0	±0,9
4000	11,4	21,1	±1,0
5000	10,5	20,4	±1,2
6300	10,6	20,5	±1,2
8000	10,9	20,8	±1,7
10000	14,3	23,1	±2,2

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

As análises apresentadas referentes ao MMT comprovam que é possível utilizar o método para a simulação do comportamento eletroacústico dos alto-falantes para aparelhos auditivos e que os resultados simulados apresentam boa concordância com os resultados experimentais. Utilizando-se a teoria apresentada no Capítulo 2 e no Anexo A, é possível simular grande parte das condições existentes para aparelhos auditivos.

Tendo a caracterização do alto-falante para aparelhos auditivos como objetivo do trabalho, o método que se propõe para alcançar tal objetivo utiliza o MMT em conjunto com o MDC e um ensaio experimental com o manequim KEMAR. Utilizando o MMT, será possível obter resultados de pressão sonora, velocidade de volume, corrente elétrica e tensão elétrica em conformidade com a condição real de uso de aparelhos auditivos. No entanto, para utilizar o MMT aplicado a aparelhos auditivos, é imprescindível o uso do MDC, que, conforme explanado na Subseção 2.2.5 e na Seção 3.1, implica em um simples procedimento experimental.

A análise dos critérios para utilização do MDC foi apresentada no Capítulo 3, e, a cada seção, puderam-se obter orientações para a aplicação do método para outros modelos de alto-falantes a serem analisados. As orientações foram constituídas com base na não-violação das

restrições do MDC. As condições que mais influenciarão um bom resultado do MDC são:

- Linearidade do alto-falante;
- Propagação em ondas planas;
- Influência do resistor na resposta do alto-falante;
- Definição das cargas para caracterização do alto-falante.

O modelo para simulação das condições de uso pode considerar aspectos como a impedância do tímpano, a geometria do canal auditivo e as dimensões do canal auditivo. Esta última característica pode representar uma mudança significativa na resposta do alto-falante, pois há uma diferença considerável entre as dimensões do canal auditivo de um adulto e de uma criança. Estas dimensões influenciarão diretamente as frequências de ressonância do canal auditivo e do alto-falante em conexão com o sistema de transmissão sonora. No geral, a impedância do tímpano e a geometria do canal auditivo terão influência maior somente quando analisadas, respectivamente, as regiões de baixas frequências e as regiões de frequência acima de 6,4 kHz.

Para concluir o método de caracterização do alto-falante, será necessário realizar a medição de THD com o manequim KEMAR. A utilização do manequim é fundamental, pois, conforme visto na Seção 4.1, o sistema acústico acoplado ao alto-falante pode influenciar significativamente nos resultados de THD do alto-falante. Se os valores de THD forem obtidos para um sistema acústico qualquer, os valores de THD não estarão em conformidade com a condição real de uso dos aparelhos auditivos. Verificando a Seção 5.8, sobre ensaios com acopladores, simuladores de orelha e KEMAR, os resultados indicam que o ensaio com o acoplador de 2 cm^3 e o ensaio com o KEMAR tiveram respostas bem semelhantes. No entanto, o ensaio de THD deve ser realizado com o KEMAR, pois efeitos referentes à ventilação e, até mesmo, ao encaixe do molde com a orelha externa irão influenciar os valores de THD, e o ensaio que utiliza somente o acoplador de 2 cm^3 não estaria apto a representar tais efeitos.

O método proposto é adequado para o ramo de pesquisa e desenvolvimento de aparelhos auditivos, pois obtém-se uma repetibilidade, a qual as medições em condições reais de uso não possibilitariam devido ao fator humano estar presente nos ensaios.

Neste trabalho, foi realizado um estudo de retroalimentação em aparelhos auditivos considerando dois tipos de ventilação e tal análise

julgou-se importante ser apresentada aqui, pois esta será fundamental para a continuidade do trabalho, conforme as sugestões para trabalhos futuros.

Quanto à análise de variabilidade da amostras de 5 elementos de um modelo de alto-falante, foi constatado que o comportamento das amostras pode ser significativamente alterado, pois um dos elementos da amostra apresentou um comportamento divergente da média. Desta forma, a caracterização de um modelo de alto-falante não pode ser realizada a partir de um único elemento, mas sim deve ser realizada para cada elemento que deseja-se obter a matriz de transferência. Devido a quantidade de elementos disponibilizada ser pequena não pôde-se apresentar uma análise mais apurada e recomenda-se para uma análise mais profunda que se utilize um número maior de elementos.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Análise de retroalimentação utilizando MMT e MEC

Conforme citado anteriormente, a retroalimentação é um fenômeno encontrado em aparelhos auditivos, e deve ser analisada a fim de se reduzirem seus efeitos. O estudo que se propõe, visa a analisar a retroalimentação em aparelhos auditivos e pode ser dividida em duas etapas.

A primeira etapa tem a finalidade de determinar a pressão sonora na saída da ventilação do molde e a segunda tem a finalidade de determinar a pressão sonora que retorna ao microfone do aparelho auditivo devido à existência da ventilação. Para se obter a pressão sonora na saída da ventilação, considerou-se um sistema acústico acoplado ao alto-falante que compreende o tubo de conexão, molde, ventilação, canal auditivo e o tímpano. O comportamento eletroacústico do alto-falante foi determinado por meio do MDC e as partes subsequentes até o tímpano, por meio das matrizes de transferência para propagação sonora em dutos (com perdas).

Tendo como base a primeira etapa, que foi realizada no presente trabalho, será possível analisar a radiação sonora da ventilação com o intuito de obter a pressão sonora próxima ao microfone do aparelho auditivo (segunda etapa). Para a realização da segunda etapa, sugere-se a utilização do Método do Elemento de Contorno (MEC).

Utilizando o MMT para simular diversos tipos de ventilação e obter a pressão sonora na saída da ventilação, e o MEC para determinar

o nível de pressão sonora que retorna ao microfone do aparelho auditivo, será possível determinar quais os tipos de ventilação que terão maior tendência para ocorrer a retroalimentação no aparelho auditivo e, a partir destes dados, otimizar o projeto de aparelhos auditivos.

Análise com medições em condições reais de uso

Os ensaios experimentais para condições reais de uso, ou seja, com o aparelho auditivo sendo utilizado por uma pessoa, são os ensaios que se espera que forneçam os resultados mais próximos da resposta que o próprio usuário estaria sujeito. Isto se deve ao ambiente de medição ser idêntico ao ambiente de uso do aparelho auditivo. O modelo de matrizes de transferência, utilizado neste trabalho, foi desenvolvido baseado nas informações das condições reais de uso de um aparelho auditivo. Sendo estas informações obtidas na literatura científica, espera-se que os resultados fornecidos pelo MMT estejam próximos com as condições reais de uso de um aparelho auditivo. No entanto, julga-se importante a comparação dos resultados numéricos (obtidos via MMT) com o resultado experimental em condições reais de uso, pois este último seria o experimento mais confiável considerando a perspectiva de um usuário de aparelho auditivo. Nesse caso, uma opção seria a utilização de sondas flexíveis para a medição da pressão sonora junto ao tímpano.

REFERÊNCIAS

AMOR, N. B.; KANOUN, O. Investigation to the use of vibration energy for supply of hearing aids. In: IEEE. *Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2007. IMTC 2007. IEEE*. Warsaw, 2007. p. 1–6.

ANSI. *Electroacoustical characteristics of hearing aids*. 1976.

ANSI. *Specification of hearing aid characteristics*. S3.22–2003, 2003.

ANSI. *For an occluded ear simulator*. S3.25–2009, 2009.

AUDIOLÓGICA, A. auditivos. Disponível em:
<<http://www.audiologica.com.br/>>. 2011. Acesso em: 17 abr. 2011.

BAKSHI, U.; GOYAL, S. *Feedback Control Systems*. India: Technical Publications, 2009.

BRÜEL & KJÆR. *Microphone handbook Vol. 1: Theory*. Naerum: Brüel & Kjær, 1996.

BRÜEL & KJÆR. *Wideband Ear Simulator for Telephonometry - Type 4195*. Naerum, 2010.

BURKHARD, M.; SACHS, R. Anthropometric manikin for acoustic research. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 58, p. 214, 1975.

CROCKER, M. *Handbook of acoustics*. New York: Wiley-Interscience, 1998.

DICRISTINA, J. Introduction to hearing aids and important design considerations; Disponível em: <<http://http://www.maxim-ic.com/>>. 2010. Acesso em: 15 ago. 2010.

DILLON, H. *Hearing aids*. New York: Thieme, 2001.

EGOLF, D. *A mathematical scheme for predicting the electro-acoustic frequency response of hearing aid receiver-earmold-ear systems*. Tese (Doutorado) — Purdue University, 1976.

EGOLF, D. Mathematical modeling of a probe-tube microphone. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 61, p. 200, 1977.

EGOLF, D.; LEONARD, R. Experimental scheme for analyzing the dynamic behavior of electroacoustic transducers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 62, p. 1013, 1977.

EGOLF, D.; NELSON, D.; III, H. H.; LARSON, V. Quantifying ear-canal geometry with multiple computer-assisted tomographic scans. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 93, p. 2809, 1993.

EGOLF, D.; TREE, D.; FETH, L. Mathematical predictions of electroacoustic frequency response of in situ hearing aids. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 63, p. 264, 1978.

FELS, J.; PAPROTNY, J.; FEICKERT, L. Ear canal impedances of children and adults - investigations with simulation and measurements. *19th International Congress on Acoustics*, 2007.

GERGES, S. N. Y. *Ruído: fundamentos e controle*. 2. ed. Florianópolis: NR, 2000. 696 p.

HAUGHTON, P. *Acoustics for audiologists*. USA: Emerald Group Pub Ltd, 2002.

HEARING AND EAR CARE CENTER. Disponível em: <<http://www.helpinguhear.com/>>. 2011. Acesso em: 17 jul. 2011.

KILLION, M. *Elmer Victor Carlson: A lifetime of achievement*. Reno, March 1992.

KNOWLES, E. *Microphones*. Itasca, 2000.

KNOWLES, E. *BK Series - Features*. Itasca, 2009.

KULKARNI, P. *Experimental formulation of four-pole parameters for analytical-experimental hybrid modeling of acoustic systems*. Dissertação (Mestrado) — University of Cincinnati, 2003.

LAMPTON, M. Transmission matrices in electroacoustics. *Acustica*, v. 39, p. 239–251, 1978.

MALTBY, M. *Principles of hearing aid audiology*. London: Whurr Publishers, 2002.

MARTIN, M.; GROVER, B. Current hearing-aid performance and the requirements of hearing-impaired persons. *J. Aud Eng. Soc.*, v. 24, p. 177–181, 1976.

MUNJAL, M. *Acoustics of ducts and mufflers with application to exhaust and ventilation system design*. New York: Wiley-Interscience, 1987.

PASCAL, J.; BOURGEADE, A.; LAGIER, M.; LEGROS, C. Linear and nonlinear model of the human middle ear. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 104, p. 1509, 1998.

PIERCE, A. *Acoustics: An introduction to its physical principles and applications*. New York: Acoustical Society of America, 1989. ISBN 0883186128.

RAICHEL, D. *The science and applications of acoustics*. New York: Springer-Verlag, 2000.

SANTOS, A. A.; VALDA, L. H. C.; LOPES, A. P.; LIMA, R. F. Análise de cavidades acústicas utilizando o método da matriz de transferência. *10º Encontro de Modelagem Computacional - UERJ*, p. 1–9, 2007.

SHIN, K.; HAMMOND, J. *Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers*. Great Britain: Wiley, 2008.

SIEMENS, A. group. Disponível em: <<http://hearing.siemens.com/br/>>. 2009. Acesso em: 1 out. 2009.

SOLAR EAR. Disponível em: <<http://solarear.com/br/>>. 2010. Acesso em: 15 ago. 2010.

- STINSON, M.; DAIGLE, G. Effect of handset proximity on hearing aid feedback. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 115, p. 1147, 2004.
- TEMKIN, S. *Elements of acoustics*. New York: John Wiley & Sons Inc, 1981. ISSN 0031-9228.
- THIEME, F. A. *Atenuação de ruído em silenciadores automotivos: análise numérica pelo método das matrizes de transferência e verificação experimental*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.
- VALENTE, M. *Hearing aids: standards, options, and limitations*. New York: Thieme Medical Pub, 2002.
- VALENTE, M.; HOSFORD-DUNN, H.; ROESER, R. *Audiology: treatment*. New York: Thieme Medical Pub, 2000.
- WALLACE JR, R.L. New kind of headphone receiver. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 57, p. S71, 1975.
- ZWISLOCKI, J. Analysis of the Middle-Ear Function. Part I: Input Impedance. *The journal of the acoustical society of America*, v. 34, p. 1514, 1962.

**ANEXO A - Instruções para cálculo das matrizes de
transferência**

O modelo numérico proposto no trabalho para a análise eletroacústica do alto-falante utiliza matrizes de transferência. As matrizes de transferência utilizadas no modelo se referem ao alto-falante e ao seu sistema de transmissão sonora (tubo curvado, tubos de conexão, molde, ventilação, canal auditivo e impedâncias de terminação). Para obter este modelo é necessário utilizar algumas regras para relacionar as matrizes de transferência (LAMPTON, 1978). A seguir, são apresentados os tipos de relações necessárias para a construção do modelo proposto.

A.1 LIGAÇÕES EM SÉRIE

A ligação em série é apresentada na Figura A.1 e os blocos são relacionados por uma simples multiplicação de matrizes conforme a Equação (A.1).

$$M_{serie} = M_1 M_2 = \begin{bmatrix} A_1 A_2 + B_1 C_2 & A_1 B_2 + B_1 D_2 \\ C_1 A_2 + D_1 C_2 & C_1 B_2 + D_1 D_2 \end{bmatrix} \quad (A.1)$$

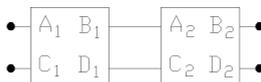


Figura A.1: Matrizes de transferência em série.

A.2 LIGAÇÕES EM SÉRIE (IMPEDÂNCIA)

A ligação em série para uma impedância definida qualquer, Z , é apresentada na Figura A.2 e a representação em matrizes de transferência é dada conforme a Equação (A.2).

$$\begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (A.2)$$

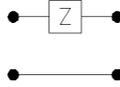


Figura A.2: Circuito com uma impedância qualquer em série.

A.3 LIGAÇÕES EM PARALELO (IMPEDÂNCIA)

A ligação em paralelo para uma impedância definida qualquer, Z , é apresentada na Figura A.3 e a representação em matrizes de transferência é dada conforme a Equação (A.3).

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

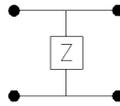


Figura A.3: Circuito com uma impedância qualquer em paralelo.

A.4 IMPEDÂNCIA DE TERMINAÇÃO

Para finalizar um circuito (Figura A.4) ou um ramo no modelo de matrizes de transferência utilizando uma impedância definida qualquer, Z , utiliza-se a Equação (A.4), e realiza-se uma simples multiplicação de matrizes, conforme apresentado abaixo:

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

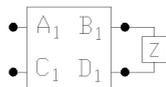


Figura A.4: Matriz de transferência com uma impedância de terminação.

A.5 LIGAÇÕES EM PARALELO (MATRIZ + IMP. DE TERM.)

A ligação em paralelo para uma matriz de transferência acoplada a uma impedância de terminação é apresentada na Figura A.5 e os blocos para estas ligações são relacionados da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} A_{eq} & B_{eq} \\ C_{eq} & D_{eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_r} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{bmatrix} \quad (A.5)$$

onde,

$$Z_r = \frac{A_2 Z + B_2}{C_2 Z + D_2} \quad (A.6)$$

onde Z_r representa a impedância de entrada do ramo que não está no curso direto do caminho de transmissão entre a entrada e a saída (EGOLF, 1976).

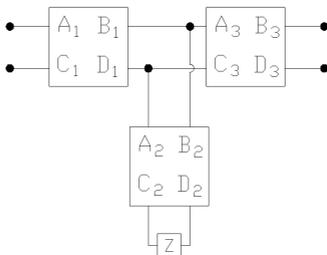


Figura A.5: Matrizes de transferência em paralelo.

ANEXO B - Circuitos elétricos para utilização no MMT

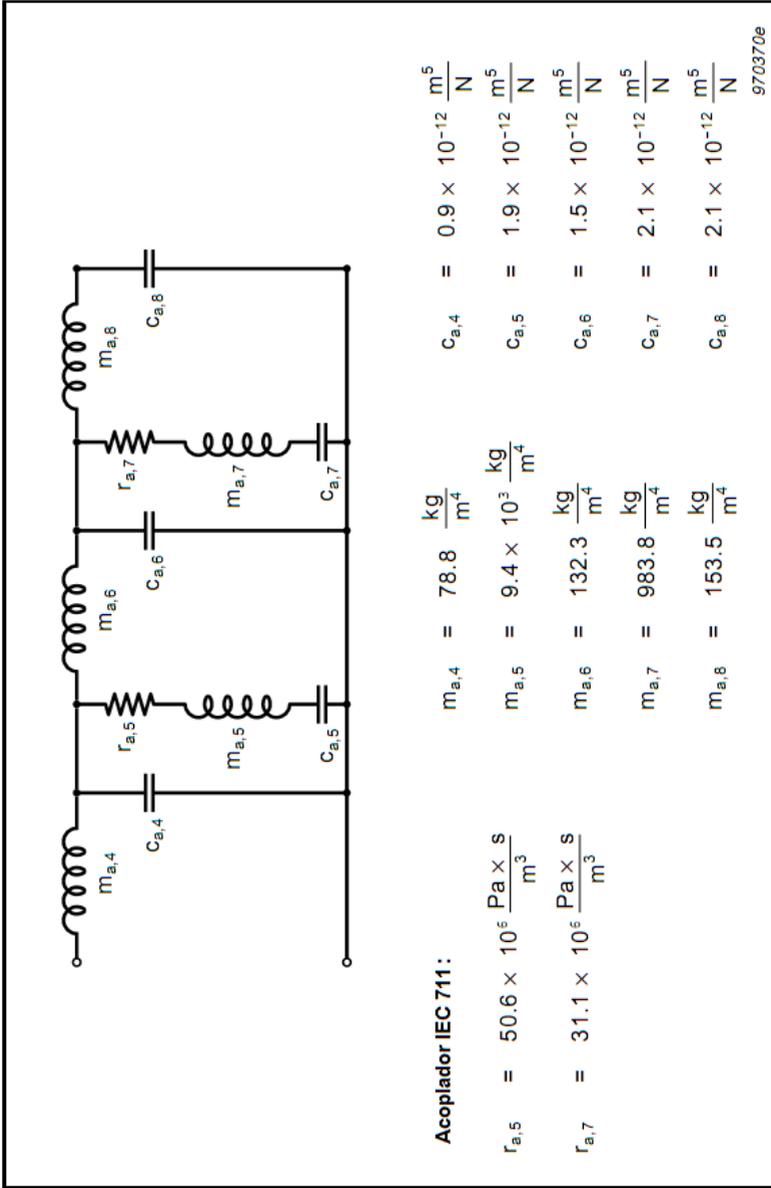


Figura B.1: Circuito elétrico equivalente representando a impedância acústica do simulador de orelha (BRÜEL & KJÆR, 2010).

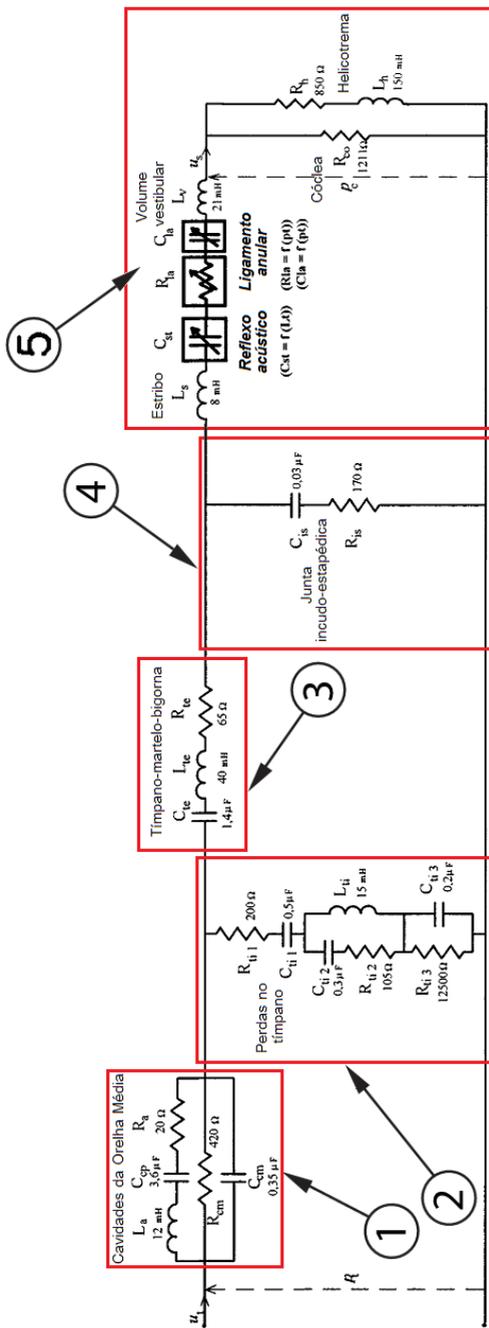
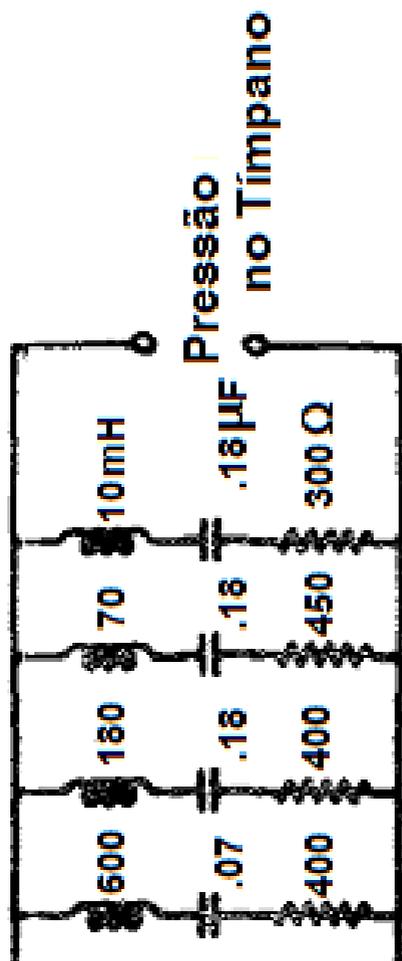


Figura B.2: Circuito elétrico equivalente representando a impedância acústica do tímpano, orelha média e interna (PASCAL et al., 1998).



Tímpano

Figura B.3: Circuito elétrico equivalente representando a impedância acústica do tímpano (WALLACE JR, R.L., 1975).

**ANEXO C - Algoritmos para processamento de dados e
execução de cálculos**

A seguir são apresentados os algoritmos utilizados para o processamento de dados e execução dos cálculos necessários ao MMT e MDC. Estes foram elaborados para utilização via o software MATLAB R2007a.

C.1 PROGRAMA PRINCIPAL - MMT

```
% Limpa a janela de comandos.
clc;
% Apaga todas variáveis existentes anteriormente.
clear all;
% Fecha todas as janelas de figura.
close all;

% N° da janela inicial dos gráficos a serem plotados.
pf=1;

%% Dados do problema.

% Vetor unitário considerado na função transferência do mic.
Mic=ones(6401,1);
% Vetor unitário considerado na função transferência do Amplif. A.
SA=ones(6401,1);
% Vetor unitário considerado na função transferência do Amplif. B.
SB=ones(6401,1);
% Vetor unitário de tensão;
E=ones(6401,1);

% Valor referente a compliância do diafragma do mic.
CL=2.83e-13;
% Valor referente a massa do diafragma do mic.
LL=896;
% Valor referente a resistência do diafragma do mic.
RL=56.2e6;

% Velocidade do som em m/s
c=340;
% Densidade em kg/m^3;
rho=1.18;
% Prandtl number;
Pr=0.71559;
% cp/cv
gamma=1.4;
% Absolute viscosity (kg/(m*s)) para 291.15 K
mu=1.827e-5;

% Raio em m (cavidade acoplador);
```

```
r1=0.01230/2;
% Raio em m (tubo 6.3 mm);
r2=0.001/2;
% Raio em m (tubo 17.20 mm);
r3=0.0013/2;

% Comprimento em m (cavidade acoplador);
L1=0.0168;
% Comprimento em m (tubo 6.3 mm);
L2=0.0063;
% Comprimento em m (tubo 17.20 mm);
L3=0.01720;

%% Transformação de unidades (David P. Egolf).

% Densidade em g/cm3;
rho=rho/1000;
% Velocidade do som em cm/s;
c=c*100;
% Absolute viscosity (g/(cm*s)) para 291.15 K
mu=mu*10;

% Raio em cm (cavidade acoplador);
an1=r1*100;
% Raio em cm (tubo 6.3 mm);
an2=r2*100;
% Raio em cm (tubo 17.20 mm);
an3=r3*100;

% Comprimento do tubo em cm (cavidade acoplador);
ln1=L1*100;
% Comprimento do tubo em cm (tubo 6.3 mm);
ln2=L2*100;
% Comprimento do tubo em cm (tubo 17.20 mm);
ln3=L3*100;

%% Região de frequência analisada.

% Frequência inicial
fmin=0;
% Frequência final
fmax=6400;
% Incremento de frequência
df=1;

% Vetor de frequência para plotar os gráficos.
f2=[fmin:df:fmax];

%% Carrega dados dos arquivos textos do Pulse.

[PLI_EI PLI_VrI PLII_EII PLII_VrII]=dadoscplx(1,2,3,4);
```

```

%% Obtenção dos parâmetros do alto-falante.

in=1;
for f=fmin:df:fmax;
    % Frequência angular
    w=2*pi*f;
    % Número de onda
    k=w/c;
    % Variável alpha.
    alpha=(-i*w*rho*Pr/mu)^0.5;
    % Variável beta.
    beta=(-i*w*rho/mu)^0.5;
    % Impedância do mic em N.s/m^5.
    ZL=1/(i*w*CL)+i*w*LL+RL;
    % Impedância do mic em dyn.s/cm^5.
    ZL=ZL*1e5/1e10;
    % Imp. tubo aberto; 0.05 = raio em cm.
    Zr(in)=rho*c*((k*0.05)^2/4+i*0.6133*k*0.05);

%% Obtenção das matrizes de transferência p/ os tubos.

Gamma_n=i*w/c*((1+2*(gamma-1)*(besselj(1,alpha*an1)/ ...
(alpha*an1*besselj(0,alpha*an1))))/(1-2*besselj(1,beta*an1)/ ...
(beta*an1*besselj(0,beta*an1))))^0.5;
Zn=rho*c/(pi*an1^2)*((1-2*besselj(1,beta*an1)/ ...
(beta*an1*besselj(0,beta*an1)))* ...
(1+2*(gamma-1)*besselj(1,alpha*an1) ...
/(alpha*an1*besselj(0,alpha*an1))))^-0.5;

A1=cosh(Gamma_n*ln1);
B1=Zn*sinh(Gamma_n*ln1);
C1=sinh(Gamma_n*ln1)/Zn;
D1=cosh(Gamma_n*ln1);

Gamma_n2=i*w/c*((1+2*(gamma-1)*(besselj(1,alpha*an2)/ ...
(alpha*an2*besselj(0,alpha*an2))))/(1-2*besselj(1,beta*an2)/ ...
(beta*an2*besselj(0,beta*an2))))^0.5;
Zn2=rho*c/(pi*an2^2)*((1-2*besselj(1,beta*an2)/ ...
(beta*an2*besselj(0,beta*an2)))* ...
(1+2*(gamma-1)*besselj(1,alpha*an2) ...
/(alpha*an2*besselj(0,alpha*an2))))^-0.5;

A2=cosh(Gamma_n2*ln2);
B2=Zn2*sinh(Gamma_n2*ln2);
C2=sinh(Gamma_n2*ln2)/Zn2;
D2=cosh(Gamma_n2*ln2);

Gamma_n3=i*w/c*((1+2*(gamma-1)*(besselj(1,alpha*an3)/ ...
(alpha*an3*besselj(0,alpha*an3))))/(1-2*besselj(1,beta*an3)/ ...
(beta*an3*besselj(0,beta*an3))))^0.5;
Zn3=rho*c/(pi*an3^2)*((1-2*besselj(1,beta*an3)/ ...
(beta*an3*besselj(0,beta*an3)))* ...

```

```

(1+2*(gamma-1)*besselj(1,alpha*an3) ...
/(alpha*an3*besselj(0,alpha*an3)))^-.5;

A3=cosh(Gamma_n3*ln3);
B3=Zn3*sinh(Gamma_n3*ln3);
C3=sinh(Gamma_n3*ln3)/Zn3;
D3=cosh(Gamma_n3*ln3);

%% Raios e comprimentos dos tubos p/ simulação;(Receiver→terminação)

% Número de tubos
nT=2;
% Raio em mm
rs=[1/2 12.3/2];
% Comprimento em mm
cs=[6.3 16.8];

%% mm → cm

% Raio em cm
rs=rs/10;
% Comprimento em cm
cs=cs/10;

%% Constrói matriz de transferência p/ simulação.

% Vetor de raios e comprimentos dos tubos.
medTubo=zeros(2*nT,1);
for ctd2=1:nT
    % Raio do tubo (cm).
    medTubo((2*ctd2-1)=rs(ctd2);
    % Comprimento do tubo (cm).
    medTubo((2*ctd2-1)+1)=cs(ctd2);
end

for ctd=1:nT
    anC=medTubo((2*ctd-1));
    lnC=medTubo((2*ctd-1)+1);
    Gamma_nC=i*w/c*(1+2*(gamma-1)*(besselj(1,alpha*anC)/ ...
(alpha*anC*besselj(0,alpha*anC)))/(1-2*besselj(1,beta*anC)/ ...
(beta*anC*besselj(0,beta*anC))))^-.5;
    ZnC=rho*c/(pi*anC^2)*((1-2*besselj(1,beta*anC)/ ...
(beta*anC*besselj(0,beta*anC)))* ...
(1+2*(gamma-1)*besselj(1,alpha*anC)/ ...
(alpha*anC*besselj(0,alpha*anC))))^-.5;
    eval([ T ,num2str(ctd+3), (1,1)=cosh(Gamma_nC*lnC); ]);
    eval([ T ,num2str(ctd+3), (1,2)=ZnC*sinh(Gamma_nC*lnC); ]);
    eval([ T ,num2str(ctd+3), (2,1)=sinh(Gamma_nC*lnC)/ZnC; ]);
    eval([ T ,num2str(ctd+3), (2,2)=cosh(Gamma_nC*lnC); ]);
end

%% Matrizes de transferência para os sistemas em questão.

```

```

% Matriz 4 pólos 1 (cavidade acoplador)
T1=[A1 B1;C1 D1];
% Matriz 4 pólos 2 (tubo 6.3 mm)
T2=[A2 B2;C2 D2];
% Matriz 4 pólos 3 (tubo 17.20 mm)
T3=[A3 B3;C3 D3];

% Sistema 1 (tubo 6.3 mm + cavidade acoplador) — Carga I
TI=T2*T1;
% Sistema 2 (tubo 17.20 mm + cavidade acoplador) — Carga II
TII=T3*T2*T1;

% Sistema simulado (tubo 6.3 mm + cavidade acoplador)
TIII=eye(2,2);
for ctd3=1:nT
    eval([ TIII=TIII*T ,num2str(ctd3+3), ; ]); % Sistema Tubos;
end

%% Obtenção da matriz de transferência do alto-falante.

AI=TI(1,1);
BI=TI(1,2);
CI=TI(2,1);
DI=TI(2,2);

AII=TII(1,1);
BII=TII(1,2);
CII=TII(2,1);
DII=TII(2,2);

TPE=Mic(in)*SA(in)*PLI_EI(in);
TPI=Mic(in)*SA(in)*PLI_VrI(in)/SB(in);

TPE2=Mic(in)*SA(in)*PLII_EII(in);
TPI2=Mic(in)*SA(in)*PLII_VrII(in)/SB(in);

AR1=ZL*Mic(in)*SA(in)*((CII*ZL+DII)/TPE-(CI*ZL+DI)/TPE2)/ ...
((AI*ZL+BI)*(CII*ZL+DII)-(AII*ZL+BII)*(CI*ZL+DI));
BR1=ZL*Mic(in)*SA(in)*((AI*ZL+BI)/TPE2-(AII*ZL+BII)/TPE)/ ...
((AI*ZL+BI)*(CII*ZL+DII)-(AII*ZL+BII)*(CI*ZL+DI));
CR1=ZL*(Mic(in)*SA(in)/(10*SB(in)))*((CII*ZL+DII)/TPI- ...
(CI*ZL+DI)/TPI2)/((AI*ZL+BI)*(CII*ZL+DII)-(AII*ZL+BII)* ...
(CI*ZL+DI));
DR1=ZL*(Mic(in)*SA(in)/(10*SB(in)))*((AI*ZL+BI)/TPI2- ...
(AII*ZL+BII)/TPI)/((AI*ZL+BI)*(CII*ZL+DII)-(AII*ZL+BII)* ...
(CI*ZL+DI));

%% Pressão no mic obtida com os modelos.

MXA=[AR1 BR1;CR1 DR1]*TIII;
pLI1(in)=(ZL/(MXA(1,1)*ZL+MXA(1,2)))*E(in);

```

```
        in=in+1;
end

%% Gráficos

figure(pf)
maximize;
plot(f2,20*log10(abs(pLI1)/2e-4), LineWidth ,2.5);
hold on;
grid on;
plot(f2,20*log10(abs(PLI_EI)/2e-4), --r , LineWidth ,2.5);
title( Pressão/Tensão - BK-21610 );
xlabel( Frequência [Hz] );
ylabel( Pressão/Tensão [dB rel. 2e-5 Pa/V] );
legend( Simulado , Experimental );
saveas(gcf, 1.fig );
saveas(gcf, 1.bmp );
```

C.2 PROGRAMA AUXILIAR 1 - ARMAZENAMENTO DOS DADOS EM VARIÁVEIS

```
function [PLI_EI PLI_VrI PLII_EII PLII_VrII]=dadoscplx(a,b,c,d)

cf=pwd;
BKfilenames = {
[cf \ num2str(a) .txt ]
    Group1
};
for (BKIndex=1:2:length(BKfilenames))
    Group1=GetPulseAsciiFile(char(BKfilenames(BKIndex)));
end

Group1=cell2mat(Group1);

BKfilenames2 = {
[cf \ num2str(b) .txt ]
    Group2
};
for (BKIndex2=1:2:length(BKfilenames2))
    Group2=GetPulseAsciiFile(char(BKfilenames2(BKIndex2)));
end

Group2=cell2mat(Group2);

BKfilenames3 = {
[cf \ num2str(c) .txt ]
    Group3
};
for (BKIndex3=1:2:length(BKfilenames3))
```

```
    Group3=GetPulseAsciiFile(char(BKFileNames3(BKIndex3)));
end

Group3=cell2mat(Group3);

BKFileNames4 = {
[cf \ num2str(d) .txt ]
    Group4
};
for (BKIndex4=1:2:length(BKFileNames4))
    Group4=GetPulseAsciiFile(char(BKFileNames4(BKIndex4)));
end

Group4=cell2mat(Group4);

%% Carga I
%%Pa para dyn/cm^2
PLI_EI=10*complex(Group1(1:6401,3),Group1(1:6401,4));
%%Pa para dyn/cm^2
PLI_VrI=10*complex(Group2(1:6401,3),Group2(1:6401,4));

%% Carga II
%%Pa para dyn/cm^2
PLII_EII=10*complex(Group3(1:6401,3),Group3(1:6401,4));
%%Pa para dyn/cm^2
PLII_VrII=10*complex(Group4(1:6401,3),Group4(1:6401,4));
```

C.3 PROGRAMA AUXILIAR 2 - LEITURA DOS DADOS [PULSE]

```
function [dataout]=GetPulseAsciiFile(BKFilename)
%This function read the output ascii file of PULSE Labshop.
%This function can also be used to read the output ascii file ...
%from "Bridge to Matlab" application of PULSE LabShop.
%If this is the case, you have to run the code called BKFiles.m ...
%created by Pulse LabShop.
%The output data is given in a cell array.
%
%Author:cristian.gutierrez@invisioheadsets.com
%20/02/2008 Copenhagen, Denmark.

warning( off , MATLAB:dispatcher:InexactMatch );

%preallocating memory
dataout = [];
stop = [];
count = 0;

% Read file
```

```
fid = fopen(BKFilename);
while isempty(stop) %repeat the read header
    tline = fgetl(fid);
    if tline == -feof(fid) %eof
        break
    end
    % Read header
    while isempty(stop)
        tline = fgetl(fid);
        if tline == -feof(fid) %eof
            break
        end
        stop = str2num(tline); %stops when it finds a number
    end
    % Read data
    data = [];
    count = count + 1;
    while ~isempty(stop)
        linedata = sscanf(tline, %f ); %read row of data
        data = [data; linedata]; %collect data
        dataout{count} = data; %assign data to cell
        tline = fgetl(fid);
        stop = str2num(tline); %stops when it finds a char
    end
end
fclose(fid);
```