



AVALIAÇÃO DE INTELIGIBILIDADE EM SALAS DE AULA DO ENSINO
FUNDAMENTAL A PARTIR DE RESPOSTAS IMPULSIVAS
BIAURICULARES OBTIDAS COM CABEÇA ARTIFICIAL DE DIMENSÕES
INFANTIS

Viviane Suzey Gomes de Melo

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientadores: Ricardo Eduardo Musafir
Roberto Aizik Tenenbaum

Rio de Janeiro
Dezembro de 2012

AVALIAÇÃO DE INTELIGIBILIDADE EM SALAS DE AULA DO ENSINO
FUNDAMENTAL A PARTIR DE RESPOSTAS IMPULSIVAS
BIAURICULARES OBTIDAS COM CABEÇA ARTIFICIAL DE DIMENSÕES
INFANTIS

Viviane Suzey Gomes de Melo

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Examinada por:

Prof. Ricardo Eduardo Musafir, D.Sc.

Prof. Jules Ghislain Slama, D.Sc.

Prof. Moyses Zindeluk, D.Sc.

Eng. Paulo Medeiros Massarani, D.Sc.

Prof. Michael Vorländer, Dr. rer. nat.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
DEZEMBRO DE 2012

Melo, Viviane Suzey Gomes de

Avaliação de Inteligibilidade em Salas de Aula do Ensino Fundamental a partir de Respostas Impulsivas Biauriculares Obtidas com Cabeça Artificial de Dimensões Infantis/Viviane Suzey Gomes de Melo. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XXI, 126 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Ricardo Eduardo Musafir

Roberto Aizik Tenenbaum

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Mecânica, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 86 – 91.

1. Inteligibilidade da palavra. 2. Auralização. 3. Respostas impulsivas biauriculares. I. Musafir, Ricardo Eduardo *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Mecânica. III. Título.

*Aos meus filhos Isabela e Miguel
de quem subtraí preciosos e
insubstituíveis momentos.*

Agradecimentos

Às agências de fomento CAPES, CNPq e FAPERJ que forneceram o suporte financeiro para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

Ao professor Ricardo Musafir pela orientação, paciência, boa vontade e confiança nos resultados deste trabalho.

Ao professor Roberto Tenenbaum pela orientação, disponibilidade e apoio para elucidar dúvidas e encontrar soluções na condução do trabalho desenvolvido. Além de escrever e enviar projetos, às agências de fomento, cujo foco se deu na compra de equipamentos necessários e fundamentais para realização deste trabalho de tese.

Ao Dr. Marco Nabuco, chefe do Laboratório de Ensaios Acústicos (LAENA), da Divisão de Acústica e Vibrações (DIAVI) do INMETRO, que sempre se mostrou disponível e interessado no desenvolvimento do trabalho aqui proposto, disponibilizando valioso material de apoio como relatórios técnicos, normas, gravações de listas de monossílabos, sugestões, equipamentos etc.

Ao professor Michael Vorländer, do Institut für Technische Akustik (ITA), Universidade de Aachen, Alemanha, que vem produzindo e testando cabeças artificiais infantis, pela colaboração e envio de uma cabeça artificial infantil para ser utilizada nos ensaios experimentais aqui propostos e pela disponibilidade em participar desta banca de tese de doutorado.

Ao pesquisador Swen Müller pela cessão do software *Monkey Forest* (MF), fundamental para realização dos ensaios experimentais aqui propostos, além do auxílio na realização de alguns ensaios executados no LAENA/DIAVI/INMETRO, e sua disponibilidade ímpar para colaborar com o trabalho de pesquisa, principalmente na realização de procedimentos de processamento de sinais realizados com o MF.

Aos colegas que trabalham na DIAVI pela excelente receptividade, todas as vezes que estive no LAENA, especialmente ao Dr. Paulo Massarani que colaborou com um curso introdutório para utilização do *Monkey Forest*, por ele adotado, e ao Dr. Zemar Soares por ter colaborado com o valioso ensaio da curva de resposta dos fones de ouvido, necessários para a condução dos testes de articulação virtuais aqui propostos.

Aos demais membros desta banca de tese de doutorado que se mostraram interessados e disponíveis para a ocasião.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

AValiação DE INTELIGIBILIDADE EM SALAS DE AULA DO ENSINO
FUNDAMENTAL A PARTIR DE RESPOSTAS IMPULSIVAS
BIAURICULARES OBTIDAS COM CABEÇA ARTIFICIAL DE DIMENSÕES
INFANTIS

Viviane Suzey Gomes de Melo

Dezembro/2012

Orientadores: Ricardo Eduardo Musafir
Roberto Aizik Tenenbaum

Programa: Engenharia Mecânica

Esta tese reporta uma nova metodologia para a avaliação de inteligibilidade da palavra em salas de aula do ensino fundamental. Propõe-se a avaliação da inteligibilidade a partir do levantamento das respostas impulsivas biauriculares nas salas. O sinal sonoro adotado é a varredura em frequência. Para a emissão do sinal sonoro é utilizado um orador artificial e como receptor uma cabeça artificial de dimensões infantis. É apresentado um procedimento de processamento de sinais para a geração das aurilizações (*auralizations*) a partir dos sinais medidos. As aurilizações são, em seguida, testadas em crianças por meio de fones de ouvido devidamente equalizados. Testes de articulação reais são conduzidos em salas de aula, para validação da técnica. Os resultados dos testes de articulação reais e virtuais são comparados e discutidos. Em uma das salas são também gravados os sinais com uma cabeça artificial de adulto visando a comparação com as gravações realizadas com cabeça artificial infantil. Verifica-se que os resultados obtidos com a cabeça artificial de adulto não são adequados à geração de aurilização para crianças, e que, a partir das respostas impulsivas biauriculares medidas com cabeça artificial infantil, é possível gerar aurilizações realísticas para condução de testes de articulação virtuais com crianças. Uma diferença média da ordem de 3% com respeito aos testes de articulação reais é observada. A técnica proposta prescinde da presença dos alunos em sala de aula.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

EVALUATION OF INTELLIGIBILITY IN ELEMENTARY CLASSROOMS
FROM THE BINAURAL IMPULSE RESPONSES OBTAINED WITH A
CHILDLIKE DUMMY HEAD

Viviane Suzey Gomes de Melo

December/2012

Advisors: Ricardo Eduardo Musafir
Roberto Aizik Tenenbaum

Department: Mechanical Engineering

This thesis reports a new methodology for the assessment of the speech intelligibility in elementary school classrooms. The intelligibility is assessed from the binaural impulse responses measured in the rooms. A sweep sine signal is adopted and an artificial speaker is used as sound source. Measurements are performed with a childlike dummy head. A signal processing procedure to generate auralizations from the measurements is described. These auralizations are applied to children through equalized headphones in order to carry out virtual articulation tests. Actual articulation tests are also conducted with the students in the classrooms to validate the technique. The main results of the actual and virtual articulation tests are presented and discussed. An adult dummy head is used to record the signals in one room, for comparative purposes. It is shown that the auralizations generated with the adult dummy head are not adequate to produce reliable auralizations for children. On the other hand, the auralizations obtained with the childlike dummy head were able to produce very good results for children, presenting an average difference of 3% between the actual and virtual articulation indexes. The technique can be applied without the presence of students in the classroom.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xvi
1 Introdução	1
1.1 Desenvolvimento do trabalho	5
2 Inteligibilidade da palavra em salas de aula	7
2.1 Testes de articulação	8
2.2 Índice de transmissão da fala — STI	9
2.2.1 Função de transferência de modulação — MTF	10
2.2.2 A obtenção do STI a partir da MTF	12
2.3 Outras métricas	14
3 A audição humana	20
3.1 Funções de transferência associadas à cabeça humana	20
3.2 Resposta impulsiva e função de transferência	24
3.3 Aurilização	25
3.4 Aurilização com cabeça artificial infantil	27
4 Metodologia	30
4.1 Etapas propostas	30
4.2 Instrumentação	33
4.3 Protocolos de ensaio	36
4.4 A escolha do sinal de excitação	37
4.5 Características direcionais do altofalante	38
4.6 Pré-ênfase	39
4.7 Preparação das listas de monossílabos	42
5 Ensaio em campo	45
5.1 Testes de articulação	46
5.2 Procedimento de correção dos ditados	47

5.3	Respostas impulsivas biauriculares	49
5.4	Ruído de fundo	49
5.5	Testes de articulação virtuais	50
6	Ensaio em laboratório	53
6.1	Processamento do ruído de fundo	53
6.2	Realidade virtual acústica	55
6.2.1	Gravação biauricular modificada	56
6.2.2	Aurilização	58
7	Resultados experimentais	60
7.1	Resultados dos testes de articulação reais	61
7.2	Comparação entre testes de articulação reais e virtuais com gravação biauricular modificada, a partir da CAI	64
7.3	Comparação entre testes de articulação reais e virtuais com auriliza- ção, a partir da CAI	69
7.4	Comparação entre testes de articulação reais e virtuais com gravação biauricular modificada, a partir da CAA	74
7.5	Comparação entre testes de articulação reais e virtuais com gravação biauricular modificada, a partir da CAA, aplicados a adultos	75
7.6	Testes adicionais para validação da metodologia proposta	78
7.7	STI e outros parâmetros acústicos medidos nas salas	81
8	Conclusões	83
8.1	Propostas para trabalhos futuros	85
	Referências Bibliográficas	86
A	Formulários para realização dos ensaios de campo	92
B	Protocolo de medição em salas	95
C	Resultados dos ensaios em campo	98
C.1	Testes de articulação reais, com crianças	98
C.1.1	Instituto de Educação de Nova Friburgo - IENF	99
C.1.2	Colégio Estadual Antônio Peçly - CEAP	111
C.2	Testes de articulação reais, com adultos	114
C.3	Testes de articulação virtuais, com crianças	114
C.3.1	Gravação biauricular modificada, a partir da CAI	114
C.3.2	Gravação biauricular modificada, a partir da CAA	115
C.3.3	Aurilização, a partir da CAI	116

C.4	Testes de articulação virtuais, com adultos	121
C.4.1	Gravação biauricular modificada, a partir da CAA	121
C.4.2	Aurilização, a partir da CAA	122
C.5	Testes de articulação virtuais a partir da CAI, com crianças que não participaram dos testes de articulação reais	124
C.5.1	Gravação biauricular modificada, a partir da CAI	124
C.5.2	Aurilização, a partir da CAI	125

Lista de Figuras

2.1	Gráfico indicativo da correlação existente entre o Índice de Articulação e a Definição [27].	9
2.2	Flutuações no envelope do sinal da fala e seu espectro normalizado, segundo Houtgast [11].	11
2.3	Correlação estreita entre o STI e o AL_{cons} [28].	14
2.4	Relação entre o peso k dado ao ruído de fundo na Eq. (2.23) e o coeficiente de determinação obtido com ajuste polinomial de grau três [9].	19
3.1	Esquema geral das funções de transferência. A Parte I relaciona a pressão sonora incidente com o sinal na entrada do canal auditivo, <i>dependente</i> da direção de incidência. A Parte II relaciona o sinal na entrada do canal auditivo ao sinal incidente no tímpano, <i>independente</i> da direção [41].	21
3.2	Sistema de coordenadas esféricas ao redor de uma cabeça humana, onde φ mede o azimute e θ mede a elevação [39].	22
3.3	Trajetórias distintas do som para os ouvidos esquerdo e direito.	22
3.4	Módulo de algumas das HRTFs, em dB, para elevação de 0^0 e azimute variando entre 0^0 e 180^0 , ouvido direito [44].	23
3.5	Módulo das HRTFs, em dB, para elevação de 0^0 e azimute entre 0^0 e 360^0 , ouvido direito, em um diagrama em cascata [45].	24
3.6	Sistema linear e invariante no tempo com duas entradas, $\mathbf{s}(t) = (s_1(t), s_2(t))$, e duas saídas, $\mathbf{y}(t) = (y_1(t), y_2(t))$, e seus correspondentes no domínio da frequência.	25
3.7	Exemplos de cabeças artificiais de diversos fabricantes [52].	27
3.8	Amplitude, em dB, das funções de transferência associadas à cabeça humana, para diversas direções, para um bebê de seis meses, uma criança em idade de pré-alfabetização e um adulto, na frequência de 3 kHz [23].	28

3.9	Amplitude, em dB, das funções de transferência associadas à cabeça humana, para diversas direções e frequências, de um bebê de seis meses, uma criança em idade de cinco anos e um adulto [23].	29
4.1	Orador artificial ITA (LAENA – INMETRO).	34
4.2	Cabeça artificial infantil ITA (LIDAV – UERJ).	34
4.3	Cabeça artificial de adulto COPPE (LIDAV – UERJ).	35
4.4	Detalhe da orelha de silicone da cabeça artificial de adulto com microfone inserido na entrada do canal (ouvido esquerdo).	35
4.5	Medidor de nível de pressão sonora, 01dB, Solo SLM.	35
4.6	a) Placa de comunicação de sinais, RME Hammerfall DSP Cardbus; e b) Laptop Lenovo Thinkpad com o software de processamento de sinais Monkey Forest.	36
4.7	Painéis frontal e traseiro do sistema de medição CMF22 Front End.	36
4.8	Impedância acústica e função de transferência das duas vias de alto-falantes do orador artificial.	40
4.9	Filtragem a ser aplicada ao sinal de entrada no orador e a resposta em frequência do mesmo com a pré-ênfase.	41
4.10	Módulo da função de transferência dos fones de ouvido utilizados.	41
5.1	Planta baixa de uma dada sala de aula (S07T301) com indicação das três posições (P1, P2 e P3) onde posicionou-se a cabeça artificial infantil durante os ensaios.	46
5.2	Ilustração dos testes de articulação conduzidos em sala de aula com emissão e gravação simultâneas.	47
5.3	Média de cinco gravações biauriculares do sweep em uma sala, para uma posição da cabeça artificial infantil. Observe que há duas cores, correspondendo aos dois canais de microfone.	49
5.4	Exemplo de gravação biauricular durante um teste de articulação conduzido em uma sala de aula (sala S07T301, Lista 07, posição 2).	50
6.1	Sinal, em dois canais, da gravação biauricular da lista 07 na sala 7 do IENF, na posição 2 da cabeça artificial infantil. Os picos correspondem aos monossílabos.	54
6.2	Trecho do sinal, entre o terceiro e o quarto monossílabos da lista 07, mostrado na Fig. 6.1, contendo unicamente ruído de fundo.	54
6.3	Sinal mostrado na Fig. 6.2 após a aplicação da janela Tukey.	55
6.4	Ruído de fundo extraído da gravação biauricular por meio do procedimento de corte, após a recomposição dos trechos como os da Fig. 6.3.	55

6.5	Sinal da gravação biauricular original da lista 07, na sala 7 do IENF, na posição 2 da cabeça artificial infantil.	56
6.6	Módulo da função de transferência dos fones de ouvido utilizados, dois canais.	57
6.7	Sinal resultante da convolução do sinal da Fig. 6.5 com a resposta impulsiva biauricular dos fones de ouvido.	57
6.8	Gravação biauricular original da varredura na sala S07T301, posição 2, da cabeça artificial infantil.	58
6.9	Resposta impulsiva biauricular da sala S07T301, posição 2, obtida após a deconvolução.	58
6.10	Resposta impulsiva convoluída com uma lista anecóica.	59
6.11	Sinal da Fig. 6.10 com o ruído de fundo adicionado.	59
7.1	Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 7, turma 301 do IENF.	61
7.2	Variação da inteligibilidade para os testes de articulação reais obtidos na sala 7, turma 301 do IENF.	63
7.3	Índices de articulação, reais e virtuais com gravação biauricular modificada, por aluno, extraídos da Tabela 7.4.	65
7.4	Índices de articulação, reais e virtuais com gravação biauricular modificada, por aluno, extraídos da Tabela 7.5.	66
7.5	Índices de articulação, reais e virtuais com gravação biauricular modificada, por aluno, extraídos da Tabela 7.6.	67
7.6	Índices de articulação, reais e virtuais, por aluno, extraídos da Tabela 7.7.	67
7.7	Índices de articulação reais e virtuais, com gravação biauricular modificada obtida pela CAI, para 4 salas de aula avaliadas, extraídos da Tabela 7.8.	68
7.8	Índices de articulação reais e virtuais com aurilização obtida a partir da CAI, para as listas 06 e 13 na sala 7, turma 301 do IENF.	70
7.9	Índices de articulação reais e virtuais com aurilização obtida com a CAI, para as listas 02, 03 e 05 na sala 5, turma 303 do IENF.	71
7.10	Índices de articulação reais e virtuais, com aurilização obtida com a CAI, para as listas 01, 02 e 05 na sala 6, turma 401 do IENF.	71
7.11	Índices de articulação reais e virtuais, com aurilização obtida com a CAI, para as listas 04, 08 e 15 na sala 15, turma 302 do IENF.	72
7.12	Índices de articulação reais e virtuais, com aurilização obtida com a CAI, para quatro salas avaliadas.	73

7.13	Índices de articulação reais e virtuais, a partir da gravação biauricular modificada com a CAA, por aluno, para a lista 08 na sala 7, turma 301 do IENF.	75
7.14	Índices de articulação, reais e virtuais, por adulto, extraídos da Tabela 7.17.	76
7.15	Índices de articulação, reais e virtuais, por adulto, extraídos da Tabela 7.18.	77
7.16	Índices de articulação reais e virtuais, a partir da aurilização com a CAI, para as 4 salas avaliadas, com as 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.	80
C.1	Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 4, turma 402 do IENF.	99
C.2	Variação da inteligibilidade para os testes de articulação reais na sala 4, turma 402 do IENF.	100
C.3	Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 5, turma 303 do IENF.	100
C.4	Variação da inteligibilidade para os testes de articulação reais na sala 5, turma 303 do IENF.	101
C.5	Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 6, turma 401 do IENF.	102
C.6	Variação da inteligibilidade para os testes de articulação reais na sala 6, turma 401 do IENF.	102
C.7	Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 7, turma 301 do IENF.	103
C.8	Variação da inteligibilidade para os testes de articulação reais obtidos na sala 7, turma 301 do IENF.	104
C.9	Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 9, turma 503 do IENF.	105
C.10	Variação da inteligibilidade para os testes de articulação reais na sala 9, turma 503 do IENF.	106
C.11	Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 10, turma 502 do IENF.	106
C.12	Variação da inteligibilidade para os testes de articulação reais na sala 10, turma 502 do IENF.	107
C.13	Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 11, turma 501 do IENF.	108
C.14	Variação da inteligibilidade para os testes de articulação reais na sala 11, turma 501 do IENF.	109

C.15 Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 15, turma 302 do IENF.	109
C.16 Variação da inteligibilidade para os testes de articulação reais na sala 15, turma 302 do IENF.	110
C.17 Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 1, turma 601 do CEAP.	111
C.18 Variação da inteligibilidade para os testes de articulação reais na sala 1, turma 601 do CEAP.	111
C.19 Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 5, turma 605 do CEAP.	112
C.20 Variação da Inteligibilidade para os Testes de Articulação Reais na sala 5, turma 605, do CEAP.	113
C.21 Índices de articulação, reais e virtuais, por adulto, fornecidos na Tabela C.32.	122
C.22 Índices de articulação, reais e virtuais, por adulto, fornecidos na Tabela C.36.	123

Lista de Tabelas

4.1	Listas (1 a 8) de vinte monossílabos elaboradas para condução dos testes de articulação em salas de aula do ensino fundamental.	42
4.2	Listas (9 a 15) de vinte monossílabos elaboradas para condução dos testes de articulação em salas de aula do ensino fundamental.	43
4.3	Lista com quatro monossílabos para familiarizar os alunos com o ditado.	44
5.1	Exemplos de erros de ortografia ignorados na correção dos ditados.	48
5.2	Níveis equivalentes de ruído, medidos nas dez salas de aula avaliadas.	50
7.1	Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 7, turma 301 do IENF.	62
7.2	Resultados dos índices de articulação reais (%), obtidos nas dez salas de aula avaliadas.	63
7.3	Resultado das máximas diferenças (D. Máx.) percentuais entre listas, por sala, para todas as dez salas ensaiadas.	64
7.4	Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAI, para a lista 07 na sala 7, turma 301 do IENF.	65
7.5	Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAI, para a lista 04 na sala 5, turma 303 do IENF.	66
7.6	Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAI, para a lista 04 na sala 6, turma 401 do IENF.	66
7.7	Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAI, para a lista 13 na sala 15, turma 302 do IENF.	67
7.8	Resumo dos resultados dos testes de articulação reais e virtuais, a partir da gravação biauricular modificada com a CAI, em quatro salas de aula avaliadas.	68

7.9	Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAI, para as listas 06 e 13 na sala 7, turma 301 do IENF.	70
7.10	Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAI, para as listas 02, 03 e 05 na sala 5, turma 303 do IENF.	70
7.11	Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAI, para as listas 01, 02 e 05 na sala 6, turma 401 do IENF.	71
7.12	Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAI, para as listas 04, 08 e 15 na sala 15, turma 302 do IENF.	72
7.13	Resultados médios dos testes de articulação reais e virtuais, a partir da aurilização com a CAI, em quatro salas de aula avaliadas.	72
7.14	Resumo das diferenças entre as médias dos índices de articulação para as listas utilizadas nos testes de articulação reais realizados em quatro salas ensaiadas.	73
7.15	Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAA, para a lista 08 na sala 7, turma 301 do IENF.	74
7.16	Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 7 do IENF, com 4 adultos.	75
7.17	Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAA, para a lista 08 na sala 7 do IENF, com 4 adultos.	76
7.18	Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAA, para as listas 06, 07 e 13 na sala 7 do IENF, com adultos.	77
7.19	Resultados dos testes de articulação virtuais a partir das aurilizações, obtidos para a sala 5 do IENF, com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.	78
7.20	Resultados dos testes de articulação virtuais a partir das aurilizações, obtidos para a sala 7 do IENF, com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.	78
7.21	Resultados dos testes de articulação virtuais a partir das aurilizações, obtidos para a sala 15 do IENF, com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.	79

7.22	Resultados dos testes de articulação virtuais a partir das aurilizações, obtidos para a sala 1 do CEAP, com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.	79
7.23	Resumo dos resultados dos testes de articulação reais e virtuais com aurilização, para as mesmas listas de monossílabos, obtidos com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.	79
7.24	Resumo das diferenças entre as médias dos índices de articulação das listas utilizadas nos testes de articulação reais realizados em quatro salas.	80
7.25	Resultados de alguns parâmetros acústicos, para as dez salas de aula ensaiadas, juntamente com os índices de articulação (AI), obtidos para as mesmas salas.	81
C.1	Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 4, turma 402 do IENF.	99
C.2	Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 5, turma 303 do IENF.	101
C.3	Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 6, turma 401 do IENF.	103
C.4	Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 7, turma 301 do IENF.	104
C.5	Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 9, turma 503 do IENF.	105
C.6	Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 10, turma 502 do IENF.	107
C.7	Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 11, turma 501 do IENF.	108
C.8	Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 15, turma 302 do IENF.	110
C.9	Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 1, turma 601 do CEAP.	112
C.10	Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 5, turma 605 do CEAP.	113
C.11	Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 7 do IENF, com 4 adultos.	114
C.12	Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAI, para a lista 04 na sala 5, turma 303 do IENF.	114

C.13 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAI, para a lista 04 na sala 6, turma 401 do IENF.	115
C.14 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAI, para a lista 07 na sala 7, turma 301 do IENF.	115
C.15 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAI, para a lista 13 na sala 15, turma 302 do IENF.	115
C.16 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAA, para a lista 08 na sala 7, turma 301 do IENF.	116
C.17 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da auri- lização utilizando a CAI, para a lista 02 na sala 5, turma 303 do IENF.	116
C.18 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da au- rilização utilizando a CAI, para a lista 03 na sala 5, turma 303 do IENF.	117
C.19 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da au- rilização utilizando a CAI, para a lista 05 na sala 5, turma 303 do IENF.	117
C.20 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da auri- lização utilizando a CAI, para as listas 02, 03 e 05 na sala 5, turma 303 do IENF.	117
C.21 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da au- rilização utilizando a CAI, para a lista 01 na sala 6, turma 401 do IENF.	118
C.22 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da au- rilização utilizando a CAI, para a lista 02 na sala 6, turma 401 do IENF.	118
C.23 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da au- rilização utilizando a CAI, para a lista 05 na sala 6, turma 401 do IENF.	118
C.24 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da auri- lização utilizando a CAI, para as listas 01, 02 e 05 na sala 6, turma 401 do IENF.	119
C.25 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da au- rilização utilizando a CAI, para a lista 06 na sala 7, turma 301 do IENF.	119

C.26 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAI, para a lista 13 na sala 7, turma 301 do IENF.	119
C.27 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAI, para as listas 06 e 13 na sala 7, turma 301 do IENF.	120
C.28 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAI, para a lista 04 na sala 15, turma 302 do IENF.	120
C.29 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAI, para a lista 08 na sala 15, turma 302 do IENF.	120
C.30 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAI, para a lista 15 na sala 15, turma 302 do IENF.	120
C.31 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAI, para as listas 04, 08 e 15 na sala 15, turma 302 do IENF.	121
C.32 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAA, para a lista 08 na sala 7 do IENF, com 4 adultos.	121
C.33 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAA, para a lista 06 na sala 7 do IENF, com adultos.	122
C.34 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAA, para a lista 07 na sala 7 do IENF, com adultos.	122
C.35 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAA, para a lista 13 na sala 7 do IENF, com adultos.	123
C.36 Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAA, para as listas 06, 07 e 13 na sala 7 do IENF, com adultos.	123
C.37 Resultados dos testes de articulação virtuais a partir das gravações biauriculares modificadas, obtidos para a sala 15 do IENF, com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.	124
C.38 Resultados dos testes de articulação virtuais a partir das gravações biauriculares modificadas, obtidos para a sala 1 do CEAP, com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.	124

C.39	Resumo dos resultados dos testes de articulação reais e virtuais com gravação biauricular modificada, para as mesmas listas de monossílabos, obtidos com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.	125
C.40	Resultados dos testes de articulação virtuais a partir das aurilizações, obtidos para a sala 5 do IENF, com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.	125
C.41	Resultados dos testes de articulação virtuais a partir das aurilizações, obtidos para a sala 7 do IENF, com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.	125
C.42	Resultados dos testes de articulação virtuais a partir das aurilizações, obtidos para a sala 15 do IENF, com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.	126
C.43	Resultados dos testes de articulação virtuais a partir das aurilizações, obtidos para a sala 1 do CEAP, com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.	126
C.44	Resumo dos resultados dos testes de articulação reais e virtuais com aurilização, para as mesmas listas de monossílabos, obtidos com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.	126

Capítulo 1

Introdução

A boa comunicação oral é uma preocupação antiga do ser humano. Locutor e ouvinte dependem de diversos fatores acústicos para que um compreenda o outro. O som emitido pelo orador pode sofrer várias modificações antes de atingir o ouvinte, de modo a não ser perfeitamente compreendido por este. O primeiro legado escrito que temos dessa preocupação é o do arquiteto e engenheiro romano Vitruvius (*Marcus Vitruvius Pollio, Séc. I a.C.*) que deixou publicados os dez tomos de *De Architectura*, onde registrou, além de diversos conceitos da arquitetura e engenharia da época, uma notável compreensão da acústica de teatros, como indica Hunt [1] e Vitruvius [2].

A qualidade acústica de uma sala depende de sua utilização principal. Salas destinadas à apreciação da música devem possuir alguma reverberação e alguma difusão sonora de modo a propiciar ao ouvinte uma sensação de envolvimento. Em teatros, assim como em auditórios, a reverberação deve ser menor de modo a favorecer a maior compreensão da palavra. Já em plantas industriais, toda atenção deve ser dada à minimização do nível sonoro a que o trabalhador é exposto, bem como à possibilidade de sinais ou avisos de cunho emergencial poderem ser ouvidos claramente.

Quando proporcionar a boa comunicação verbal é o objetivo fundamental de uma sala — como é o caso em teatros, auditórios e salas de aula — o parâmetro que melhor caracteriza sua qualidade acústica é a *inteligibilidade da palavra*. Quanto maior a inteligibilidade da palavra, mais facilmente se ouvirá o que uma pessoa diz em um desses ambientes. Dois fatores influenciam de modo preponderante na inteligibilidade: a acústica interna da sala, ou seja, seus parâmetros acústicos, como o tempo de reverberação e a definição, entre vários outros discutidos mais adiante neste trabalho; e o ruído de fundo presente, como o ruído externo que penetra no recinto ou o ruído de pessoas ou equipamentos em seu interior.

É bem conhecido o fato de que a inteligibilidade da palavra em salas de aula, principalmente naquelas utilizadas para o ensino fundamental, é fator preponderante na qualidade e eficácia do aprendizado. Alguns autores, como Seep [3] e Costa e

Querido [4], consideram que a acústica da sala de aula seria o principal fator de caráter global — ou seja, não aplicável a um único aluno em particular — responsável pelo assim chamado *analfabetismo funcional*, que caracteriza-se pela inabilidade do aluno em ler e interpretar adequadamente um texto de seu nível escolar, como argumentam Dreossi e Momensohn-Santos [5].

Diversos autores têm se debruçado sobre esse problema, como Bradley et al. [6], Yang e Bradley [7], Bradley [8] e Medrado [9]. Contudo, os estudos realizados sobre o tema nos chamados países do primeiro mundo, concentram-se mais nos aspectos da acústica *interna* da sala, uma vez que em países de clima temperado ou frio, a influência do ruído externo sobre a acústica da sala é pequena. Uma gama variada de métricas, buscando avaliar a inteligibilidade da palavra foram surgindo ao longo do Século XX, como a *Definição*, D_{50} , e o *Fator de clareza* (para a palavra), C_{50} , entre outros.

Contudo, não é simples avaliar a inteligibilidade da palavra em salas de aula a partir de parâmetros que envolvem exclusivamente a resposta impulsiva monoauricular da sala. Por essa razão algumas métricas, como o U_{50} , concebido por Bradley et al. [6], e o U_{50}^k , proposto por Medrado [10], discutidas mais adiante, prevêem a influência do ruído de fundo no ambiente.

No início da década de 1970, Houtgast e Steeneken [11] propuseram uma nova métrica para a avaliação da inteligibilidade da palavra, baseada em um conceito novo, o STI (*Speech Transmission Index*), ou Índice de Transmissão da Fala, que leva em consideração o efeito do ruído de fundo presente no ambiente e é baseada na MTF (*Modulation Transfer Function*), ou Função de Transferência de Modulação. A sala é interpretada como um sistema de transmissão acústico que suaviza o envelope do sinal da fala. O STI, de uma certa maneira se propõe a medir a capacidade da sala em preservar a nitidez do sinal sonoro. O mesmo tem sido objeto de norma [12, 13] e de estudo de diversos autores, entre os quais citamos Schroeder [14] e Müller [15, 16].

Em 1986, Bradley [8] publicou estudos sobre testes de inteligibilidade da palavra realizados em dez salas de aula. Na ocasião, também foram medidos o ruído de fundo, em bandas de oitava, o tempo de decaimento inicial, e tempos de reverberação, entre outros parâmetros acústicos. Diversas razões entre energias útil e prejudicial, por banda de oitava, foram calculadas, assim como o índice de transmissão da fala. As inter-relações dessas medições foram consideradas para avaliar quais eram as mais adequadas para salas de aula e as melhores métricas para avaliação da inteligibilidade da palavra foram identificadas. A partir desses resultados metas para o projeto acústico ideal de salas de aula foram sugeridas.

Em seguida, Bradley [17] publicou estudos sobre métricas para avaliação da inteligibilidade da palavra, onde três diferentes tipos de medições acústicas foram consideradas como possíveis preditores da inteligibilidade em salas de tamanhos e

condições acústicas variados. Estes incluíram medições da relação sinal/ruído, o índice de transmissão da fala, e razões de energias sonoras útil e prejudicial, obtidas a partir de razões de energias inicial e tardia. O ruído de fundo também foi levado em conta. O trabalho observa que todos os tipos de medições consideradas apresentaram precisão similar. Contudo, curiosamente o autor conclui que o limite de 80 ms para a razão de energias útil e prejudicial conduziu a resultados mais precisos.

Na década de 1990, Bradley et al. [6], utilizando campos sonoros simulados computacionalmente, criaram uma série de combinações de propriedades acústicas de uma sala e do ruído de fundo presente, permitindo o estudo da influência de cada fator. Os parâmetros citados acima, como o U_{50} , foram testados e validados como razoáveis métricas para a inteligibilidade.

Fazendo uso dos mesmos, Bistafa e Bradley [18] estimaram também tempos de reverberação ótimos e níveis máximos de ruído de fundo para garantir a qualidade acústica de uma sala de aula.

Em 2003 Bradley et al. [19] apresentaram resultados de novos estudos baseados em testes de inteligibilidade da palavra em campos sonoros *simulados* e respostas impulsivas medidas em salas utilizadas para comunicação da palavra. Os resultados dos testes de inteligibilidade confirmam a importância das primeiras reflexões para a obtenção de boas condições de inteligibilidade em salas. Mostrou-se que a adição de reflexões iniciais aumenta a relação sinal/ruído facilitando a inteligibilidade da palavra para ouvintes com ou sem deficiência auditiva. Os autores afirmam que o som direto pode ser insuficiente para garantir a inteligibilidade, que depende, portanto, da presença das primeiras reflexões. As análises feitas a partir das respostas impulsivas medidas indicaram que as primeiras reflexões podem incrementar a relação sinal/ruído em até 9 dB.

Em 2008, Sato e Bradley [20] realizaram estudos para avaliação da inteligibilidade da palavra em salas de aula. Foram feitas medições acústicas detalhadas em 41 salas de aula do ensino fundamental. Os autores descrevem características acústicas dos ambientes de salas de aula e do ruído de fundo para 27 salas de aula retangulares, dentre as 41 salas avaliadas. O objetivo do trabalho foi entender como melhorar a comunicação verbal entre professores e alunos. Eles constataram que, em média, os alunos estão expostos a 60,4 dB(A) para a fala do professor, 49,1 dB(A) de ruído de fundo, e uma relação sinal/ruído média de 11 dB(A) durante as atividades de ensino. O tempo de reverberação médio nas salas de aula ocupadas foi de 0,41 s, 10% menor do que o das salas desocupadas.

Cumpre notar que as condições acústicas nas salas de aula de Ottawa, Canadá, onde foram realizadas as medições do trabalho de Sato e Bradley [20], são bem distintas das condições encontradas nas escolas públicas brasileiras, particularmente no que diz respeito ao ruído de fundo. Não é possível, portanto, transportar as

condições acústicas encontradas em escolas de países como o Canadá para as escolas do Brasil.

Em um outro estudo, Bradley e Sato [21] descrevem os resultados das medições acústicas e testes de inteligibilidade da palavra em salas de aula do ensino fundamental. Os testes foram realizados em 41 salas de aula em 12 escolas diferentes, divididas entre as séries 1, 3 e 6 (alunos de 6, 8 e 11 anos). Testes de inteligibilidade da palavra foram realizados com alunos em suas salas de aula regulares. A média dos resultados da inteligibilidade da palavra mostrou-se relacionada com o nível escolar dos alunos e a relação sinal/ruído. Os autores concluem que uma relação sinal/ruído de 15 dB não é adequada para crianças mais jovens. Esses resultados são utilizados como uma base para critério de acústica ideal em salas de aula do ensino fundamental.

Nábělek e Pickett [22] identificaram, em 1974, as vantagens da audição biauricular mostrando que testes de audição monoauriculares não são representativos das condições normais da audição humana em salas. Baseados nesse princípio, Yang e Bradley [7], em 2009, reportam medições de inteligibilidade da palavra em salas de aula do ensino fundamental através de testes biauriculares gravados em salas simuladas e ouvidas por alunos com fones de ouvido. Os ouvintes incluíram crianças de 6, 8 e 11 anos, assim como adultos. Os resultados de inteligibilidade para crianças pequenas mostram se beneficiar da adição de primeiras reflexões do som da fala tal como ocorre como ouvintes adultos. Os autores afirmam que os resultados podem ser utilizados para ajudar na determinação de condições ideais para comunicação da palavra em salas de aula do ensino fundamental.

Farnetani et al. [23] apresentaram, em 2007, uma pesquisa sobre avaliação de inteligibilidade da língua italiana em salas de aula de duas escolas primárias onde, pela primeira vez, foi utilizada uma cabeça artificial infantil para gravar testes de articulação e os resultados foram comparados com gravações feitas com cabeça artificial de adulto.

Uma das propostas deste trabalho é fazer o levantamento das respostas impulsivas biauriculares em salas de aula do ensino fundamental, com a ajuda de uma cabeça artificial, para a avaliação da inteligibilidade da palavra na sala. Todavia, como foi demonstrado por Fels [24], a forma como uma criança de, digamos, cerca de cinco anos ouve é bastante diferente daquela de um adulto. Portanto, para fazer a avaliação da inteligibilidade em salas de aula de ensino fundamental — tema central deste trabalho — utiliza-se uma cabeça artificial com dimensões antropométricas infantis, desenvolvida nos padrões descritos por Fels e Fingerhuth [25].

1.1 Desenvolvimento do trabalho

No Capítulo 2 são apresentados os conceitos fundamentais relativos à inteligibilidade da palavra. São discutidos os requisitos para a correta condução de testes de articulação, os procedimentos necessários à obtenção do STI e sua aplicação na avaliação da inteligibilidade bem como a aplicação de outras métricas presentes na literatura.

A audição humana e as funções de transferência associadas à cabeça humana são abordadas no Capítulo 3. Ali, discute-se a aurilização¹ de salas, num dado ponto da mesma, e, principalmente, as importantes diferenças entre as funções de transferência de uma cabeça de adulto e de uma cabeça infantil.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia proposta na pesquisa, visando a avaliação da inteligibilidade da palavra em salas de aula do ensino fundamental. Diversos tópicos são abordados na metodologia, tais como: a medição *in situ* dos índices de articulação nas salas, através de testes de articulação; o levantamento das respostas impulsivas biauriculares em salas com cabeça artificial infantil; a geração, em laboratório, das gravações biauriculares modificadas e aurilizações; e a aplicação das gravações biauriculares modificadas e aurilizações em testes de articulação virtuais. Também são discutidos os procedimentos adotados para preparação dos experimentos, onde diversos aspectos são apresentados: o protocolo de ensaio; a instrumentação utilizada; as características direcionais dos altofalantes; a escolha do sinal de excitação; a utilização de pré-ênfase para a correção de não-linearidades; a obtenção das respostas impulsivas biauriculares e outros aspectos do processamento de sinais; e uma discussão sobre as listas de palavras monossilábicas utilizadas na condução dos testes de articulação, tanto reais como virtuais.

O Capítulo 5 trata dos ensaios em campo conduzidos nas salas de aula avaliadas. Detalhes sobre os testes de articulação realizados; obtenção das respostas impulsivas biauriculares; e o tratamento e processamento do ruído de fundo, são apresentados, bem como os testes de articulação virtuais.

No Capítulo 6, apresenta-se o detalhamento dos ensaios em laboratório. As diversas etapas, incluindo processamento do ruído de fundo; e geração das gravações biauriculares modificadas e aurilizações, são apresentadas e discutidas.

¹Os dicionários consultados (Antônio Houais e Aurélio Buarque de Holanda) não registram a forma *aurilizar* mas registra o antepositivo *auri*, referente a orelha, ouvido. Aurilizar, portanto, significaria a geração de som biauricular. Propomos aqui o termo *aurilizar* como a alternativa mais adequada ao vulgarmente utilizado termo *auralizar*, que parece ser uma tradução equivocada do inglês *auralization*. Outra opção seria *auriculização*.

O Capítulo 7 trata dos resultados experimentais. Nele estão os principais resultados obtidos e sua análise, apresentando os índices de articulação dos testes reais e virtuais em diversas salas de aula do ensino fundamental em duas escolas públicas localizadas no interior do estado do Rio de Janeiro. São apresentados também os resultados das diversas métricas calculadas a partir dos levantamentos das respostas impulsivas biauriculares.

Por fim, o Capítulo 8 apresenta as conclusões do trabalho.

Capítulo 2

Inteligibilidade da palavra em salas de aula

Em 1947 os pesquisadores French e Steinberg [26], a fim de avaliar a inteligibilidade da palavra em salas, criaram o *Índice de Articulação*, AI, obtido a partir de *testes de articulação*. Um teste de articulação, geralmente, consiste em se apresentar ditados constituídos de monossílabos que deverão ser anotados pelos presentes no recinto. A correção desse ditado fornecerá um valor médio percentual de acertos que constituirá a inteligibilidade da palavra na sala — o AI.

Em particular, nas salas de aula do ensino fundamental a inteligibilidade da palavra é um dos fatores determinantes para o aprendizado: criança que não ouve perfeitamente o que o(a) professor(a) diz é séria candidata a inchar as estatísticas de não-aprendizado.

Diversos parâmetros de qualidade acústica em uma sala influenciam na inteligibilidade da palavra no interior da mesma. Dentre estes, aqueles que mostram maior correlação com a inteligibilidade são os parâmetros U_{50} , D_{50} , C_{50} e, sem a menor sombra de dúvida, o nível de ruído de fundo presente na sala. Todavia, conforme será visto mais adiante neste capítulo, diversos outros parâmetros ou métricas foram criados com o intuito de avaliar a inteligibilidade da palavra em salas.

O problema da inteligibilidade da palavra está presente em locais públicos em geral. O Brasil, por ser um país tropical, possui tradições arquitetônicas e de construção civil que são bastantes distintas daquelas presentes em países de clima temperado ou frio. Para garantir boa ventilação em dias quentes, é praxe haver grandes vãos que permitam uma climatização por meio de convecção natural, o que favorece a entrada de ruído externo. Por outro lado, quando as condições econômicas o permitem, utiliza-se, no lugar da ventilação natural, climatização por meio de aparelhos de ar condicionado que, por sua vez, injetam considerável ruído de fundo no ambiente.

Estamos, portanto, diante de uma questão essencial: em um país tropical como

o nosso será necessário escolher uma métrica para a avaliação da inteligibilidade da palavra que leve em consideração a influência do ruído de fundo. Na verdade, alguns estudos já demonstraram que o efeito da relação sinal-ruído, SNR — *Signal to Noise Ratio* —, pode ser até mais importante que a acústica interna da sala, como pode ser visto nos trabalhos de Bradley et al. [6]. Por essa razão, desconsiderar o efeito deletério do ruído de fundo sobre a inteligibilidade da palavra — utilizando, para sua avaliação, uma métrica que não o leva em consideração adequadamente — pode levar a resultados errôneos, como observado por Medrado [9].

2.1 Testes de articulação

A avaliação objetiva da inteligibilidade da palavra demanda um procedimento de ensaio — os assim chamados testes de articulação para a determinação do índice de articulação (AI — *Articulation Index*) do ambiente em analisado.

Um teste de articulação, conduzido em salas de aula, pressupõe os seguintes procedimentos:

1. Preparar uma ou mais listas de palavras monossilábicas na língua portuguesa;
2. Reproduzir as listas em ambiente anecóico por dois oradores de boa dicção, um feminino e outro masculino, gravando-se os sinais;
3. Distribuir um grupo de pessoas pelo ambiente em que se deseja estudar a inteligibilidade fornecendo às mesmas material para anotação do ditado ouvido e dando instruções sobre de que modo se procederá o mesmo;
4. Reproduzir as listas de monossílabos por meio de um orador artificial, recolhendo os resultados anotados pelo público ao final;
5. Fazer uma análise estatística, obtendo média e variância do índice de acertos obtidos.

A média de acertos dos ditados, convertida para valores percentuais, corresponderá ao resultado da inteligibilidade da palavra, medido pelo índice de articulação na sala.

O teste de articulação é lento, oneroso e particularmente difícil de ser realizado em salas de aula. Em primeiro lugar, as crianças participantes do teste deveriam ter sua audição avaliada por meio de exame audiométrico, de modo a poder garantir que todas possuam audição considerada como “normal”. Esta não é, naturalmente, uma etapa trivial e sua inviabilidade prática conduz a um procedimento *ad hoc* de eliminação daqueles resultados discrepantes do restante da turma. Em seguida, é necessário obter-se a autorização dos responsáveis dos menores para a participação

no teste de articulação, bem como a anuência da direção da unidade de ensino. Adicionalmente, se quisermos fazer uma previsão da inteligibilidade da palavra em uma dada edificação escolar ainda em fase de projeto, os testes de articulação não são, naturalmente, aplicáveis.

Por conta dessas dificuldades e também por questões econômicas, diversas alternativas têm sido reportadas na literatura, visando, a substituição dos testes de articulação por técnicas não tão onerosas e lentas, como, por exemplo, pelo levantamento das respostas impulsivas biauriculares em diversos pontos da sala. Este aspecto será discutido com detalhes nos Capítulos 3 e 4.

Provavelmente, a primeira tentativa de avaliação da inteligibilidade a partir do comportamento acústico interno da sala tenha sido a de Thiele [27], em 1953, que propôs o parâmetro definição, D_{50} . A Fig. 2.1 ilustra a razoável correlação existente entre o AI e o D_{50} , extraído de Kuttruff [28]. Contudo, os parâmetros usuais de qualidade acústica — e o D_{50} não é exceção — não contemplam o efeito do ruído de fundo presente na sala.

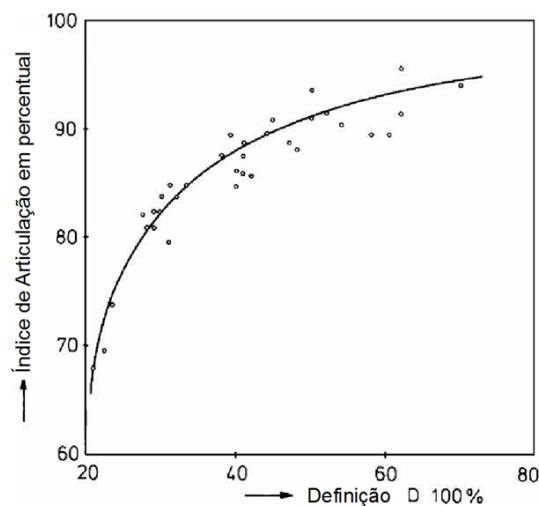


Figura 2.1: Gráfico indicativo da correlação existente entre o Índice de Articulação e a Definição [27].

Existem, contudo, outras métricas que levam em consideração o ruído de fundo. Algumas dessas serão discutidas nas seções seguintes.

2.2 Índice de transmissão da fala — STI

Dentre os diversos parâmetros objetivos utilizados para se aferir a inteligibilidade da palavra, um dos mais populares atualmente, embora não seja simples o seu cálculo, é o índice de transmissão da fala, STI — *Speech Transmission Index*. Uma das características mais importantes do STI é que ele leva em consideração tanto a

reverberação da sala como o ruído de fundo presente, sendo, portanto, sensível aos dois maiores inimigos da inteligibilidade, como mostra Müller [15]. Embora o procedimento para a determinação do STI seja um tanto complexo, o mesmo baseia-se na resposta impulsiva da sala.

Em razão disso, diversos países têm adotado o STI como padrão para avaliação de inteligibilidade, que culminou com a norma IEC, de 2003 [12], atualmente em sua Versão 4, de 2010 [13]. Contudo, o STI pode conduzir a erros grosseiros em casos extremos. Um exemplo bem representativo, citado por Müller [15], é que, se tomarmos duas respostas impulsivas, uma sendo a imagem especular da outra, o STI calculado será idêntico; entretanto, a resposta impulsiva espelhada no tempo produzirá uma inteligibilidade desastrosa.

2.2.1 Função de transferência de modulação — MTF

O STI baseia-se na função de transferência de modulação, MTF – *Modulation Transfer Function*, originalmente definida por Houtgast e Steeneken [11]. Conceitualmente, a MTF trata a sala como um sistema acústico de transmissão, como discutido por Houtgast et al. [29]. Contudo, a convolução do sinal da fala com a resposta impulsiva da sala resultará em que o sinal de saída sempre diferirá do sinal original, sobretudo, se houver ruído de fundo presente no ambiente. Como resultado, as folgas existentes entre as sílabas, usuais na fala humana, serão parcialmente preenchidas, produzindo uma suavização do envelope do sinal recebido, em relação ao sinal emitido. Esse efeito foi denominado por Houtgast como efeito borrante, SE – *Smearing Effect*, que tende a alterar os detalhes da distribuição temporal de intensidade.

A MTF que, como mencionado acima, desempenha um papel fundamental no STI e, conseqüentemente, na inteligibilidade da palavra, busca justamente quantificar o grau com que as modulações de intensidade produzidas pelo orador durante o discurso — e essenciais à compreensão do mesmo pela plateia — ainda estão presentes na posição do ouvinte.

A abordagem é similar à utilizada tradicionalmente para identificar a resposta em frequência de sistemas lineares. O envelope do sinal original é considerado como entrada; o envelope do sinal modificado é tomado como a saída do sistema. A função de transferência de modulação é, portanto, o quociente, no domínio da frequência, do espectro do envelope de saída pelo espectro do envelope de entrada.

A faixa de frequências de modulação a ser avaliada depende da representatividade das mesmas no espectro do envelope do sinal sonoro da fala, como ilustra a Fig. 2.2 que evidencia a existência de componentes relevantes entre 0,25 e 2,5 Hz, com um ponto de máximo no espectro em torno de 3 Hz. Isso se deve ao fato de que a

cadência média de um discurso corrido fica em torno de 3 sílabas por segundo.

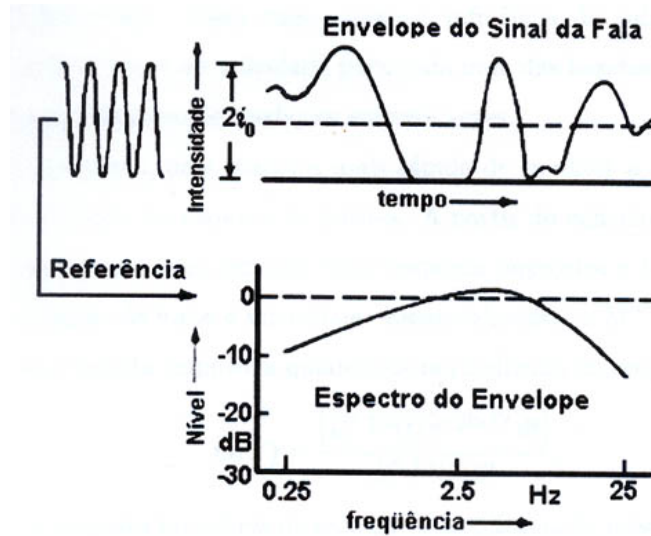


Figura 2.2: Flutuações no envelope do sinal da fala e seu espectro normalizado, segundo Houtgast [11].

Tradicionalmente, a medição da MTF era feita utilizando-se como sinal de excitação um ruído estacionário modulado por funções harmônicas cujas frequências, relevantes no espectro do envelope da fala, fossem as frequências centrais das bandas de terço de oitava entre 0,4 e 20 Hz. A intensidade do sinal de entrada, $I_e(t)$, seria expressa, então, por

$$I_e(t) = \bar{I}_e[1 + \cos(2\pi ft)], \quad (2.1)$$

onde \bar{I}_e é a intensidade média do sinal de entrada e f a frequência de modulação. A intensidade do sinal de saída teria então a forma

$$I_s(t) = \bar{I}_s[1 + m \cos(2\pi f(t + \tau))], \quad (2.2)$$

onde \bar{I}_s é a intensidade média do sinal de saída e m e τ representam a resposta em amplitude e fase do sistema, respectivamente. A função $m(f)$ é chamada de *função de transferência de modulação*, como explica Medrado [9].

Para medir a MTF, portanto, a forma original do STI estabelece a modulação harmônica da intensidade do ruído. Isso equivale ao produto do ruído com um termo semelhante ao do lado direito da Eq. (2.1). O ruído é, então, analisado em sete bandas de oitava entre 125 Hz e 8 kHz, mediante filtros passa-banda. Cada um desses sete sinais filtrados resultantes é modulado por 14 frequências, variando em passos de terços de oitava entre 0,63 Hz e 12,5 Hz, resultando em 98 (7×14) sinais distintos. Os 98 resultados obtidos são organizados segundo uma matriz com as bandas de oitava como colunas e as frequências de modulação como linhas.

Por exigir um número grande de ensaios, essa forma clássica de cálculo do STI é muito trabalhosa e lenta. Foi criada, então, uma maneira mais rápida de se obter a MTF a partir, unicamente, da resposta impulsiva da sala. Para um determinado par fonte-receptor, Schroeder [14] mostra que a MTF é a transformada de Fourier da resposta impulsiva quadrática normalizada, ou seja,

$$m(f) = \frac{\int_0^\infty h^2(t) e^{-j2\pi ft} dt}{\int_0^\infty h^2(t) dt}, \quad (2.3)$$

onde $h(t)$ é a resposta impulsiva da sala, num dado ponto.

Contudo, para termos uma melhor correlação com a inteligibilidade, é necessário levar em consideração a influência do ruído de fundo. Devemos, portanto, incluir a intensidade do ruído de fundo, I_r , na intensidade do sinal de saída, levando à expressão

$$I_T = I_s + I_r = (\bar{I}_s + I_r) \left(1 + m \frac{\bar{I}_s}{\bar{I}_s + I_r} \cos(2\pi f(t + \tau)) \right), \quad (2.4)$$

onde I_T é a intensidade total.

Da Eq. (2.4) resulta que a função de transferência de modulação do ruído de fundo pode ser expressa por

$$m_r = \frac{\bar{I}_s}{\bar{I}_s + I_r} = \frac{1}{1 + 10^{\text{SNR}/10}}, \quad (2.5)$$

onde SNR é a relação sinal-ruído.

É importante ressaltar que a MTF não traz informação adicional com respeito à resposta impulsiva da sala. Ela apenas representa uma outra forma de visualização da mesma, que permite mais facilmente obter a inteligibilidade da palavra a partir do STI, como discutido a seguir.

2.2.2 A obtenção do STI a partir da MTF

Em essência, o STI é um índice único extraído da MTF e calculado por bandas de oitavas. Pode-se subdividir a obtenção do STI em cinco etapas, segundo Houtgast e Steeneken [30]:

1. Transformação da MTF em uma relação sinal-ruído aparente. Para cada valor de $m(f)$ calcula-se a relação SNR aparente, pela expressão

$$\text{SNR}_{\text{ap},f} = 10 \log \left(\frac{m_r(f)}{1 - m_r(f)} \right). \quad (2.6)$$

2. Limitação do valor da SNR. A SNR aparente obtida pode assumir valores entre $-\infty$ e ∞ , sendo seus valores truncados em uma faixa dinâmica de 30 dB, ou seja,

$$\text{Se } |\text{SNR}| \geq 15 \text{ dB, } \quad \text{então, } \quad |\text{SNR}| = 15 \text{ dB.} \quad (2.7)$$

3. Média por bandas de oitava. Aqui, é feita uma média aritmética entre os valores da MTF, para cada banda de oitava, obtendo-se uma SNR aparente por banda,

$$\text{SNR}_{\text{ap},k} = \frac{1}{M} \sum_{f=1}^M \text{SNR}_{\text{ap},f}, \quad (2.8)$$

onde k representa a banda de oitava e M o número de bandas.

4. Média entre as bandas de oitava. Aqui é executada uma média ponderada das relações SNR aparentes por banda,

$$\overline{\text{SNR}} = \sum_{k=1}^7 w_k \text{SNR}_{\text{ap},k}, \quad (2.9)$$

onde os pesos w_k , originalmente propostos por Steeneken e Houtgast [31] valem, pela ordem: 0,13, 0,14, 0,11, 0,12, 0,19, 0,17 e 0,14. Esses valores, obtidos após diversos testes, têm o objetivo de maximizar a correlação entre o STI e o AI.

5. Conversão para o STI. Para finalizar, essa conversão é feita a partir de uma normalização do valor médio da SNR aparente, segundo a expressão

$$\text{STI} = \frac{\overline{\text{SNR}} + 15}{30}, \quad (2.10)$$

lembrando que a $\overline{\text{SNR}}$ está contida no intervalo $(-15, 15)$, em dB.

O STI reflete, com efeito, uma SNR média aparente, função de duas variáveis: as frequências de modulação relevantes no envelope do sinal da fala e as bandas de oitava relevantes para a acústica da sala, como discutido por Medrado [9].

Como afirma Müller [15], “O STI certamente não é uma panacéia na predição e avaliação da inteligibilidade em lugares padecendo de ruído de fundo e acústica de sala carente, mas ele é bem prático e um bom primeiro indicador de problemas que comprometem o entendimento.” O STI exhibe uma correlação satisfatória com a inteligibilidade da palavra, como mostra a Fig. 2.3, onde AL_{cons} significa *Articulation Loss of Consonants*, ou perda de consoantes na articulação, portanto um índice que cresce no sentido oposto ao da inteligibilidade da palavra.

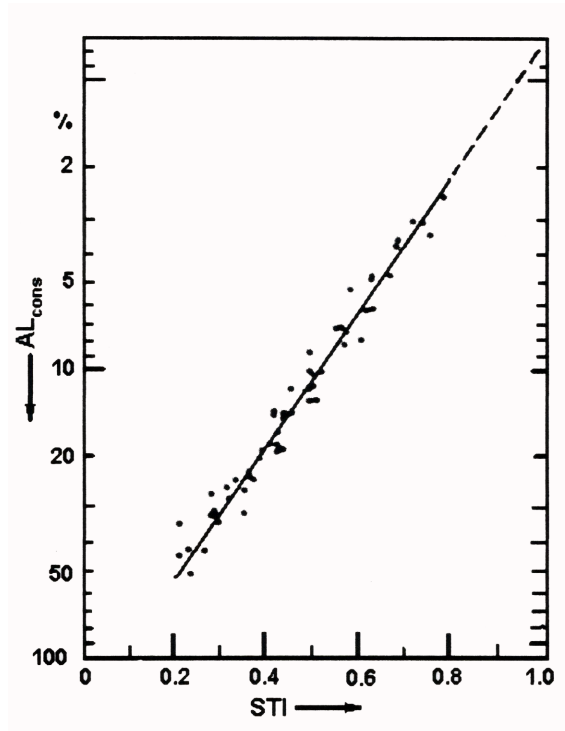


Figura 2.3: Correlação estreita entre o STI e o AL_{cons} [28].

2.3 Outras métricas

A norma ISO-3382, de 1997 [32], define alguns parâmetros referentes à qualidade acústica de salas. A rigor, todas as definições são baseadas, direta ou indiretamente, nas respostas impulsivas das salas. Alguns dos parâmetros, contudo, dependem das respostas impulsivas biauriculares. Estes são denominados *parâmetros biauriculares*, enquanto os demais se denominam *parâmetros monoauriculares*.

Apresenta-se, a seguir, um resumo sucinto dos principais parâmetros de qualidade acústica de salas que estão mais diretamente relacionados à inteligibilidade da palavra. Em todas as expressões a seguir, $p^2(t)$ expressa a pressão quadrática em um determinado ponto da sala, como função do tempo, para uma excitação impulsiva, ou seja, $p(t)$ expressa a *resposta impulsiva*, IR – *Impulse Response*, naquele ponto da sala. Na prática, o limite superior das integrais, quando indicado como $+\infty$, reduz-se ao tempo total de permanência do som na sala, não mais do que três segundos, tipicamente.

Todos os parâmetros objetivos de qualidade acústica discutidos a seguir, são úteis para classificar salas, muito embora não haja ortogonalidade entre os mesmos, ou seja, não são mutuamente independentes.

Tempo de Reverberação, T_{30} – *Reverberation Time*

O tempo de reverberação, como proposto por Sabine [33], era originalmente base-

ado na *curva de decaimento energético*, medida a partir do desligamento de uma fonte sonora, usualmente emitindo ruído de banda larga, de modo a excitar diversas frequências. A curva de decaimento energético, $\bar{e}(t, \mathbf{x})$ onde t é o tempo, \mathbf{x} é a posição do receptor (três coordenadas) e a barra indica média de seguidos experimentos, representa o decréscimo médio da energia sonora na sala.

Sabine propôs que o tempo de reverberação, correspondendo a um decaimento de energia de 60 dB, dependia do volume V , em m^3 , e da área efetiva de absorção A da sala, em m^2 , segundo a expressão, hoje consagrada

$$T_{60} = 0,161 \frac{V}{A}. \quad (2.11)$$

Nos experimentos originais, Sabine utilizava tubos de órgão como fonte sonora, um cronômetro para medir o tempo e seu ouvido para identificar o momento em que a reverberação não mais era observada. Bem posteriormente, os estudos de campos sonoros perfeitamente difusos demonstraram que o tempo de reverberação podia ser calculado segundo

$$T_{60} = 6 \ln 10 / \gamma, \quad (2.12)$$

onde

$$\gamma = Ac/4V, \quad (2.13)$$

onde c é a velocidade do som. Como $\ln 10 = 2,303$, então,

$$T_{60} = 55,3V/Ac. \quad (2.14)$$

Utilizando $c = 344$ m/s, obtêm-se, então, a Eq. (2.11) tal como proposta por Sabine.

Schroeder [34] demonstrou que a curva de decaimento energético médio, para uma dada posição \mathbf{x} do receptor, pode ser obtida pela integração reversa (de trás para frente) da resposta impulsiva quadrática da sala naquela posição, QIR (*Quadratic Impulse Response*), dada por,

$$\bar{e}(t, \mathbf{x}) = C \int_t^\infty p^2(\tau) d\tau, \quad (2.15)$$

onde C é uma constante relacionada com a potência da fonte e $p^2(t)$ é a QIR da sala, expressa como pressão quadrática. Desse modo, um número teoricamente infinito de ensaios de decaimento a partir da supressão da fonte sonora pode ser substituído por um único teste impulsivo na sala. O tempo de reverberação, então, é determinado como aquele correspondente a um decaimento de \bar{e} de 60 dB. Em medições, a norma ISO – 3382, de 1997 [32], estabelece que deve ser avaliado o tempo de decaimento entre -5 dB e -35 dB e o resultado multiplicado por dois, gerando então o T_{30} .

Tempo de Decaimento Inicial, EDT – *Early Decay Time*

Experimentos demonstram que o decaimento inicial da sala tem uma importância psicoacústica muito grande. O EDT é também baseado na curva de decaimento energético médio da sala na posição do receptor, $\bar{e}(t, \mathbf{x})$, sendo definido como o tempo correspondente aos primeiros 10 dB de decaimento, multiplicado por seis (sempre uma referência aos 60 dB de Sabine). Como a curva de decaimento energético médio não é exatamente linear, é muito comum que o T_{30} e o EDT tenham valores distintos.

Definição, $D_{50,80}$ – *Definition*

Como mencionado anteriormente, as primeiras reflexões estão fortemente correlacionadas com a inteligibilidade. Thiele [27] criou o termo *definição*, D_{50} , tendo em mente o conceito de inteligibilidade da palavra. Observe-se que já na década de 1950 se fixava, para fins de inteligibilidade da palavra, a fronteira entre primeiras reflexões e reflexões tardias em 50 ms após a chegada do som direto. O D_{50} é definido como

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \times 100\%, \quad (2.16)$$

ou seja, é a razão entre a energia acumulada entre 0 e 50 ms e a energia total, ambas no mesmo ponto da sala. Observe-se que a *definição* não é um parâmetro logarítmico, sendo dada em percentual.

Define-se, também, para fins de avaliação do ambiente quanto à sua adequação para reprodução de música, o D_{80} , na forma,

$$D_{80} = \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \times 100\%. \quad (2.17)$$

Fator de Clareza, $C_{80,50}$ – *Clarity Factor*

Reichard et al. [35] introduziram um parâmetro similar ao D_{50} , denominado *fator de clareza*, — caracterizado como C_{80} para música e como C_{50} para fala — que também indica uma razão, esta em dB, entre a energia inicial (de 0 a 50 ou 80 ms) da resposta impulsiva quadrática da sala e a energia reverberante (de 50 ou 80 ms em diante), ou seja:

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt}; \quad (2.18)$$

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt}. \quad (2.19)$$

O C_{80} traduz uma impressão de transparência musical que a sala proporciona (ou não) na identificação de detalhes da música, principalmente em peças de rápido andamento, apesar da reverberação do ambiente. Uma sala com C_{80} alto é dita *clara*. Tipicamente, salas com fator de clareza entre mediano e bom têm C_{80} na faixa entre -6 e 0 dB, segundo Beranek [36].

Já o C_{50} traduz uma sensação de separação maior ou menor das sílabas de um discurso. Observe-se que há uma semelhança bastante acentuada entre o C_{50} e o D_{50} . A diferença, além de o C_{50} ser logarítmico, está no fato de que o denominador corresponde à energia reverberante no fator de clareza, enquanto que no D_{50} o denominador consiste na energia total.

Razão de energias, U_{50} – *Energy ratio*

O conceito de energias *útil* e *prejudicial* é antigo na área de inteligibilidade no que toca à palavra falada. Aigner e Strutt [37] sugeriram, em 1935, uma métrica que denominaram *impressão Q*, que já traduzia uma razão de energias acústicas, na forma

$$Q = \frac{E_d + E_i}{E_t + E_r}, \quad (2.20)$$

onde E_d é a energia do som direto, E_i é a energia inicial, proveniente das primeiras reflexões, E_t é a energia proveniente das reflexões tardias, ou reverberação, e E_r é a energia do ruído de fundo. Na Eq. (2.20), os termos do numerador correspondem à *energia útil*, enquanto os termos do denominador correspondem à *energia prejudicial*, ou seja, ao componente do sinal sonoro que prejudica a qualidade do som na sala (o conceito de inteligibilidade da palavra não era ainda definido). Aigner e Strutt estabeleceram o intervalo de $1/16$ s ($62,5$ ms) a partir da chegada do som direto como fronteira entre as primeiras reflexões e as reflexões tardias, estipulando, ainda o valor $Q = 1$ como uma boa *impressão do som*, segundo Bistafa e Bradley [18].

Esse conceito ficou, todavia, esquecido até que os pesquisadores Lochner e Burger [38] o retomasse, criando a métrica denominada razão entre energias útil e prejudicial, U_{95} (*useful to detrimental ratio*), definida como

$$U_{95} = 10 \log \frac{E_d + E_i}{E_t + E_r}, \quad (2.21)$$

onde, além de uma relação em dB, um novo limite foi fixado para a fronteira entre as primeiras reflexões e as reflexões tardias, 95 ms.

Vale notar que a definição do U_{95} difere do conceito de C_{80} em dois aspectos:

o ponto de corte (95 contra 80 ms) e o fato de que a energia do ruído não está contemplada no fator de clareza. Na realidade, os parâmetros de qualidade acústica de salas são definidos de modo a poderem ser computados a partir da resposta impulsiva da sala para um par fonte-receptor. Métricas que envolvam, além da resposta impulsiva, o ruído de fundo, como é o caso do STI, devem ser calculadas por meio de técnicas um pouco mais elaboradas.

No início da década de 1980, Bradley [8] começou a realizar estudos em salas para avaliar a capacidade de novas métricas em prever a qualidade acústica em salas. Ao estudar a inteligibilidade em salas destinadas à comunicação, o pesquisador realizou diversos testes com métricas que combinassem os efeitos do ruído de fundo e da qualidade acústica da sala. Ele formulou, então, a métrica

$$U_{xx} = \frac{C_{xx}}{1 + (C_{xx} + 1)E_{NR}/E_{NF}}, \quad (2.22)$$

onde U_{xx} é a razão entre as energias útil e prejudicial para uma fronteira de xx milisegundos, C_{xx} é o fator de clareza, para o mesmo limite, $E_{NF} = 10^{NF/10}$ é proporcional à energia da fala, NF é seu nível sonoro médio rms permanente, $E_{NR} = 10^{NR/10}$ é proporcional à energia do ruído presente e NR é seu nível sonoro médio rms permanente.

Bradley realizou experimentos em diversas salas, fazendo xx variar entre 35 e 95 ms. Fazendo uma comparação com testes de articulação, ele mostrou que o U_{50} ($xx = 50$ ms) possuía boa correlação com a inteligibilidade da palavra em salas de aula.

Contudo, Medrado e Tenenbaum [10] mostraram que o U_{50} não considera devidamente a influência do ruído de fundo nas salas, em particular para salas de aula nas condições tipicamente encontradas no Brasil, onde esse ruído costuma ser maior do que o encontrado em países do chamado primeiro mundo. Visando contornar essa condição, Medrado e Tenenbaum propuseram uma nova métrica — modificando o U_{50} —, que foi designada como U_{50}^k , onde um peso maior foi dado ao ruído de fundo, definida como

$$U_{50}^k = 10 \log \left(\frac{C_{50}}{1 + (1 + C_{50})k 10^{\text{SNR}/10}} \right). \quad (2.23)$$

O parâmetro k , sendo um número real maior ou igual a um, atua como um peso, intensificando a influência do ruído de fundo, já que é um fator multiplicativo ao termo $10^{\text{SNR}/10}$ na Eq. (2.23). No trabalho de pesquisa de Medrado [9], onde foi avaliada a inteligibilidade em salas de aula de ensino de graduação, valores de k variando entre um e seis foram considerados. Com o aumento do fator k , verificou-se que os valores do coeficiente de determinação, R^2 , entre os ajustes polinomiais do U_{50}^k e o índice de articulação cresceram com k , ao menos até valores de $k = 6$, como

mostra a Fig. 2.4. O melhor valor obtido no ajuste polinomial foi de $R^2 = 86,1\%$, para $k = 6$.

Os estudos de Medrado, conforme mencionado, concentraram-se em salas de aula de graduação. Nada garante, portanto, que o valor $k = 6$ seja o mais adequado para os estudos de inteligibilidade em salas de aula do ensino fundamental.

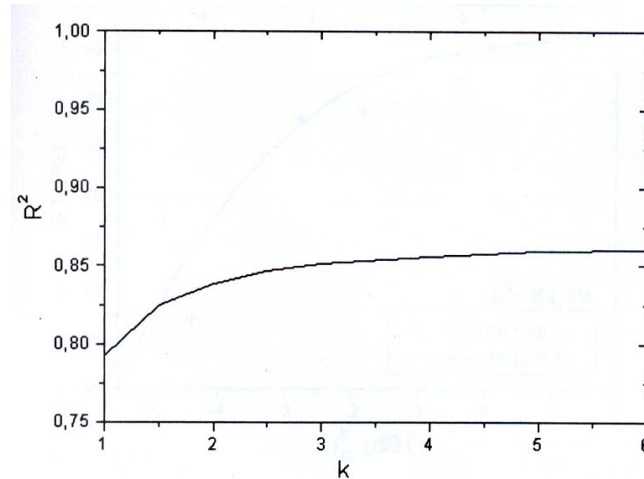


Figura 2.4: Relação entre o peso k dado ao ruído de fundo na Eq. (2.23) e o coeficiente de determinação obtido com ajuste polinomial de grau três [9].

A norma ISO-3382, de 1997 [32], define ainda outros parâmetros objetivos para qualidade acústica em salas, tais como: ganho, G ; fração de energia lateral, LF ; ganho de energia lateral, LG ; tempo central, T_S ; correlação cruzada inter-auricular, $IACF$; coeficiente de correlação cruzada inter-auricular, $IACC$, entre outros. Contudo esses parâmetros apresentam pequena correlação com a inteligibilidade da palavra e não serão discutidos neste trabalho.

Capítulo 3

A audição humana

A audição binauricular permite localizar a direção do som, como mostram Blauert [39] e Vorländer [40]. Uma pessoa inserida em um campo sonoro está sujeita a ondas sonoras vindas de diversas direções e essas frentes de onda são modificadas devido aos fenômenos de reflexão, absorção e difração produzidos principalmente pela presença de sua cabeça e da parte superior do torso, que perturbam o campo sonoro. A perturbação de cada frente de onda depende fortemente da sua direção de incidência relativamente à cabeça e do conteúdo em frequência do sinal. Além disso, se a incidência do som não for exatamente frontal, o sinal sonoro chega a cada ouvido com diferenças temporais e de amplitude, constituindo a diferença inter-auricular de amplitude e de fase (atraso).

Portanto, para cada direção de incidência da onda sonora que chega ao ouvinte, o conjunto cabeça/torso (doravante designado simplesmente como *cabeça*) introduz um filtro no domínio da frequência, que se traduz por alterações em amplitude e fase do sinal sonoro original.

3.1 Funções de transferência associadas à cabeça humana

A HRTF — *Head Related Transfer Function*, ou Função de Transferência Associada à Cabeça — constitui um *filtro* em frequência que a cabeça humana introduz no sinal sonoro que chega aos ouvidos. Portanto, a HRTF é fortemente dependente da frequência e da direção de chegada da onda sonora. Segundo Shaw [41] e Vorländer [40], a HRTF é definida como a razão entre a pressão sonora medida na entrada do canal auditivo e a pressão sonora medida por um microfone na posição correspondente ao centro da cabeça, na sua ausência, no domínio da frequência.

A Fig. 3.1 mostra a composição da função de transferência associada à cabeça humana, discutido por Genuit [42]. Observe que apenas a primeira parte é considerada como compondo efetivamente a HRTF, por ser dependente da direção da onda sonora. A segunda parte, embora também introduza uma filtragem em frequência, devido à ressonância do canal auditivo, é *independente* da direção da onda sonora.

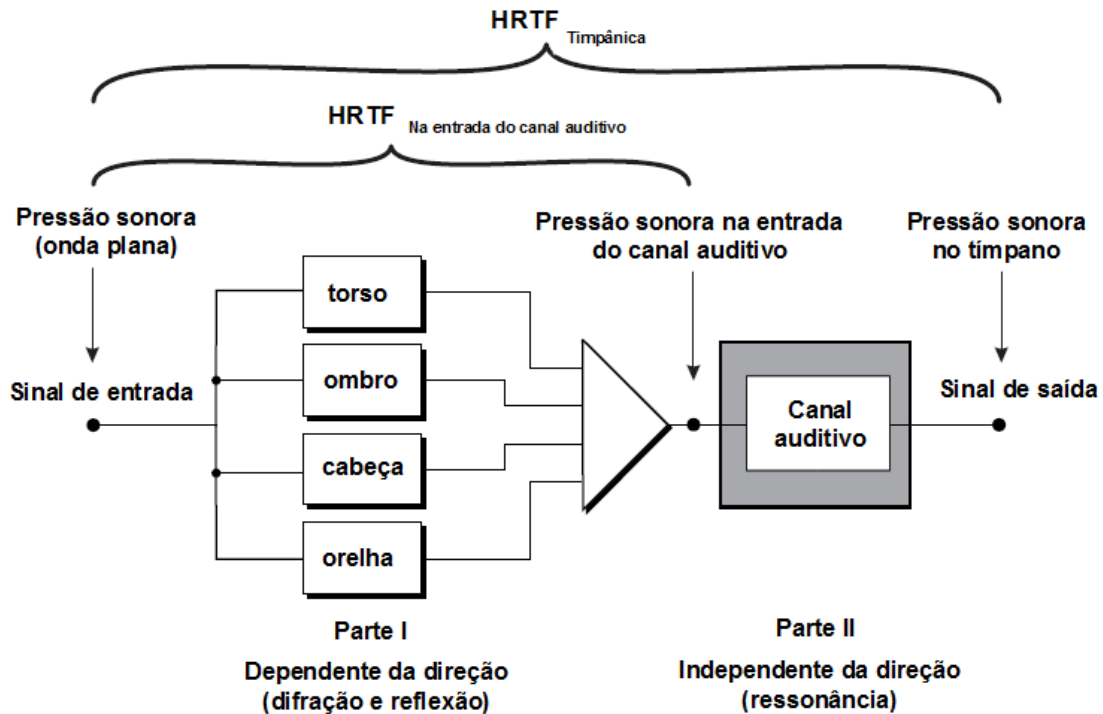


Figura 3.1: Esquema geral das funções de transferência. A Parte I relaciona a pressão sonora incidente com o sinal na entrada do canal auditivo, *dependente* da direção de incidência. A Parte II relaciona o sinal na entrada do canal auditivo ao sinal incidente no tímpano, *independente* da direção [41].

Para uma caracterização mais precisa da direção incidente, um sistema de coordenadas esféricas é adotado, veja Fig. 3.2. O plano horizontal é descrito através do ângulo azimutal, φ , variando entre 0^0 e 360^0 , correspondendo estes dois valores à direção frontal relativa à cabeça. O plano meridiano é descrito pelo ângulo polar, ou de elevação, θ , variando entre -90^0 e $+90^0$, respectivamente para baixo e para cima da cabeça.

Um sinal sonoro que chega à cabeça humana oriunda de uma direção não contida no plano meridiano, terá trajetórias distintas para alcançar os ouvidos esquerdo e direito do ouvinte, como mostra a Fig. 3.3. Portanto, a cabeça inserida no campo acústico introduzirá filtragens em frequência diferentes para cada um dos ouvidos. Assumindo-se a cabeça humana como essencialmente simétrica com respeito ao plano meridiano, é razoável supor que teremos funções de transferência também simétricas com respeito a esse plano. Contudo, a assimetria da cabeça humana com respeito

ao plano horizontal — notadamente a assimetria do pavilhão auricular — sugere que o ângulo de azimute não é suficiente para descrever as HRTF's, que dependerão também do ângulo de elevação.

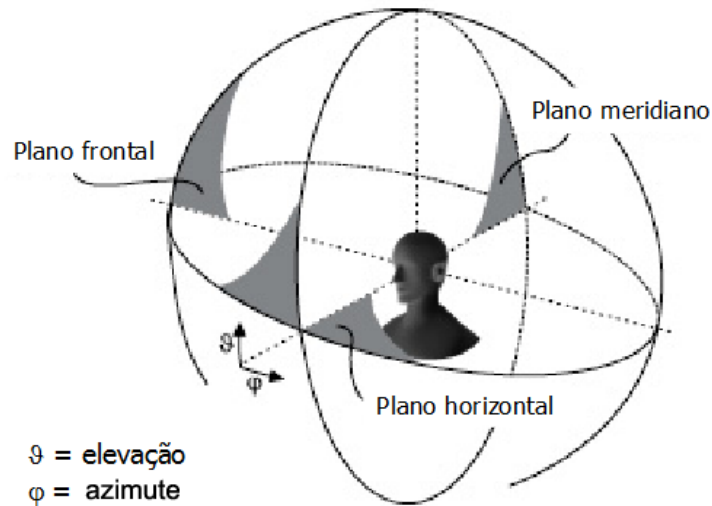


Figura 3.2: Sistema de coordenadas esféricas ao redor de uma cabeça humana, onde φ mede o azimute e θ mede a elevação [39].

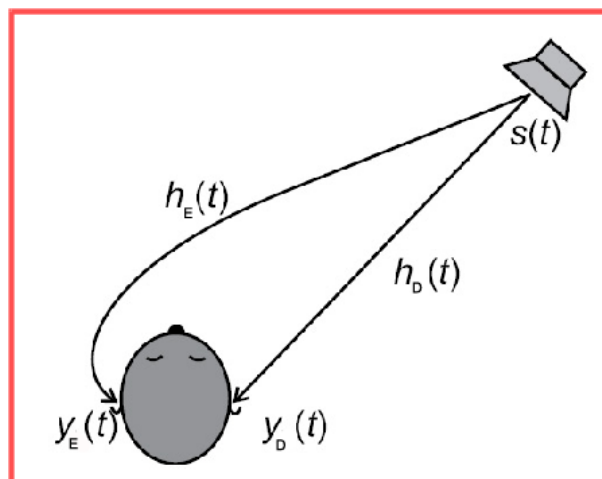


Figura 3.3: Trajetórias distintas do som para os ouvidos esquerdo e direito.

Na segunda metade da década de 1990 HRTF's foram medidas para diversas direções e para cada um dos ouvidos, gerando bancos de dados, disponíveis atualmente na internet, citados por Gardner e Martin [43] e Algazi et al. [44]. Tipicamente, cada banco de dados contém as HRTF's para cerca de 720 direções, para cada um dos ouvidos. Essas 1440 funções de transferência contêm cerca de 500 pontos em frequência (a rigor, são 512 coeficientes). As bases de dados fornecem, efetivamente,

a contrapartida no domínio do tempo para as funções de transferência, ou seja, as respostas impulsivas associadas à cabeça humana (HRIR's – *Head Related Impulse Responses*).

A Fig. 3.4 mostra algumas funções de transferência associadas à cabeça humana (módulo), como função do ângulo azimutal (ξ , na figura), extraído de Mehrgardt e Mellert [45].

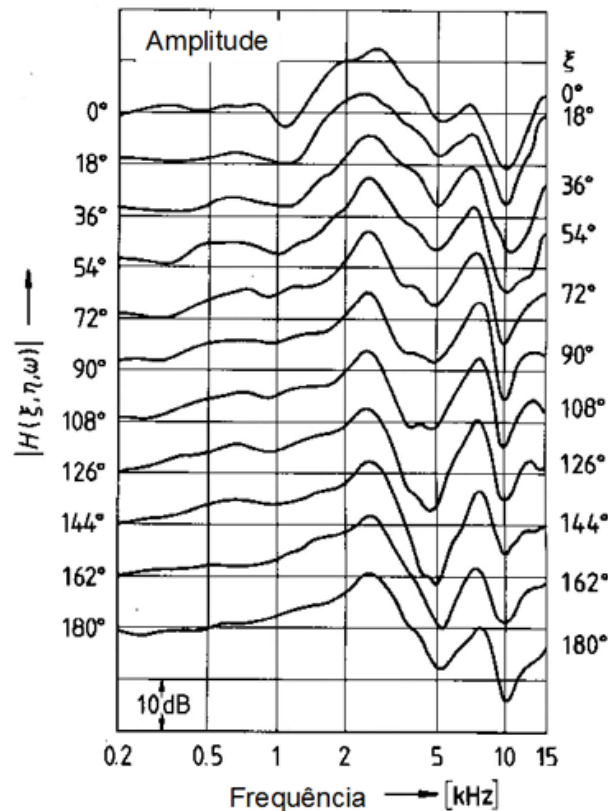


Figura 3.4: Módulo de algumas das HRTFs, em dB, para elevação de 0° e azimute variando entre 0° e 180° , ouvido direito [44].

A Fig. 3.5 ilustra o módulo das funções de transferência associadas à cabeça humana, para elevação de 0° e azimute variando entre 0° e 360° em um gráfico em cascata, ver Torres et al. [46]. Observe-se a forte flutuação das curvas para frequências acima de 1 kHz.

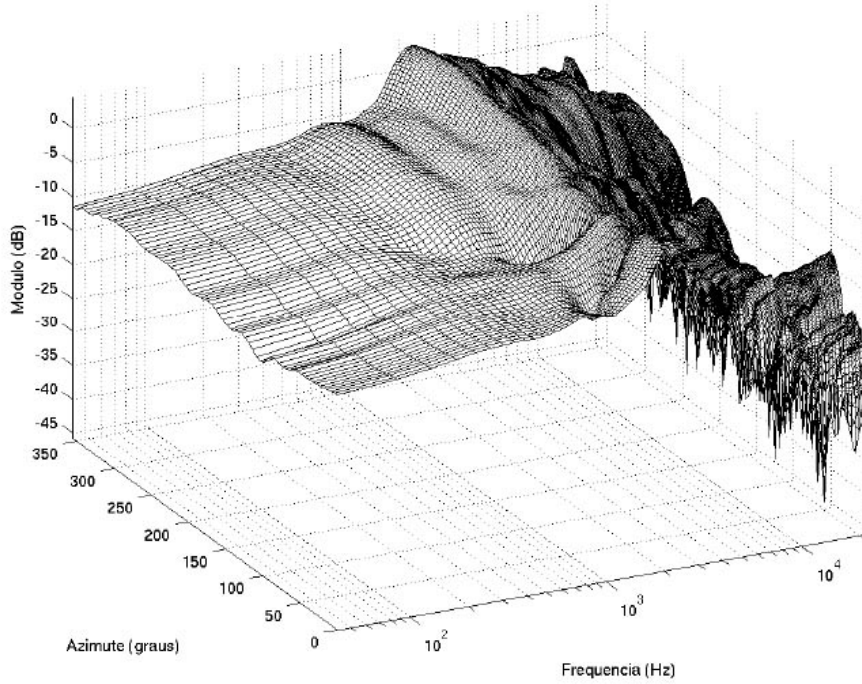


Figura 3.5: Módulo das HRTFs, em dB, para elevação de 0^0 e azimute entre 0^0 e 360^0 , ouvido direito, em um diagrama em cascata [45].

3.2 Resposta impulsiva e função de transferência

Excitar um sistema linear com um impulso unitário $\delta(t)$ equivale a excitá-lo com todas as frequências em igual amplitude de uma só vez. A resposta do sistema a essa excitação é chamada de *resposta impulsiva* do sistema, $h(t)$, e sua transformada de Fourier é denominada *resposta em frequência* ou *função de transferência* do sistema, $\hat{h}(f)$, dada por

$$\hat{h}(f) = \mathcal{F}\{h(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-i2\pi ft} dt, \quad (3.1)$$

onde \mathcal{F} é a transformada de Fourier, f é a frequência e i o unitário do eixo imaginário.

A resposta $y(t)$ de um sistema linear e invariante no tempo, SL , a uma dada excitação $s(t)$ é o resultado do produto de convolução da excitação $s(t)$ com a resposta impulsiva $h(t)$, expressa por

$$y(t) = s(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)h(t - \tau) d\tau. \quad (3.2)$$

No domínio da frequência, a relação entre entrada e saída do sistema converte-se em uma relação de produto simples de funções, de acordo com o teorema da convolução, como visto em Skudrzyk [47], na forma

$$\hat{y}(f) = \hat{s}(f) \hat{h}(f), \quad (3.3)$$

onde $\hat{s}(f)$ é a transformada de Fourier de $s(t)$ e $\hat{y}(f)$ é a transformada de Fourier da resposta do sistema, $y(t)$.

A maneira mais usual para se obter a resposta impulsiva de um sistema linear e invariante no tempo é excitá-lo com um sinal conhecido e de espectro largo como, por exemplo, as sequências de comprimento máximo, MLS (*Maximum Length Sequences*) ou a varredura em frequência, SS (*Sine Sweep*) e medir a resposta do sistema.

Sistemas lineares invariantes no tempo podem ter entradas e saídas múltiplas. No caso de uma cabeça humana, o sinal de entrada é o emitido pela fonte sonora, localizada em uma determinada direção em relação à cabeça; já os sinais de saída podem ser entendidos como os sinais na entrada de cada um dos canais auditivos. A relação entre entrada, respostas impulsivas dos dois ouvidos e saídas é a mesma estabelecida pelas Eqs. (3.2–3.3).

A Fig. 3.6 ilustra a relação entre entrada e saídas nos dois canais, tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência.

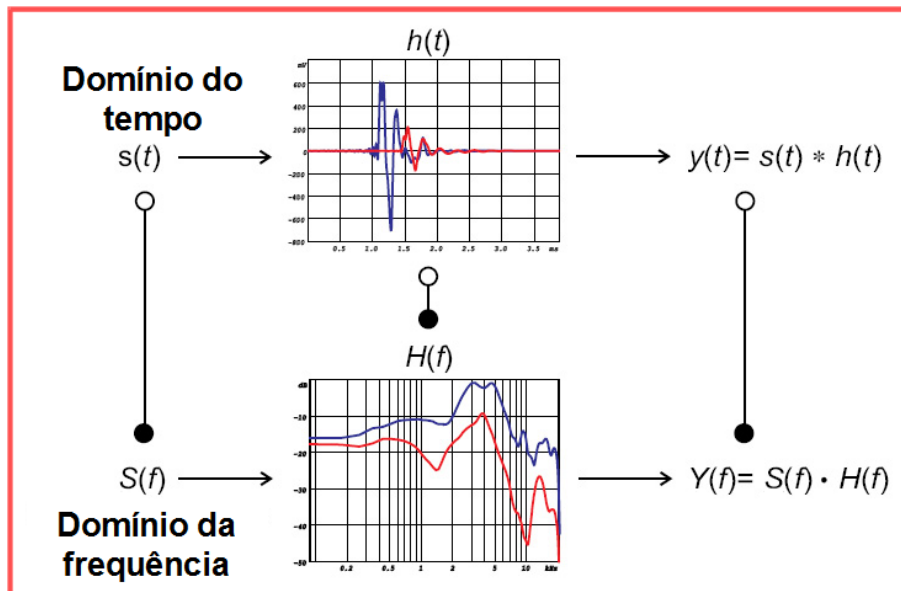


Figura 3.6: Sistema linear e invariante no tempo com duas entradas, $\mathbf{s}(t) = (s_1(t), s_2(t))$, e duas saídas, $\mathbf{y}(t) = (y_1(t), y_2(t))$, e seus correspondentes no domínio da frequência.

3.3 Aurilização

O termo *aurilização* — correspondendo a *auralization* em inglês — provém da psicoacústica e é a chave do que costumou-se chamar como *realidade virtual acústica*.

A realidade virtual acústica significa a possibilidade de alguém inserir-se num dado cenário sonoro a partir de técnicas de simulação ou de medição. Por exemplo,

um bom programa para simulação numérica de acústica de salas, em geral, é capaz de gerar as respostas impulsivas biauriculares, ou seja, as respostas impulsivas para dois canais correspondendo às posições dos dois ouvidos de um receptor humano para um ponto arbitrário no interior da sala, como discutido por Tenenbaum et al. [48]. Portanto, uma vez introduzidos nesses canais os filtros correspondentes às HRTF's, é possível criar uma sensação auditiva equivalente àquela que o ouvinte teria se situado naquele local da sala simulada: isso é denominado, então, *realidade virtual acústica*.

O princípio desse procedimento é o que constitui, então, a aurilização. Com o acentuado desenvolvimento dos computadores, o conceito de simulação acústica, iniciado por Spandock [49] e retomado por Schroeder et al. [50], foi amplamente desenvolvido na década de 1990 por diversos grupos de pesquisa, como relatado por Bork [51].

O termo inglês *auralization* (aurilização) foi cunhado em 1993 por Kleiner et al. [52]. Atualmente, já existem programas comerciais de simulação de acústica de salas com uma opção de aurilização através da placa de som do computador.

Assim como a aurilização de uma sala inexistente pode ser gerada a partir da simulação do campo acústico que existiria em seu interior, a aurilização de uma sala existente pode ser produzida (e com maior confiabilidade) a partir de medições das respostas impulsivas biauriculares, BIR's (*Binaural Impulse Responses*), utilizando uma cabeça artificial. Os registros temporais de dois microfones, um na entrada do canal do ouvido esquerdo e outro na entrada do canal do ouvido direito, para uma excitação impulsiva na sala, constituem as BIR's da posição onde se situa a cabeça artificial.

De posse das BIR's de determinados pontos de uma sala, é possível reproduzir a sensação auditiva nesses pontos em laboratório, utilizando-se fones de ouvido com boa qualidade e devidamente equalizados. Tomando-se um sinal sonoro gravado em ambiente anecóico (um trecho musical, um trecho de um discurso) a convolução do mesmo com as BIR's fornecerá ao ouvinte a impressão de como aquele sinal sonoro seria ouvido naquele ponto da sala.

Essa técnica vem sendo explorada por fabricantes de cabeças artificiais para estudar a qualidade acústica de ambientes (salas, escritórios, auditórios, indústrias, veículos automotores etc.), especificamente voltada para o conforto humano. A Fig. 3.7 mostra cabeças artificiais de diversos fabricantes, extraído de Fedtke [53].

No que toca à inteligibilidade da palavra em salas de aula, há diversos estudos publicados, utilizando-se cabeças artificiais como, por exemplo, o de Müller [54]. A ideia, nesse caso, é medir, utilizando uma cabeça artificial, as respostas impulsivas biauriculares em pontos da sala e convoluir essas respostas com conteúdos de testes de articulação. Todavia, recentemente, foram publicados resultados, especi-

almente aqueles oriundos do doutoramento de Fels [24] na Universidade de Aachen, que demonstram que as funções de transferência para uma cabeça infantil diferem substancialmente das HRTF's conhecidas — levantadas para cabeças de dimensões de um adulto —, principalmente na região de frequência mais importante para o reconhecimento da linguagem falada (3~6 kHz).

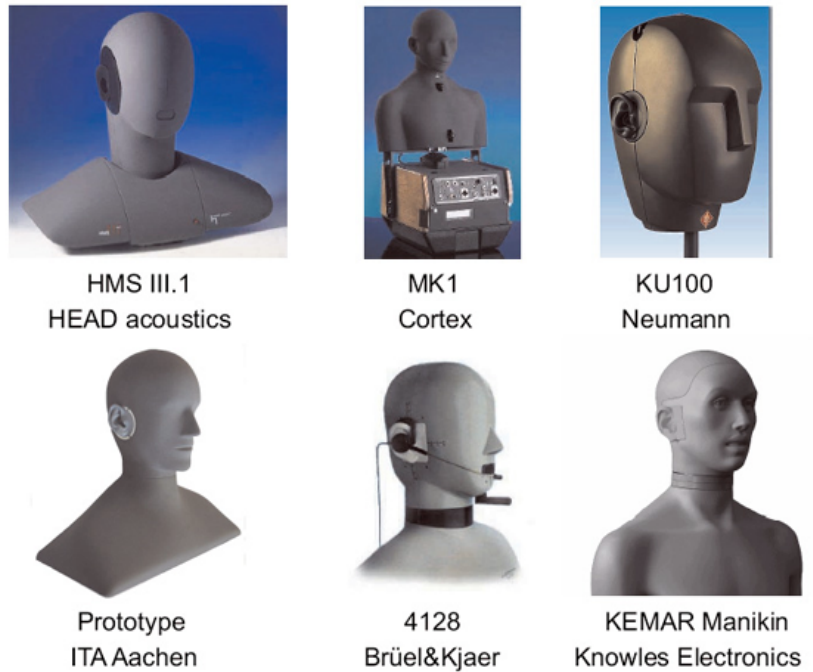


Figura 3.7: Exemplos de cabeças artificiais de diversos fabricantes [52].

Embora todos os fabricantes de cabeças artificiais de que temos conhecimento limitem-se a produzir cabeças de dimensões antropométricas similares às de um adulto, cabeças artificiais infantis vêm sendo produzidas nas oficinas do ITA – *Institut für Technische Akustik*, em Aachen, Alemanha, como equipamento para pesquisa científica. A questão da aurilização com cabeças artificiais infantis será abordada a seguir.

3.4 Aurilização com cabeça artificial infantil

Funções de transferência associadas à cabeça humana de adultos têm sido estudadas por diversos autores, como Shaw [41], Genuit [42] e Møller et al. [55]. Contudo, somente muito recentemente foram publicados estudos relativos às HRTF's de crianças, como os de Fels e Fingerhuth (2004) [25] e Fels (2008) [24].

A Fig. 3.8 ilustra bem as diferenças significativas entre as HRTF's de uma criança de seis meses, uma criança de cinco anos e um adulto, na frequência de 3 kHz, importante para a discriminação da fala. A figura, extraída de Fels [24], mostra a

amplitude, em dB, da função de transferência para todas as direções, observada de três orientações distintas. Ela traduz as diferenças essenciais entre a forma com que um adulto e uma criança escutam. Por exemplo, observando-se as HRTF's para a criança de cinco anos e o adulto, vistos pelo lado direito (na linha inferior, elementos do centro e da direita na Fig. 3.8), observa-se uma significativa diferença global de amplitude, bem como de irregularidade com a direção, maior na HRTF do adulto.

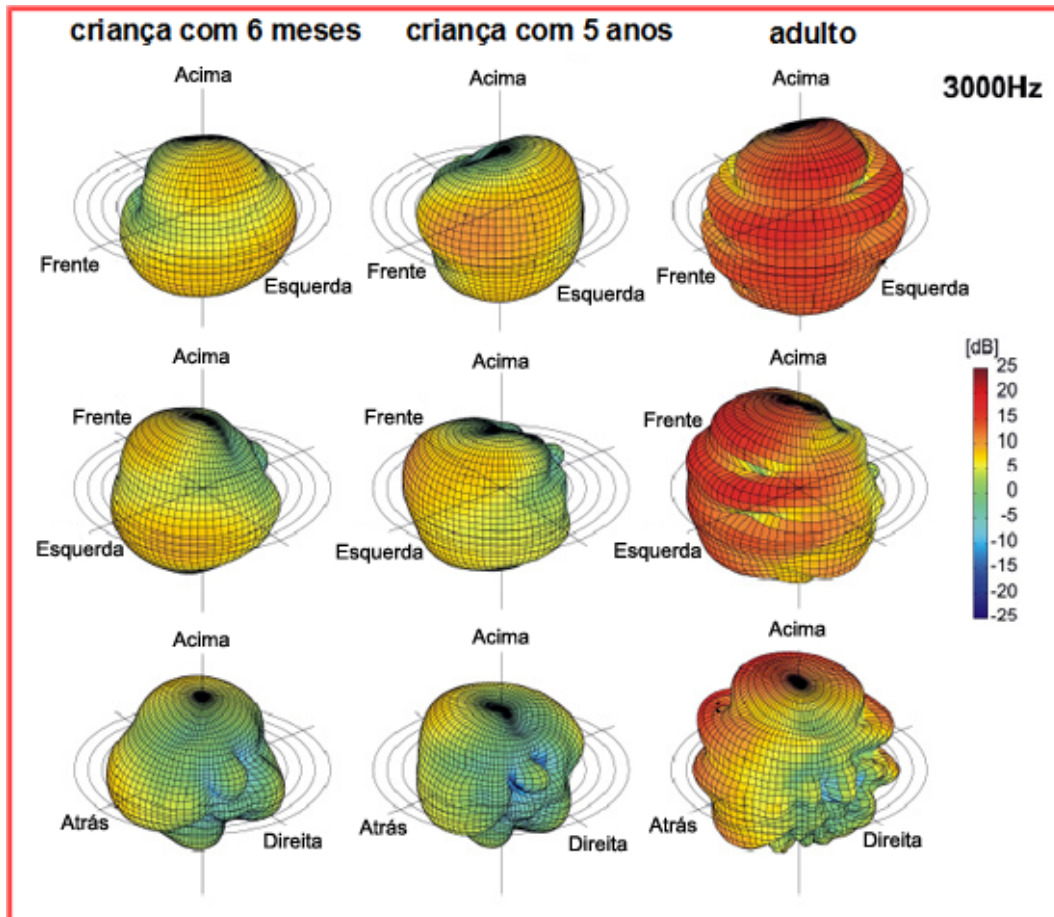


Figura 3.8: Amplitude, em dB, das funções de transferência associadas à cabeça humana, para diversas direções, para um bebê de seis meses, uma criança em idade de pré-alfabetização e um adulto, na frequência de 3 kHz [23].

A Fig. 3.9 indica a comparação entre as HRTF's de um bebê, uma criança de cinco anos e um adulto, em função da direção (azimute e elevação) e da frequência. A linha horizontal contínua passando pela frequência de 3 kHz mostra bem claramente que a amplitude global da HRTF de um adulto é bem maior que a de uma criança de cinco anos. Ao contrário, para a frequência de 6 kHz, a audição da criança é mais sensível, como indica a linha horizontal tracejada.

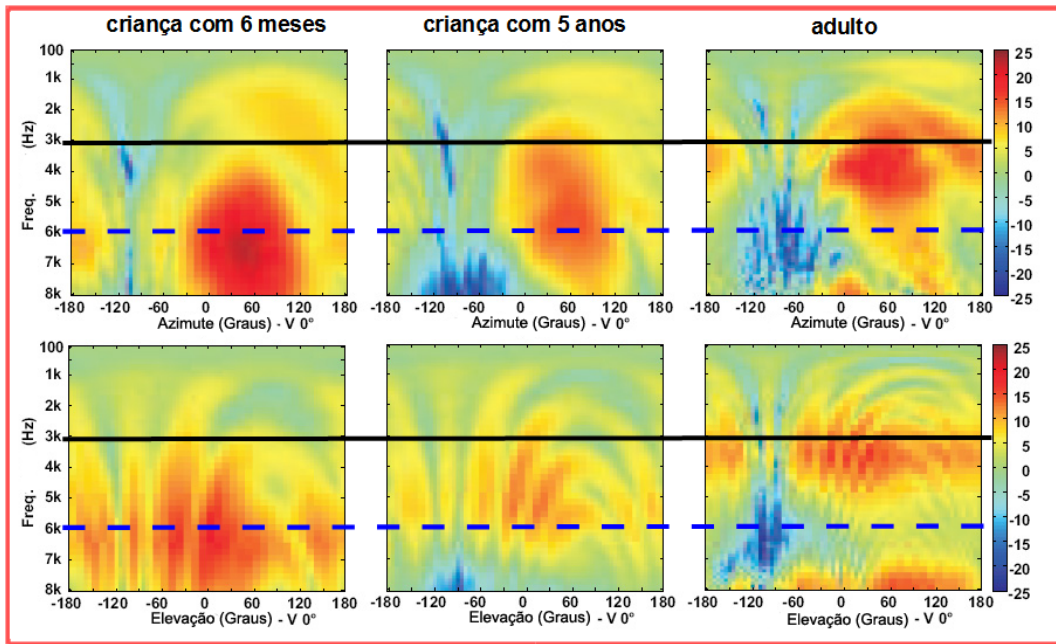


Figura 3.9: Amplitude, em dB, das funções de transferência associadas à cabeça humana, para diversas direções e frequências, de um bebê de seis meses, uma criança em idade de cinco anos e um adulto [23].

Embora não existam ainda bancos de dados com as HRTF's/HRIR's infantis — nem tampouco esses dados nos foram fornecidos pelo fabricante da cabeça artificial infantil utilizada neste trabalho —, há um forte indício de que uma aurilização realizada com uma cabeça artificial adulta e uma cabeça artificial infantil resultarão em percepções distintas. Como o objetivo deste trabalho é avaliar a inteligibilidade em salas de aula do ensino fundamental, a utilização de cabeças artificiais infantis torna-se, portanto, uma opção natural.

Capítulo 4

Metodologia

A metodologia adotada para a avaliação de inteligibilidade da palavra em salas de aula do ensino fundamental baseada no levantamento das suas respostas impulsivas biauriculares é descrita na Seção 4.1.

A Seção 4.2 apresenta a instrumentação utilizada, tanto nos experimentos de campo, como nos trabalhos de laboratório, para a condução dos testes de articulação, assim como para a geração das aurilizações e sua aplicação nos testes de articulação virtuais. A Seção 4.3 indica a lista dos procedimentos adotados nos testes de campo, que estabelece um protocolo indispensável para que todas as medidas sejam obtidas com a minimização de sua incerteza. Em seguida, na Seção 4.4, é discutido o tipo de sinal utilizado na excitação das salas. A escolha do sinal é um aspecto importante pois influencia na relação sinal-ruído e na obtenção de respostas impulsivas biauriculares de boa qualidade.

A Seção 4.5 aborda a questão da direcionalidade dos altofalantes utilizados. Como foi adotado um orador artificial como fonte sonora, suas características específicas de direcionalidade são comentadas. A Seção 4.6 discute as pré-ênfases que são utilizadas no trabalho, para compensar respostas não-planas, essencialmente da fonte sonora adotada. Finalmente, a Seção 4.7 trata da preparação dos testes de articulação em campo e da construção das listas de monossílabos utilizadas.

4.1 Etapas propostas

A metodologia geral do trabalho está distribuída em *etapas*, em ordem aproximadamente cronológica de execução, cuja descrição é apresentada a seguir.

1. Preparação de um conjunto de 15 listas, de 20 monossílabos cada, a partir de gravações de monossílabos registradas em câmara anecóica, no Laboratório de Ensaios Acústicos (LAENA) do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Essas gravações foram feitas por dois oradores, um

masculino e outro feminino, com boa dicção, e sotaque do Rio de Janeiro. A partir dessas gravações montou-se um banco de dados com 226 monossílabos (para cada orador). Somente o banco de dados com as gravações femininas foram utilizadas neste trabalho.

2. Levantamento da curva de resposta do orador artificial e geração da respectiva curva de compensação. Essa etapa também foi realizada no LAENA.
3. Levantamento da resposta dos fones de ouvido e respectiva geração da curva de compensação. Esse levantamento foi realizado no Laboratório de Eletroacústica (LAETA) do INMETRO, com o auxílio de um ouvido artificial.
4. Condução de testes de articulação em salas de aula do ensino fundamental, onde quatro listas anecóicas são apresentadas aos alunos de cada turma, todas emitidas pelo orador artificial. O procedimento foi executado em dez salas de aula com turmas do 3^o ao 6^o anos do ensino fundamental.
5. Emissão, com orador artificial, de varreduras em frequência (*sweeps*) devidamente compensadas, com a presença dos alunos, para o levantamento das respostas impulsivas biauriculares (BIR's) na sala de aula para três posições da cabeça artificial infantil e respectivas gravações biauriculares. Em cada uma das três posições da cabeça artificial na sala foram emitidas cinco varreduras, de modo a se extrair uma resposta impulsiva média.
6. É registrado o nível de ruído de fundo presente em cada uma das salas ensaiadas, bem como a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar.
7. Em laboratório, é executada a convolução entre o sinal contendo cada uma das gravações biauriculares realizadas durante os testes de articulação, com a resposta impulsiva dos fones de ouvido a serem utilizados. Os resultados desse processamento são denominados a seguir como *gravação biauricular modificada*.
8. Ainda em laboratório, os sinais de varredura registrados para cada posição da cabeça artificial infantil são deconvoluídos com o sinal de varredura enviado ao orador artificial de forma a obterem-se as respostas impulsivas biauriculares para cada posição da cabeça artificial infantil.
9. As respostas impulsivas biauriculares são, então, convoluídas com as listas anecóicas que foram apresentadas aos alunos daquela sala de aula, de modo a obter-se um sinal com as listas tal como foram ouvidas naquela sala, porém sem o ruído de fundo.

10. Em laboratório, é executado um procedimento que chamaremos aqui de *corde*, e que consiste em, a partir das gravações biauriculares registradas durante os testes de articulação, extrair o ruído de fundo — que corresponde ao sinal sonoro presente no intervalo entre os monossílabos pronunciados pelo orador artificial.
11. O ruído de fundo extraído na etapa 10 é adicionado aos sinais obtidos na etapa 9 e o resultado é convoluído com a resposta impulsiva dos fones de ouvido. Os resultados desse processamento são denominados a seguir como *aurilização*.
12. A gravação biauricular modificada é reproduzida, através dos fones de ouvido, para algumas crianças das turmas avaliadas e seus resultados nos testes de articulação virtuais são registrados.
13. O mesmo procedimento é feito para a aurilização.
14. Os resultados dos testes de articulação virtuais (a partir das gravações biauriculares modificadas e aurilizações) são comparados com os dos *testes de articulação reais*, ou seja, aqueles conduzidos originalmente em sala de aula.

Essa metodologia resultou de diversas discussões e avaliações, inclusive após alguns ensaios-piloto realizados nas escolas. Também o número de posições da cabeça artificial infantil e o número de varreduras para se obter a média para cada posição foram objeto de uma solução de compromisso entre o desejável para reduzir ao máximo a incerteza das medições e o que seria aceitável para as crianças das escolas.

A fim de reiterar a validade da técnica aqui proposta, cinco outras etapas foram incluídas na metodologia adotada e estão descritas a seguir.

1. Em uma das salas de aula foram gravados também os sinais das listas e os sinais da varredura com *cabeça artificial de adulto*, colocada nas mesmas posições da cabeça artificial infantil.
2. Os mesmos procedimentos anteriores (deconvolução, convolução, corte etc.) foram utilizados para gerar as aurilizações a partir da cabeça artificial de adulto.
3. Crianças da mesma sala foram submetidas às gravações biauriculares modificadas e aurilizações daí resultantes.
4. Um pequeno grupo de adultos (alunos de graduação do Instituto Politécnico - IPRJ/UERJ) realizou testes de articulação reais e fez os testes de articulação virtuais obtidos com a cabeça artificial de adulto.

5. Outras crianças, que não pertenciam às turmas das escolas avaliadas, também realizaram os testes de articulação virtuais com gravação biauricular modificada e aurilização.

4.2 Instrumentação

A instrumentação utilizada nos ensaios, seja nos testes de campo, seja nos ensaios de laboratório, foi a seguinte:

1. Laptop Thinkpad, Lenovo, com entrada PCMCIA;
2. Software de processamento de sinais Monkey Forest. Fabricante: Four Audio;
3. Placa de comunicação de sinais, Hammerfall DSP Cardbus para laptop. Fabricante: RME;
4. Interface de sinais e potência CMF22 Front End. Fabricante: Four Audio;
5. Orador artificial. Fabricante: ITA;
6. Cabeça artificial infantil com duas cápsulas de microfone. Fabricante: ITA;
7. Cabeça artificial de adulto com duas cápsulas de microfone. Fabricante: COPPE;
8. Medidor de nível de pressão sonora tipo 1, Solo SLM. Fabricante: 01dB;
9. Calibrador de nível de pressão sonora. Fabricante: 01dB;
10. Par de fones de ouvido K271MK II. Fabricante: AKG;
11. Termo-higrômetro. Fabricante: Incoterm;
12. Complementos (multímetro, cabos para microfone, tripés, transformador de tensão, trenas, fita adesiva etc.).

Com exceção do orador artificial, pertencente ao Laboratório de Ensaios Acústicos – LAENA, da Divisão de Acústica e Vibrações do INMETRO, e gentilmente cedido para os experimentos de campo desta pesquisa, todos os demais equipamentos utilizados pertencem ao Laboratório de Instrumentação em Dinâmica, Acústica e Vibrações – LIDAV, do Instituto Politécnico, UERJ, Campus de Nova Friburgo. As Figs. 4.1 a 4.6 ilustram alguns dos equipamentos utilizados.

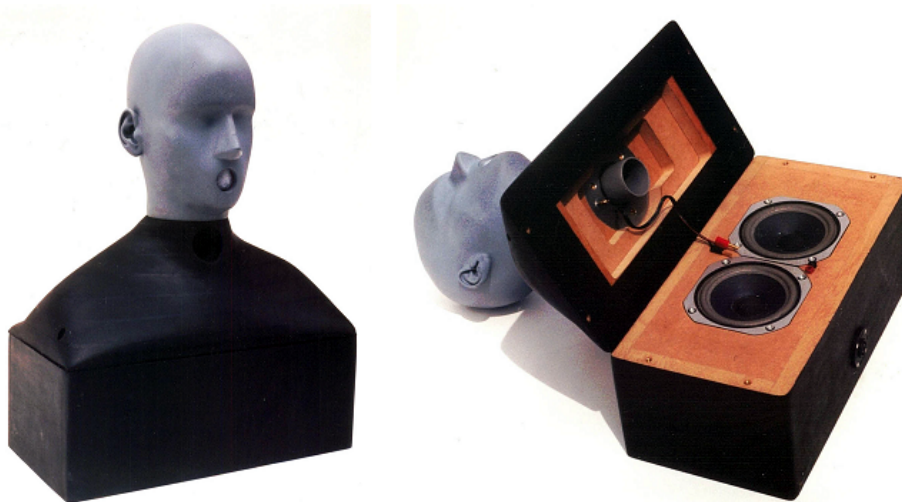
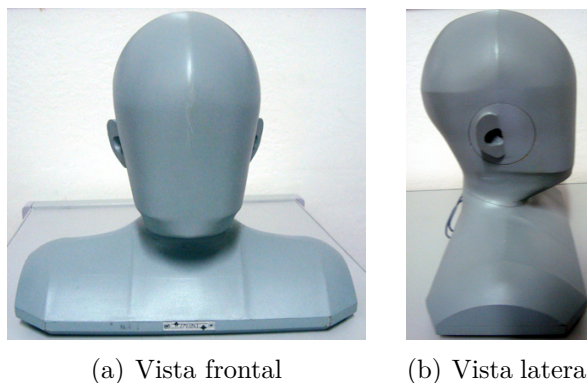


Figura 4.1: Orador artificial ITA (LAENA – INMETRO).



(a) Vista frontal

(b) Vista lateral

Figura 4.2: Cabeça artificial infantil ITA (LIDAV – UERJ).

Um equipamento que mostrou-se extremamente útil foi a interface de sinais e potência CMF22 Front End, Four Audio, com dois canais de entrada e dois canais de saída, ver Fig. 4.7. Trata-se de um sistema de medição que é acoplado ao computador através de um cabo *Host*, possuindo um conversor D/A e um amplificador de potência capaz de fornecer potência suficiente para excitar os altofalantes (no caso, os do orador artificial), em dois canais. Simultaneamente, os sinais analógicos captados em dois canais de microfones (no caso, os da cabeça artificial) passam por um conversor A/D e retornam ao computador pelo mesmo cabo de conexão.

Nos ensaios-piloto, preparatórios para esta pesquisa, utilizou-se a interface HDSP Multiface II AD/DA, RME Hammerfall, que possui conversores A/D e D/A para até 8 canais e uma mesa de mixagem XENYX 1202FX, Behringer, funcionando como pré-amplificador. Para excitar os altofalantes foi necessário utilizar ainda um amplificador de potência. O CMF22 Front End da Four Audio mostrou-se muito mais prático, simples e confiável.

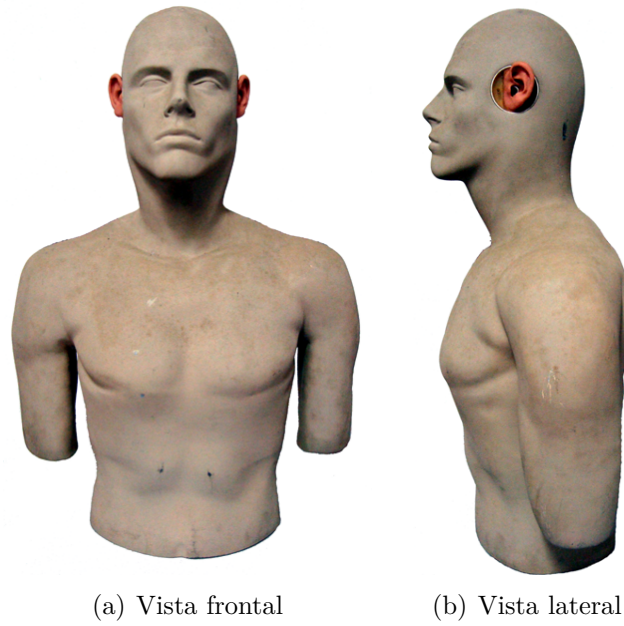


Figura 4.3: Cabeça artificial de adulto COPPE (LIDAV – UERJ).

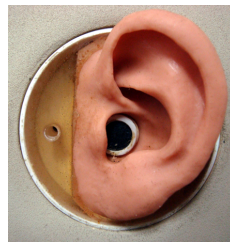


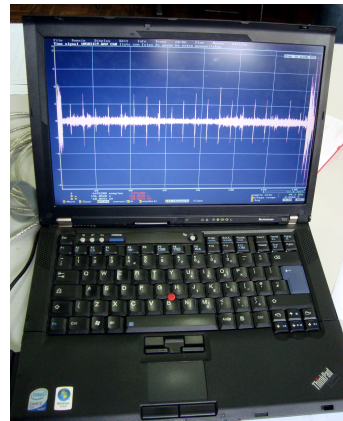
Figura 4.4: Detalhe da orelha de silicone da cabeça artificial de adulto com microfone inserido na entrada do canal (ouvido esquerdo).



Figura 4.5: Medidor de nível de pressão sonora, 01dB, Solo SLM.



(a) RME Hammerfall DSP Cardbus.



(b) Laptop Lenovo

Figura 4.6: a) Placa de comunicação de sinais, RME Hammerfall DSP Cardbus; e b) Laptop Lenovo Thinkpad com o software de processamento de sinais Monkey Forest.

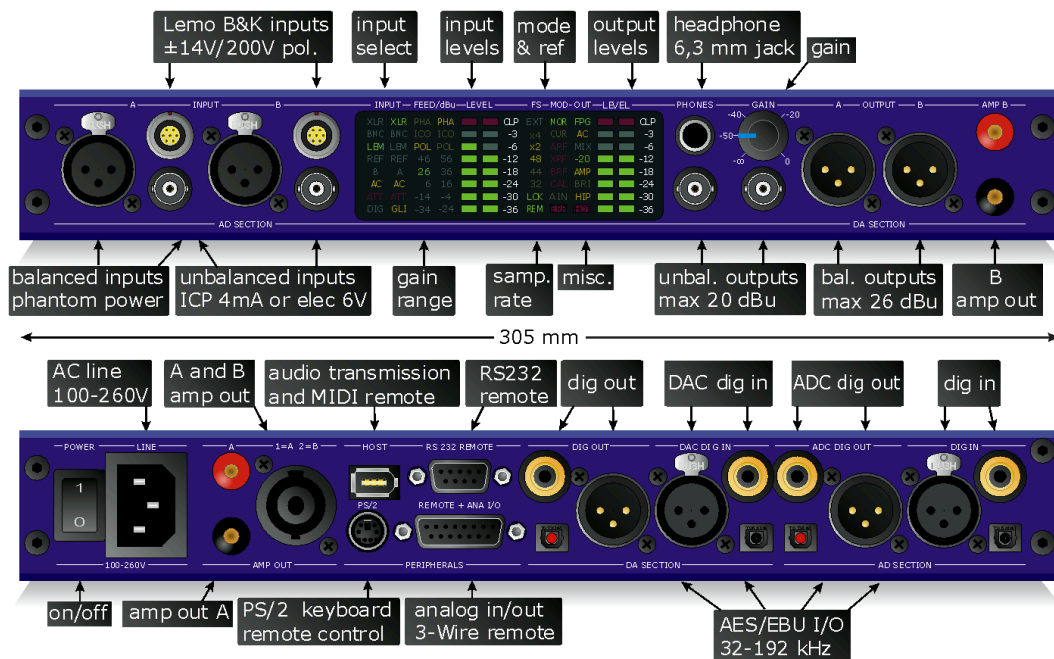


Figura 4.7: Painéis frontal e traseiro do sistema de medição CMF22 Front End.

4.3 Protocolos de ensaio

Para os ensaios realizados nas salas de aulas foram elaborados protocolos de medição, que constaram de listas de procedimentos necessários à realização dos ensaios, visando otimizar o tempo da montagem dos equipamentos e, sobretudo, para que nenhuma etapa do ensaio pudesse ser eventualmente suprimida ou esquecida.

Os protocolos de ensaio envolvem: uma lista de procedimentos para a *montagem dos equipamentos* nas salas de aula; uma lista de procedimentos para a *medição de respostas impulsivas biauriculares* nas salas; uma lista de procedimentos para a *realização dos testes de articulação* nas salas; e um protocolo para a *denominação dos sinais a serem armazenados* — são muitos — para futuros processamentos, como na produção de aurilizações.

A lista de procedimentos para a montagem dos equipamentos inclui, entre outros, a verificação da tensão elétrica nas salas; o posicionamento do notebook e da interface de sinais e potência CMF22 (Fig. 4.7) no local mais adequado, dada a limitação de comprimento dos cabos de microfone; a calibração do medidor de pressão sonora; a medição do ruído de fundo; o posicionamento do orador e da cabeça artificial, anotando todas as coordenadas para posterior análise dos resultados obtidos; a distribuição de folhas e lápis para a realização do ditado; registro fotográfico antes e durante os ensaios; etc.

Alguns desses procedimentos são absolutamente fundamentais, seja para garantir a integridade dos equipamentos — a tensão nominal na rede elétrica em Nova Friburgo é de 220 V, enquanto os equipamentos utilizados têm tensão nominal de 127 V —, seja para garantir a confiabilidade das medições, como, por exemplo, a medição do nível sonoro a um metro de distância do orador, que deve ser uniforme nos ensaios. A descrição completa de cada um dos quatro protocolos citados consta do Apêndice B.

Cumpre notar que o nível sonoro emitido por cada uma das professoras das turmas, pronunciando uma frase padrão, foi registrado com o medidor de nível de pressão sonora. O ganho do amplificador foi, então, ajustado para cada sala de aula avaliada de modo a reproduzir a mesma frase padrão com o mesmo nível sonoro da professora.

4.4 A escolha do sinal de excitação

A utilização das respostas impulsivas biauriculares em convoluções torna a utilização de *sweeps*, ou varreduras em frequência, como sinal de excitação preferencial. Como foi demonstrado por Farina [56], Müller e Massarani [57] e Satoh et al. [58], a varredura em frequência utilizada como sinal de excitação permite a eliminação da distorção harmônica da resposta impulsiva da sala, sempre presente e causada pela não-linearidade da fonte sonora. Ao contrário, se for utilizado um sinal de excitação pseudo-randômico, como o MLS, a distorção ficará distribuída ao longo de todo o domínio da resposta impulsiva, como mostra Bradley [59].

A obtenção da resposta impulsiva de uma sala sempre foi objeto do interesse dos pesquisadores, principalmente após a publicação do artigo essencial de Schroe-

der [34], onde ficou demonstrado que uma média infinita de ensaios de decaimento por interrupção de ruído poderia ser substituída por um único ensaio de resposta impulsiva para a determinação de tempos de reverberação.

Conforme já mencionado na Seção 2.3, Schroeder demonstrou que a curva de decaimento energético médio, para uma dada posição \mathbf{x} do receptor, pode ser obtida pela integração reversa da resposta impulsiva quadrática da sala na posição, conforme a Eq. (2.15), reproduzida abaixo,

$$\bar{e}(t, \mathbf{x}) = C \int_t^\infty p^2(\tau) d\tau, \quad (4.1)$$

onde C é uma constante relacionada com a potência da fonte e $p^2(t)$ é a resposta impulsiva quadrática da sala, expressa em termos da pressão sonora.

Desde então, diversos autores têm buscado sinais de excitação adequados ao levantamento da resposta impulsiva, uma vez que o delta de Dirac, $\delta(t)$, é não exequível na prática. Desde as tentativas — um tanto simplórias — de ensaios com balões, aos diversos trabalhos reportando o uso de *Chirps*, como o de Xiang [60], e a trabalhos propondo o uso do MLS, como os de Alrutz e Schroeder [61], Vorländer [62] e Dunn [63], que exige a utilização da transformada de Hadamard, são reportados na literatura. Com efeito, em um período relativamente recente, os sinais pseudo-randômicos, especialmente o MLS, ganharam a atenção dos pesquisadores em acústica de salas, sendo inúmeros os artigos publicados sobre esse assunto. Contudo, mais recentemente, a varredura em frequência (*sweeps*) vem ganhando adeptos, em virtude de sua simplicidade, da possibilidade de eliminação da distorção harmônica, da facilidade de introdução de pré-ênfases, da não necessidade de se utilizarem transformadas de Hadamard e da possibilidade de criarem-se varreduras com praticamente qualquer conteúdo espectral, como mostra Müller [57].

4.5 Características direcionais do altofalante

A direcionalidade de um altofalante de medição é particularmente importante em qualquer ensaio acústico. Em se tratando de ensaios em salas, usualmente utiliza-se uma fonte onidirecional, tal como um dodecaedro, como estabelece a norma ISO-3382, de 1997 [32]. Todavia, um dodecaedro típico somente fornece um padrão de radiação bem distribuído espacialmente até a banda de frequência de cerca de 2 kHz. Acima desse limite, os comprimentos de onda ficam comparáveis às dimensões dos altofalantes e da própria geometria do dodecaedro e o padrão de direcionalidade apresenta lobos típicos de interferência de sistemas de múltiplos altofalantes.

Cumprir notar que, em se tratando da determinação de parâmetros tais como clareza, definição e tempo central, que envolvem a relação entre as energias inicial

e tardia da resposta impulsiva, há uma perceptível influência da direcionalidade da fonte sonora, como observado por Behler [64].

As fontes sonoras em questão — no que concerne a inteligibilidade da palavra — seriam, por exemplo, pessoas falando, cuja direcionalidade é bastante complexa e varia de pessoa para pessoa. Existem, todavia, soluções para substituir humanos por um sistema de altofalantes acusticamente similar, conhecido como *orador artificial*, como discutido por Behler [65].

O orador artificial consiste em um sistema de altofalantes de duas vias (Fig. 4.1). As baixas frequências são emitidas por dois *woofers* contidos no torso, através de um orifício situado no pescoço. As médias e altas frequências são emitidas por um *tweeter* situado na cabeça, cujo som sai por outro orifício no lugar da boca. O sinal que alimenta o orador deve possuir dois canais independentes, um para cada via. O orador artificial, portanto, não possui sistema de *crossover* para a separação dos sinais, como ocorre com as caixas de som usuais de duas vias.

A direcionalidade característica do orador artificial, por sua forma similar à de um humano, é a mais próxima possível da direcionalidade média de uma pessoa. Assim, embora a inteligibilidade da palavra vá ser determinada a partir do levantamento de respostas impulsivas biauriculares, considerou-se mais adequado obter estas últimas a partir de um orador artificial e não lançar mão de um dodecaedro. Há, ainda, uma razão de ordem prática para a utilização do orador artificial como fonte sonora. Esta deve-se ao fato de que os ensaios em salas de aula devem ser céleres o suficiente de modo a não cansar em demasia as crianças. Como nesses ensaios tanto os testes de articulação são conduzidos — exigindo a utilização do orador artificial como fonte sonora — como o levantamento das respostas impulsivas biauriculares é efetuado, seria inviável proceder trocas entre duas fontes sonoras distintas.

4.6 Pré-ênfase

Ao utilizar-se qualquer dos sinais de excitação para o levantamento das respostas impulsivas de uma sala, é necessário introduzir alguma correção nesses sinais, uma vez que se deseja levantar a função de transferência exclusivamente da sala, sem a influência de outros elementos da cadeia de medição, como microfones, altofalantes ou sistemas de *crossover*.

Esta é também uma das razões da escolha da varredura em frequência como sinal de excitação, uma vez que essas correções são mais facilmente realizáveis com a utilização desse sinal. Correções desse gênero são denominadas *pré-ênfases* ao sinal. Em particular, a pré-ênfase mais importante é a devida ao espectro do altofalante de medição, uma vez que a não-linearidade do mesmo influi substancialmente nos

resultados, como observado por Müller [54]. Adicionalmente, os dutos de saída do som pelas duas vias do orador artificial possuem modos próprios, conferindo ao orador uma característica fortemente não-plana em sua resposta em frequência. Como as gravações em câmara anecóica foram feitas com o microfone situado em posição frontal aos oradores, para se obter uma reprodução fiel com o orador artificial, sem alterações de tonalidade (que podem perturbar o entendimento das palavras), é necessário, então, realizar uma pré-ênfase que forneça uma resposta plana na direção frontal.

No software de processamento de sinais *Monkey Forest*, as pré-ênfases são aplicadas no domínio da frequência pela simples multiplicação do espectro de potência da fonte pelo espectro de correção desejado. A avaliação da resposta em frequência do orador artificial foi realizada no LAENA, especificamente para esta pesquisa, uma vez que o mesmo já havia sofrido alterações desde quando foi utilizado pela última vez. Inicialmente, foram levantadas as impedâncias acústicas e as funções de transferência da “boca” (tweeter) e “pescoço” (woofer) do orador. Os resultados estão indicados na Fig. 4.8. Observe que há regiões onde a não-planaridade é significativa. Quando ocorre uma redução profunda da curva de resposta em frequência é necessário alguma manipulação de modo a não se inserir um pico exagerado na correção.

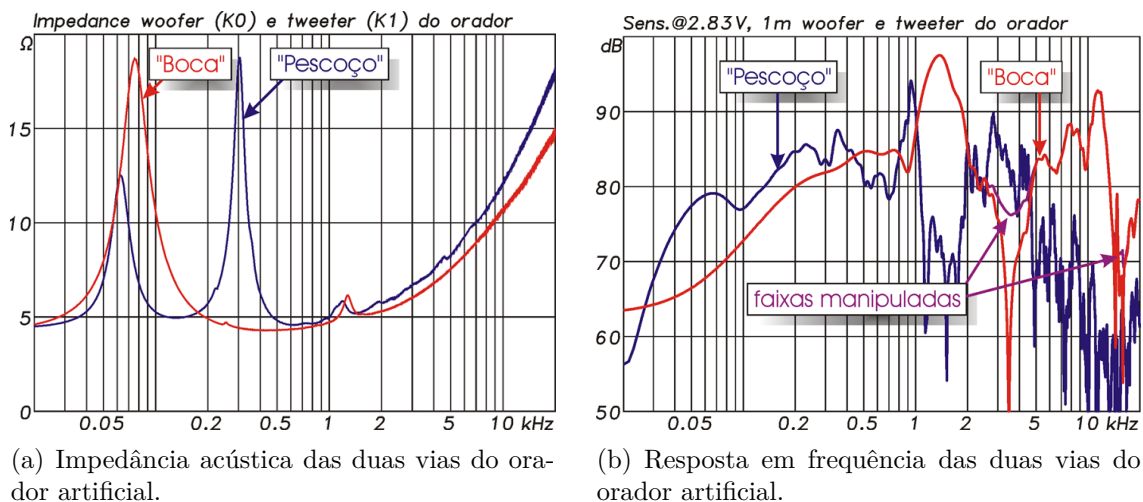


Figura 4.8: Impedância acústica e função de transferência das duas vias de altofalantes do orador artificial.

Ao final do processamento, obtém-se o filtro de pré-ênfase para os dois canais, indicados na Fig. 4.9 a. Com esses filtros aplicados, tem-se então a resposta em frequência do orador, indicada na Fig. 4.9 b. Observe-se que não foi obtida uma resposta perfeitamente plana, contudo, muito mais próxima do ideal do que com o orador artificial em suas características originais, apresentadas na Fig. 4.8 b.

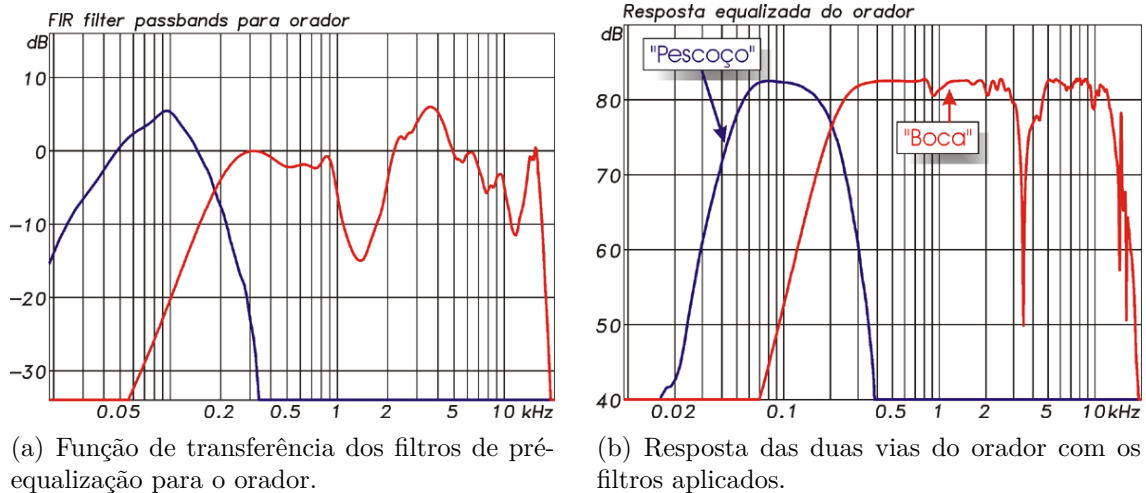


Figura 4.9: Filtragem a ser aplicada ao sinal de entrada no orador e a resposta em frequência do mesmo com a pré-ênfase.

Cabe notar que outras correções serão necessárias, mas não precisam ser aplicadas como pré-ênfase. Por exemplo, na reprodução dos resultados medidos das respostas biauriculares ou mesmo das gravações, feitas com o auxílio da cabeça artificial, das listas de palavras utilizadas nos testes de articulação, é necessário fazer uma filtragem em frequência de modo a equalizar o fone de ouvido. Essa correção, contudo, não constitui uma pré-ênfase — no sentido de que não precisa ser aplicada ao sinal de excitação —, mas sim uma “pós-ênfase”. Como o fone de ouvido a ser utilizado nas aurilizações já estava definido, solicitou-se ao Laboratório de Eletroacústica do INMETRO que levantasse a resposta em frequência do mesmo, para fins de equalização. Esse levantamento foi feito com auxílio de um ouvido artificial, para os dois canais do fone.

A Fig. 4.10 mostra o módulo da função de transferência obtida para os dois canais dos fones de ouvido.

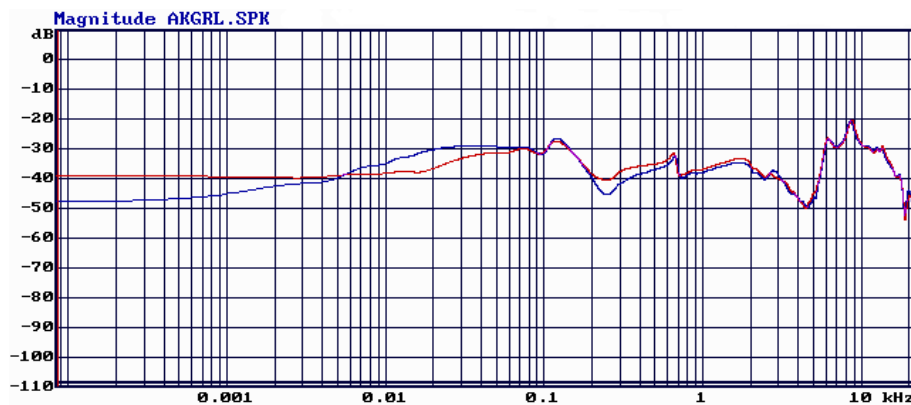


Figura 4.10: Módulo da função de transferência dos fones de ouvido utilizados.

4.7 Preparação das listas de monossílabos

Conforme mencionado na Seção 4.1, optou-se por fazer testes de articulação utilizando quatro listas contendo 20 monossílabos cada. A partir de um banco de dados com 226 monossílabos, disponibilizados pelo LAENA, foram compostas 15 listas. Há, entretanto, alguns monossílabos repetidos nas listas, mas jamais um monossílabo é repetido *dentro* de uma mesma lista. Os monossílabos utilizados para montagem das listas foram gravados na câmara anecóica do LAENA, por uma oradora do sexo feminino com boa dicção. Como no nível de ensino fundamental a maioria de professores é do sexo feminino — nas turmas das escolas ensaiadas *todos* os docentes eram do sexo feminino —, considerou-se essas gravações as mais adequadas para o uso a que se destinaram.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresenta as listas completas, na ordem em que são apresentados os monossílabos, para as 15 listas disponíveis, utilizadas na pesquisa.

Tabela 4.1: Listas (1 a 8) de vinte monossílabos elaboradas para condução dos testes de articulação em salas de aula do ensino fundamental.

	LISTA 1	LISTA 2	LISTA 3	LISTA 4	LISTA 5	LISTA 6	LISTA 7	LISTA 8
01	CHÃO	MEL	FÃ	LER	TER	SIM	MAU	CRER
02	NUS	CRUZ	NÃO	PUM	PÓ	TIL	HÁ	FAZ
03	MÃE	VÉU	BOI	TEM	CÉU	VOU	PÓ	GEL
04	FLOR	LÁ	OI	TOM	PUS	BEM	RÉU	LAR
05	NÓS	XIS	MAR	PÃO	SEM	CHÁ	SOM	MAR
06	TU	VIR	POR	BIS	PAU	DÓ	TREM	NÓ
07	BOM	PRA	LÓ	SUL	CHÁ	FLOR	ZÁS	PUS
08	COR	LUZ	CHÃO	VÊ	LAR	JÁ	BOI	RIR
09	GRÃO	SOL	JÓ	FLU	TIL	LUZ	COR	TAL
10	VAI	UM	PÁ	DEI	VÃO	NEM	DOR	VAN
11	DAR	QUIS	TEU	DEUS	GÁS	PÉ	GÁS	BRIM
12	DOIS	DEZ	ROL	GIZ	QUEM	RÃ	LÃ	CRU
13	NEI	VÔ	TRÊS	REI	SER	SOL	MÃO	FÉ
14	FIM	DOR	CAI	SÉ	AR	TOM	XÔ	GIM
15	FÉ	MÃO	SÃO	BEL	VI	VOZ	POR	LEI
16	TRI	NUM	PAI	PAR	ZÉ	BIS	RIM	MEL
17	RIM	RÃ	SOM	VOZ	TAL	CHÃO	SUL	NU
18	FLA	EU	IR	TREM	SÓ	DOM	TRÊS	QUAL
19	COM	MIL	JÁ	SEIS	QUAL	FUI	ZÉ	ROL
20	DÓ	NÉ	BEM	AI	SIM	JUS	BOM	QUER

O número de listas de ditado e o número de monossílabos em cada lista foi definido *ad hoc* (4 listas com 20 monossílabos cada), de modo a não cansar demasiadamente os alunos e baseado também em trabalhos anteriores, principalmente os estudos de escolas realizados pelos pesquisadores do LAENA, descrito por Müller [54]. Para os testes de articulação, adotou-se como critério não repetir um mesmo monossílabo na mesma sala e, para tanto, combinou-se as listas de forma a obe-

decer esse critério. Resultando, para quatro listas, no conjunto de 80 monossílabos diferentes em cada uma das salas. Na geração do sinal de cada lista, entre cada monossílabo foi acrescentado um espaçamento de tempo apropriado (entre 4 e 7 segundos) de acordo com o nível escolar da turma, para que os alunos tivessem o tempo necessário para anotar o que foi ouvido sem comprometer a compreensão do próximo monossílabo. Essa folga entre os monossílabos foi maior para as crianças do terceiro ano (seis segundos) por não estarem ainda completamente alfabetizadas e precisarem de mais tempo para escrever o ditado. Um protocolo anterior desenvolvido no LAENA, por Müller [54], para avaliação de inteligibilidade de duas salas de aula em duas escolas distintas, foi utilizado como base. Contudo, no trabalho desenvolvido no LAENA o intervalo entre os monossílabos foi mantido constante.

Tabela 4.2: Listas (9 a 15) de vinte monossílabos elaboradas para condução dos testes de articulação em salas de aula do ensino fundamental.

	LISTA 9	LISTA 10	LISTA 11	LISTA 12	LISTA 13	LISTA 14	LISTA 15
01	VAI	BOI	DIZ	LAR	AO	FLÁ	PAN
02	CÁ	PRÓ	FLOR	DOIS	TRIZ	AOS	AS
03	CRUZ	NÓ	MIM	LUZ	FREI	GAL	TÁO
04	TEU	DÓ	GÁS	GEL	PI	POIS	BÁ
05	GIZ	CRUZ	SER	REI	RÉ	GRIL	PAZ
06	LER	FINS	LÓ	LÁ	GRIL	LÁ	VAU
07	MÊS	MAIS	FIZ	SAL	LÉO	VER	PÓS
08	PÁ	VEZ	JÁS	LI	BI	RES	BRÁS
09	QUE	OI	NÓS	FÁ	CÃO	LHE	PRÁ
10	RUM	XIS	MI	PRÉ	LHO	CAOS	RUI
11	TER	CÉU	FÃ	OU	MAS	MÁ	CAIS
12	VÃO	PLÁ	LEU	GIZ	CÓS	SEI	SEU
13	CAL	NOZ	VÔ	PÓ	MOR	MÓ	CHÁ
14	DAR	ZÁS	MIL	LER	SÓIS	CRÊ	SI
15	FIM	VIM	FOI	FIM	NA	EM	CRIS
16	GOL	VIR	POR	NU	DEU	SOU	EM
17	LHA	VOZ	PÃO	DÁ	NÔ	NAU	DÊ
18	MEU	VÓ	GRAU	IR	TEUS	Ó	TEEM
19	PAI	TIL	PÉ	NUM	OS	TEZ	UNS
20	QUEM	TÁ	PAU	RUM	FEL	DOU	VIL

Os testes de articulação, para a obtenção do índice de articulação, são conduzidos utilizando-se como fonte sonora o orador artificial que, como já mencionado, reproduz mais fielmente a direcionalidade de um orador humano. O orador, que, como visto na Fig. 4.1, constitui em essência um sistema de altofalantes, é alimentado com um sinal contendo listas de palavras monossilábicas a intervalos regulares. Isso garante, na reprodução, quatro fatores importantes. O primeiro, por tratar-se de gravação anecóica, suprime a influência da sala de gravação, resultando em que, na reprodução das listas na sala de aula, somente haja influência da acústica interna da sala em estudo. O segundo fator, deve-se à boa dicção dos profissionais que

gravaram a lista, não incluindo, portanto, eventuais vícios de dicção a interferirem na avaliação da inteligibilidade, bem como o sotaque que é o mesmo da região das escolas. O terceiro fator é poder-se ter controle sobre os *níveis sonoros* em que as listas serão reproduzidas, mantendo-se assim uma uniformidade. Por fim, o quarto fator diz respeito ao fato de que com o orador artificial não há a possibilidade de leitura labial, o que poderia mascarar os resultados.

Uma lista modelo, contendo apenas quatro palavras monossilábicas, foi também preparada para ser apresentada como treino às turmas. Aqui, os monossílabos utilizados não constam das 15 listas elaboradas para os testes de articulação nas salas avaliadas (ver Tabela 4.3).

Tabela 4.3: Lista com quatro monossílabos para familiarizar os alunos com o ditado.

Lista modelo				
Monossílabos	TRAI	VER	VIU	TRAZ

Capítulo 5

Ensaio em campo

Nos ensaios experimentais em campo, para o levantamento das respostas impulsivas e determinação dos índices de articulação em salas de aula, foram selecionadas duas escolas públicas com turmas de ensino fundamental, uma no município de Nova Friburgo e outra no município de Cordeiro, ambas no estado do Rio de Janeiro. Um total de dez salas de aula, com turmas entre o terceiro e o sexto anos, participaram dos ensaios. Cumpre relatar que em todas as salas avaliadas o professor era do sexo feminino, o que nos levou a trabalhar com as listas anecóicas geradas a partir da voz feminina e considerar essa informação também para o cálculo do STI, visto mais adiante.

Em cada sala de aula, todas essencialmente retangulares, foram dadas, inicialmente, explicações aos alunos quanto aos testes dos quais eles participariam, bem como apresentada a lista modelo. Em seguida, foram executadas quatro listas de vinte monossílabos cada, proferidas pelo orador artificial, de acordo com o que estabelece a metodologia proposta.

A principal vantagem da utilização do orador artificial está na impossibilidade de leitura labial por parte dos alunos que participam dos testes de articulação, valorizando assim o som escutado. Foram utilizadas três posições para localização da cabeça artificial infantil na sala (ver Fig. 5.1). Em cada uma dessas posições a cabeça artificial infantil gravou cada uma das listas de ditado, sendo uma lista na posição 1 (P1), duas na posição 2 (P2) e uma na posição 3 (P3). O arquivo contendo a gravação dos ditados servirá para a produção da gravação biauricular modificada prevista na metodologia. Também, para as mesmas posições da cabeça artificial infantil foram gravados os sinais da varredura em frequência, para posterior processamento e geração da auralização. As gravações biauriculares de respostas impulsivas resultaram de médias de cinco varreduras, para cada uma das posições da cabeça artificial infantil.

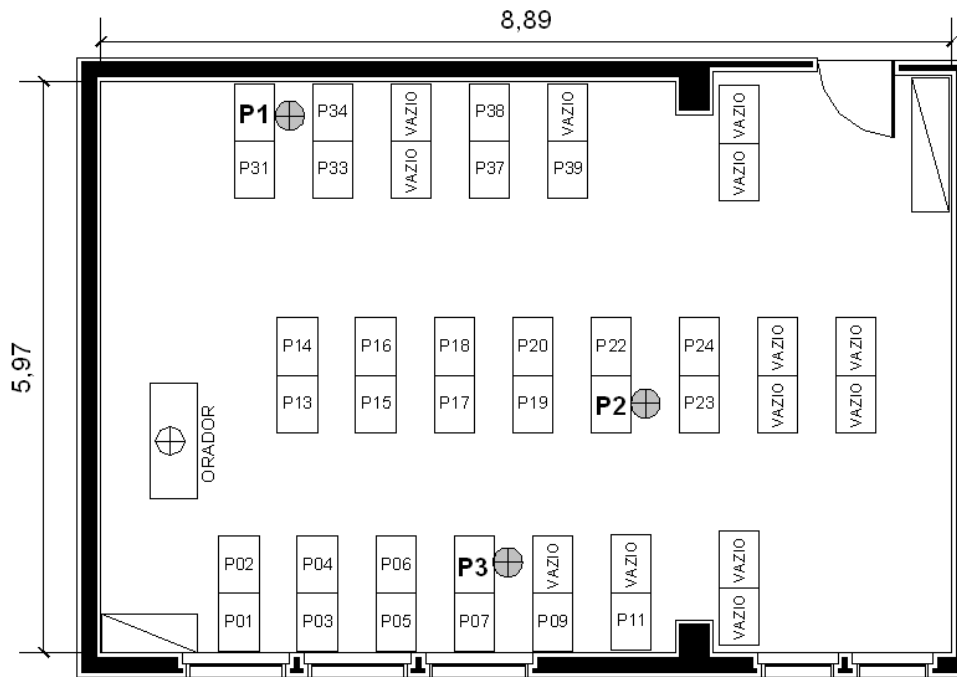


Figura 5.1: Planta baixa de uma dada sala de aula (S07T301) com indicação das três posições (P1, P2 e P3) onde posicionou-se a cabeça artificial infantil durante os ensaios.

5.1 Testes de articulação

A Fig. 5.2 ilustra o esquema geral dos testes de articulação. O orador artificial, à direita, emite o sinal sonoro contendo as listas de monossílabos e a cabeça artificial infantil (CAI), os registra, enviando os sinais ao computador.

Durante os ensaios, cada turma apresentou um comportamento distinto. Algumas se mostraram bem receptivas e calmas e outras mais agitadas e barulhentas. Notou-se uma analogia deste comportamento com a interação entre os alunos e a professora da turma, sendo mais tranquilas as medições realizadas nas turmas onde os alunos mantinham uma boa relação com a professora.

Também houve divergência no comportamento de alunos numa mesma turma. Alguns se mostraram interessados e curiosos quanto ao motivo dos testes, a presença do orador artificial e das cabeças artificiais, nunca antes vistos, mas outros apresentaram certa relutância em colaborar com o ensaio, repetindo as palavras do ditado, mesmo depois da explicação do procedimento onde reiterou-se para que ninguém repetisse os sons escutados de modo a não comprometer os resultados.

Para fins de comparação de resultados, também foi realizado ensaio com gravação biauricular das listas e as respostas impulsivas biauriculares utilizando-se uma cabeça artificial de padrão adulto (CAA), em uma única sala de aula.

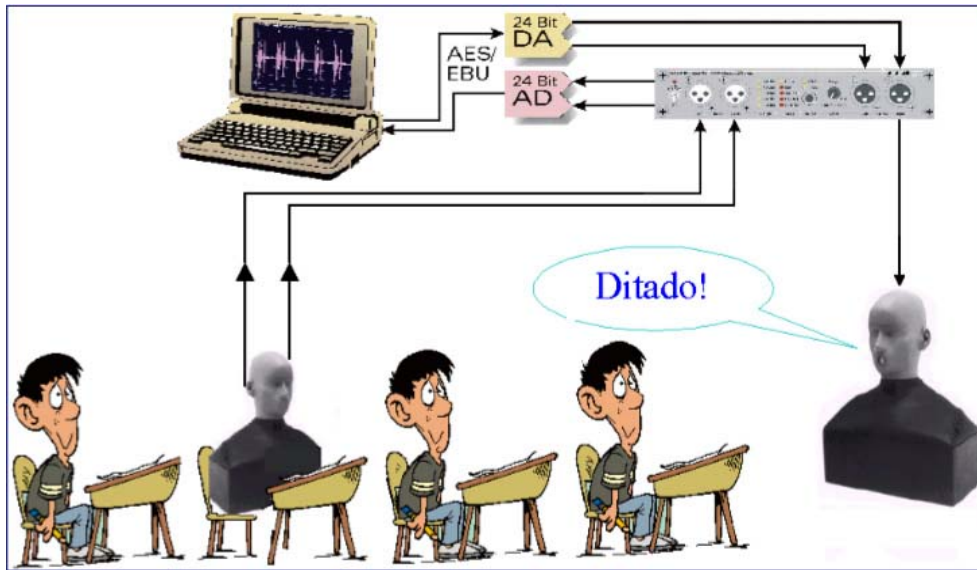


Figura 5.2: Ilustração dos testes de articulação conduzidos em sala de aula com emissão e gravação simultâneas.

5.2 Procedimento de correção dos ditados

Após a realização dos testes de articulação reais, em dez salas de aula, fez-se a correção de todos os ditados anotados pelos alunos que participaram dos ensaios.

Para verificação dos acertos dos ditados necessitou-se estabelecer alguns critérios na correção, pois não nos interessavam eventuais erros de ortografia e sim o acerto do fonema (som) escutado pelos alunos. Como os testes de articulação reais foram feitos em turmas do ensino fundamental da rede pública, com alunos que não estavam totalmente alfabetizados, ignoramos, onde coube, faltas e trocas de acentuação, assim como troca de letras que não alterassem o entendimento do monossílabo, e os eventuais erros devido ao sotaque “carioca” da locutora que gravou os monossílabos na câmara anecóica. Com relação aos fonemas detectados pelos alunos devido ao sotaque podemos citar, por exemplo, que no lugar do monossílabo PAZ algumas crianças escreveram PAIS. Este e outros exemplos estão listados na Tabela 5.1.

Uma dificuldade encontrada, durante a correção dos ditados, foi entender a grafia de algumas crianças. Para resolver o problema comparamos em todas as palavras as letras anotadas pelas crianças nas folhas de ditado para conseguir identificar, com certeza, qual foi o monossílabo que o aluno ouviu e anotou.

Na correção dos ditados, realizados pelos alunos durante o teste de articulação, notou-se que alguns estudantes apresentaram médias notavelmente abaixo do resto de suas respectivas turmas, apontando talvez algum tipo de problema ou deficiência do aluno. Em seguida, ocorreu uma reunião com todas as professoras das turmas onde os testes foram realizados para apresentar o desempenho dos estudantes. Em

alguns casos, houve a confirmação de problema ou deficiência do aluno, sinalizado no seu desempenho inferior ao dos demais colegas nos ditados realizados. A reunião mostrou-se importante para o andamento da pesquisa uma vez que precisávamos avaliar os resultados dos ensaios principalmente de alunos que obtiveram um percentual baixo em relação aos demais. Numa dada turma, por exemplo, um deles, em particular, sentava-se na cadeira localizada na frente do orador artificial e o resultado foi um índice de articulação baixíssimo, o que nos chamou atenção e por isso foi levantada à hipótese de algum distúrbio relativo ao aprendizado ou a um problema auditivo.

Tabela 5.1: Exemplos de erros de ortografia ignorados na correção dos ditados.

Monossílabos	Erros ortográficos ignorados
AO	AU, AL
BEL	BÉL, BÉU, BEU, BEO
BIS	BIZ, BÍS
CÉU	CEU, SÉU
COS	CÓS, COZ, COIS, COES
FAZ	FAIZ, FAIS, FAS
FEL	FEU, FÉU
GÁS	GAIS, GAIZ, GAZ
GEL	GEU, JEL, JEU, GÉU
GIM	GIN, JIM
HÁ	A, AH
JUS	JUIS, JUIZ
LÃ	LAM, LAN
LÉO	LEU, LÉU, LEO
LUZ	LUIZ, LUIS
MÁS	MAIS, MAIX
MEL	MEU, MÉL
QUAL	QUAU, CUAL, CUAU
RÃ	RAM, RAN
RÉU	REL, RÉO
ROL	ROU, HALL, RÓL
SOL	SÓU
SÓS	SOIS, SOES, SOIZ
TAL	TAU, TAO, TÁU
TEUS	TELS, TEUZ
TIL	TIU, TIO
TRÊS	TREIS, TREIZ
TRIZ	TRIS
VAN	VAM, VÃ
VOZ	VOIZ, VÓIS
XÔ	CHO, CHÔ
ZÁS	ZAS, SAS, ZAIS, SAIS
ZÉ	SÉ

As professoras também tiveram dúvidas quanto aos bons resultados obtidos por determinados alunos e pediram que estes fossem incluídos na segunda etapa dos testes, os testes de articulação virtuais. A fim de atender à demanda das professoras

esses alunos foram incluídos na listagem daqueles que participariam dos testes de articulação virtuais para que fosse descartada até a hipótese de cópia, visto que nessa etapa o aluno ficaria sozinho para reproduzir o ditado e não mais ao lado de um colega que às vezes poderia estar repetindo, mesmo que em voz baixa, o som ouvido ao anotar o monossílabo.

Finalizada a etapa de correção das listas de ditados, todos os resultados foram tabelados e os índices de articulação das salas avaliadas foram calculados. Os valores apurados são apresentados mais adiante no Capítulo 7.

5.3 Respostas impulsivas biauriculares

Como dito anteriormente, para cada posição da cabeça artificial infantil, após o teste de articulação, para uma dada lista de monossílabos, foram emitidos pelo orador artificial cinco *sweeps* e sua média registrada. Em seguida, a cabeça artificial infantil era trocada de posição dentro da sala. A Fig. 5.3 ilustra a média das gravações biauriculares de um sinal de varredura, para uma sala de aula e uma posição da cabeça artificial (sala S07T301, posição 2).

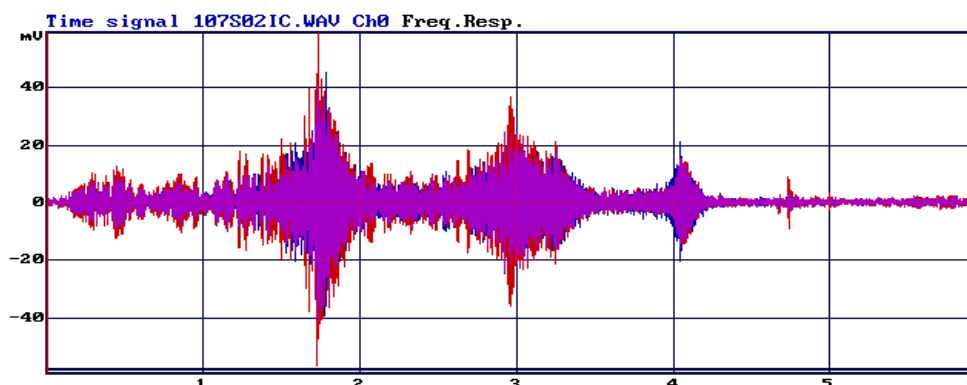


Figura 5.3: Média de cinco gravações biauriculares do sweep em uma sala, para uma posição da cabeça artificial infantil. Observe que há duas cores, correspondendo aos dois canais de microfone.

De posse dos arquivos contendo a média de cinco sweeps, para cada posição da cabeça artificial infantil, podemos obter a resposta impulsiva biauricular para a posição e calcular alguns parâmetros acústicos como, por exemplo, o STI, que será apresentado na Seção 7.7.

5.4 Ruído de fundo

O ruído de fundo foi medido em cada sala, obtendo-se o nível equivalente em dB(A), LAeq, com um medidor de nível de pressão sonora do Tipo 1, apenas como referência.

A Tabela 5.2 mostra os valores, em dB(A), dos níveis equivalentes, avaliados em 60 segundos, em cada uma das dez salas de aula.

Tabela 5.2: Níveis equivalentes de ruído, medidos nas dez salas de aula avaliadas.

Sala	Nível (dBA)	Sala	Nível (dBA)
S04T402	57	S10T502	57
S05T303	52	S11T501	59
S06T401	56	S15T302	58
S07T301	58	S01T601	58
S09T503	55	S05T605	57

Contudo, o sinal de ruído que efetivamente interessa neste trabalho é aquele registrado pela cabeça artificial infantil durante os testes de articulação. Esse ruído de fundo pode ser extraído das gravações biauriculares originais, realizadas durante os testes de articulação.

A Fig. 5.4 ilustra a gravação biauricular de uma lista durante um teste de articulação. Observe que os picos no sinal correspondem aos monossílabos emitidos pelo orador artificial, enquanto o restante corresponde ao ruído de fundo presente na sala. Nas partes inicial e final do sinal há pequenos registros musicais, com o intuito de avisar aos alunos o início e o fim da lista.

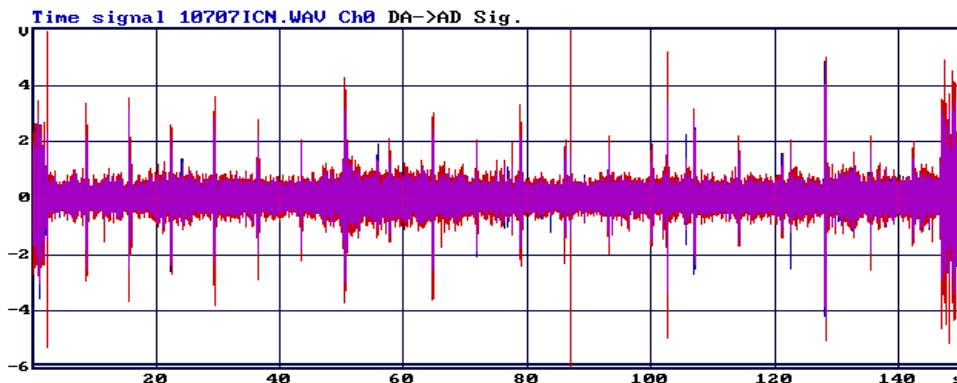


Figura 5.4: Exemplo de gravação biauricular durante um teste de articulação conduzido em uma sala de aula (sala S07T301, Lista 07, posição 2).

5.5 Testes de articulação virtuais

Após os testes de articulação reais, realizados em dez salas de aula, a tabulação dos resultados e a geração dos sinais biauriculares das gravações biauriculares modificadas e aurilizações, para as mesmas listas ouvidas nessas salas, foram conduzidos os *testes de articulação virtuais*. Estes foram realizados a partir das gravações biauriculares modificadas e aurilizações, cujo processamento está discutido no Capítulo 6, Seção 6.2.

Como dito anteriormente, durante os testes de articulação reais, quatro listas foram emitidas em cada sala de aula ensaiada. Em cada uma das três posições escolhidas para a cabeça artificial, foi gravada a média das respostas impulsivas biauriculares. Nas três posições da cabeça artificial, além das gravações das médias das respostas impulsivas biauriculares, foi registrada na primeira posição da cabeça artificial a primeira lista de monossílabos emitida pelo orador artificial; na segunda posição, foram registradas a segunda e a terceira listas; e na terceira posição foi registrada a quarta lista emitida na sala.

O teste de articulação virtual como proposto na Seção 4.1 deste trabalho, consiste na realização de ditados através do uso de fones de ouvido, onde listas de monossílabos são escutadas e anotadas por alunos. A fim de verificar a viabilidade da metodologia proposta, os testes de articulação virtuais foram realizados com um número reduzido de alunos (entre 20 e 40% por turma) que participaram dos testes de articulação reais.

Além dos alunos do IENF que participaram dos testes de articulação reais, crianças que *não pertenciam* às turmas avaliadas e, portanto, não participaram dos testes de articulação reais, bem como alguns adultos, alunos de graduação do Instituto Politécnico da UERJ, participaram dos testes de articulação virtuais.

Para realização dos testes de articulação virtuais com os alunos do IENF, foi escolhido na escola um local com o mínimo de interferência de ruído, para receber individualmente cada um dos alunos que participaram dos testes de articulação reais – a biblioteca. Para esses testes foram selecionados, além daqueles cuja participação foi solicitada pela respectiva professora, alunos que durante os testes de articulação reais estiveram próximos a uma das três posições da cabeça artificial infantil na sala. Já as crianças que não participaram dos testes de articulação reais e os adultos, realizaram os testes de articulação virtuais no LIDAV.

A condução dos testes de articulação virtuais se deu da seguinte forma.

1. Os alunos selecionados foram convidados a estarem presentes em horários pré-definidos no local escolhido para realização dos testes de articulação virtuais (biblioteca da escola, para alunos do IENF, e LIDAV para os demais).
2. No local do ensaio foi montada a instrumentação para realização dos testes de articulação virtuais (o Laptop Lenovo com entrada PCMCIA e o software de processamento de sinais Monkey Forest; uma placa de comunicação de sinais, RME Hammerfall DSP CardBus; uma interface de sinais e potência CMF22 Front End; e fones de ouvido).
3. Para a condução dos testes de articulação virtuais com gravação biauricular modificada, foi utilizada uma das listas gravadas na segunda posição da cabeça artificial na sala. Já nos testes de articulação virtuais com aurilização,

utilizou-se, a partir do processamento das gravações das respostas impulsivas biauriculares, para cada uma das três posições da cabeça artificial, a geração dos sinais biauriculares com as outras três listas escutadas na sala.

4. Ao chegar no local agendado, o aluno, criança ou adulto, foi posicionado em uma mesa. Sobre a mesma havia fones de ouvido e fichas para preenchimento de listas de ditados. As listas foram as mesmas utilizadas nas respectivas salas de aula de origem do sinal escutado nos testes de articulação reais. Já as crianças não pertencentes às turmas das escolas avaliadas, preencheram doze fichas de ditado, cada. O tempo médio de ensaio, para preenchimento dessas doze listas, foi de aproximadamente 35 minutos.
5. Após a realização do teste de articulação virtual os ditados foram recolhidos e o aluno dispensado. Enquanto os ensaios com os alunos do IENF prosseguiam, os ditados realizados nos testes de articulação virtuais eram corrigidos e comparados com os resultados desses alunos nos testes de articulação reais. Já nos testes realizados no LIDAV a correção dos ditados foi realizada após os testes de articulação virtuais.
6. No IENF os testes de articulação virtuais foram realizados de acordo com a disponibilidade das turmas e agenda da escola. Cada ensaio *offline* durou entre 15 e 20 minutos por aluno (dependendo do intervalo entre os monossílabos de uma lista, diferente entre turmas devido ao grau de escolaridade).

Durante a condução dos testes de articulação virtuais a partir da aurilização com cabeça artificial infantil houve um episódio bem significativo. Na passagem da lista de teste com os fones de ouvido, sempre era perguntado à criança se ela estava ouvindo o ditado pelos fones de ouvido, visando garantir que todos os cabos estivessem devidamente conectados e o teste se fizesse válido. Todavia, mais de uma vez a resposta da criança em teste era que *não*, o que nos levava a re-checkar todo o equipamento. Como a criança continuasse a indicar não estar escutando, foi necessário algum tempo para que a questão fosse compreendida: o que o aluno estava querendo dizer é que não ouvia o ditado *pelos fones* mas sim que o som vinha *de fora*, ou seja, a sensação auditiva era autenticamente tridimensional, como seria de se esperar de uma consistente realidade virtual acústica.

Os resultados dos testes de articulação reais e virtuais, bem como sua comparação, são apresentados no Capítulo 7.

Capítulo 6

Ensaio em laboratório

Este capítulo descreve as técnicas e os procedimentos para a geração, em laboratório, das aurilizações. Na Seção 6.1 descreve-se o procedimento inicial para o tratamento do ruído de fundo, essencial para dar às aurilizações a fidedignidade necessária.

Como mencionado, dois tipos de aurilização foram processadas: a gravação biauricular modificada e a aurilização. A aurilização foi um dos focos principais da atenção deste trabalho. Foram produzidas ao todo 29 aurilizações a partir das respostas impulsivas biauriculares gravadas com a cabeça artificial infantil e três com a cabeça artificial de adulto. Um exemplo do procedimento para a obtenção da aurilização está descrito na Seção 6.2.2.

Foram também geradas em laboratório um total de dez gravações biauriculares modificadas a partir de gravações das listas, reproduzidas em sala, com a cabeça artificial infantil e uma com a cabeça artificial de adulto. A Seção 6.2.1 apresenta o procedimento para a geração de gravações biauriculares modificadas.

6.1 Processamento do ruído de fundo

Como previsto na metodologia, para compor os arquivos de gravações biauriculares das listas de monossílabos a partir da resposta impulsiva de uma dada sala de aula, é necessário além das respostas impulsivas e das listas anecóicas, um arquivo contendo o ruído de fundo a ser adicionado.

Uma possibilidade seria simplesmente gravar o ruído de fundo na sala com duração equivalente à dos sinais com as listas e adicioná-lo ao sinal gerado em laboratório. Este procedimento, contudo, teria alguns inconvenientes. Se o ruído de fundo for gravado na ausência das crianças, ou seja, registrando, basicamente o ruído oriundo do exterior, seria bem diferente do que efetivamente ocorreu durante os testes de articulação reais, onde as crianças, naturalmente irrequietas, introduzem um ruído adicional. Se, por outro lado, fosse feita uma gravação de ruído de fundo com a presença das crianças na sala, tomaria um tempo adicional ao ensaio, talvez não

assimiláveis pelas mesmas crianças, além do fato de que eventos transientes (como a passagem de tráfego ou gritos no pátio da escola) resultariam distintos nos ensaios reais e virtuais.

Para resolver essa questão de modo a reproduzir nos testes virtuais a situação presente nos testes reais, o ruído de fundo foi extraído dos intervalos entre monossílabos das gravações biauriculares das listas gravadas nas salas de aula durante os testes de articulação reais. A Fig. 6.1 mostra o sinal da gravação biauricular da lista 07 na sala 7 do IENF, na posição 2 da cabeça artificial infantil, a ser utilizado como exemplo do procedimento.

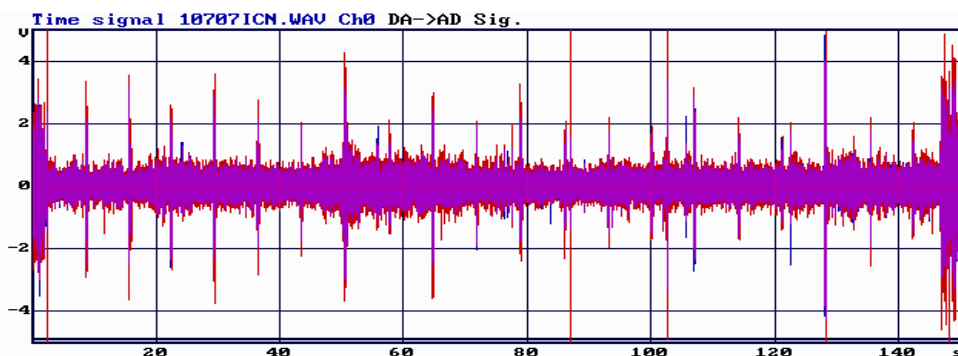


Figura 6.1: Sinal, em dois canais, da gravação biauricular da lista 07 na sala 7 do IENF, na posição 2 da cabeça artificial infantil. Os picos correspondem aos monossílabos.

A Fig. 6.2 mostra o sinal do ruído extraído da gravação biauricular durante um teste de articulação numa dada posição. Nesse caso, apenas um trecho de ruído (entre o terceiro e o quarto monossílabos) é apresentado. Observe que o intervalo de tempo indicado na figura é de aproximadamente 4,5 s. Esse procedimento de corte é repetido para todos os intervalos entre os monossílabos (um total de 19 intervalos).

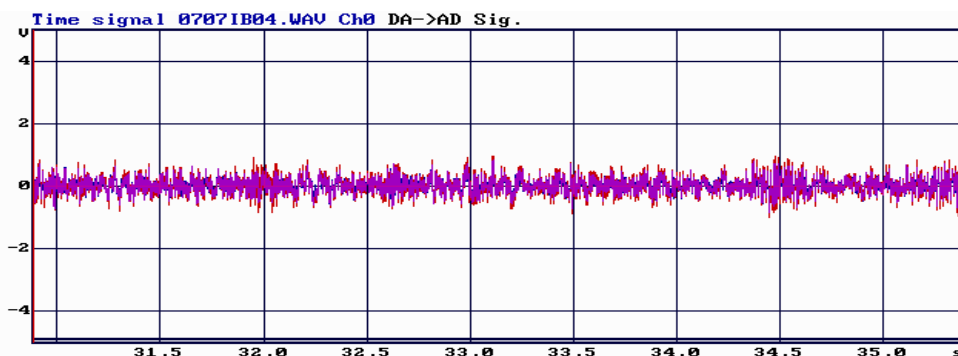


Figura 6.2: Trecho do sinal, entre o terceiro e o quarto monossílabos da lista 07, mostrado na Fig. 6.1, contendo unicamente ruído de fundo.

Em seguida, é aplicada, a cada trecho, uma janela “Tukey” a 95%, de modo a

evitar o efeito de “estalos” que ocorreria se simplesmente fosse efetuada a junção dos trechos. O resultado é mostrado na Fig. 6.3, que apresenta uma pequena atenuação nas extremidades do sinal, devido ao efeito da janela aplicada.

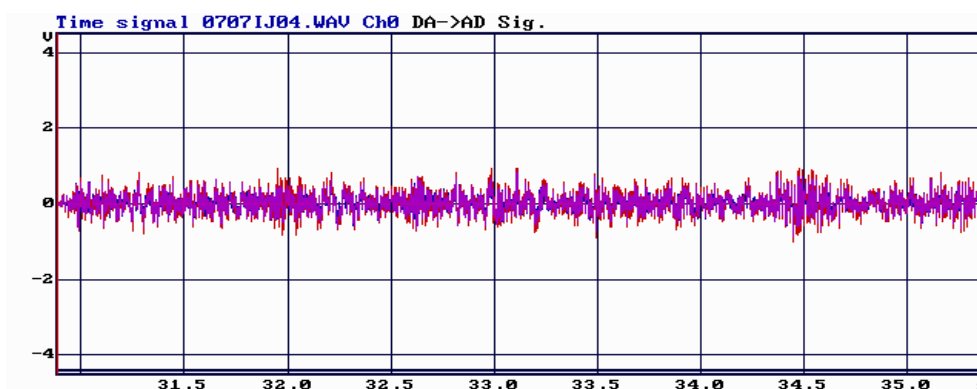


Figura 6.3: Sinal mostrado na Fig. 6.2 após a aplicação da janela Tukey.

Finalmente, os trechos são recompostos pela ordem, como numa composição férrea, constituindo o sinal final, resultante do procedimento de corte, indicado na Fig. 6.4. Os picos observados não são oriundos dos monossílabos, constituindo eventos ruidosos. O sinal obtido é utilizado para compor as listas para a aurilização.

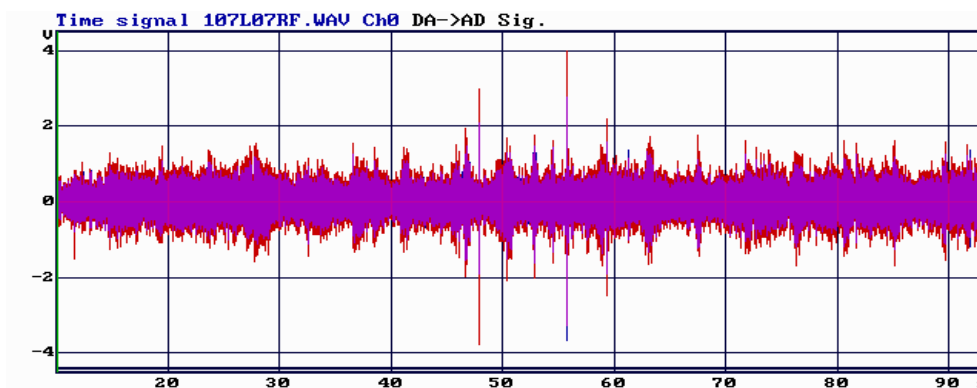


Figura 6.4: Ruído de fundo extraído da gravação biauricular por meio do procedimento de corte, após a recomposição dos trechos como os da Fig. 6.3.

6.2 Realidade virtual acústica

A geração de realidade virtual acústica, ou aurilização, produzida em laboratório, é uma das tarefas mais importantes desta pesquisa. Como já mencionado, dois tipos de procedimentos foram realizados: as assim chamadas gravações biauriculares modificadas e as aurilizações. A rigor, a gravação biauricular modificada consiste

simplesmente de uma gravação biauricular em sala de aula durante um teste de articulação, devidamente compensada para os fones de ouvido que serão utilizados pelas crianças nos testes de articulação virtuais. Já a aurilização constitui efetivamente uma realidade virtual acústica.

A seguir, detalham-se os procedimentos utilizados para a geração das aurilizações.

6.2.1 Gravação biauricular modificada

Como dito antes, os arquivos resultantes da convolução das gravações, realizadas pela cabeça artificial infantil (CAI) durante os testes de articulação reais, com a resposta impulsiva biauricular dos fones de ouvido, são aqui denominados *gravações biauriculares modificadas*. Esses arquivos têm, basicamente, a função de verificar a adequação da cabeça artificial infantil para o registro do que é ouvido por uma criança, por melhor representar as funções de transferência associadas à cabeça infantil. Os resultados da gravação biauricular modificada foram aplicados a um reduzido número de crianças para verificação da adequação da cabeça artificial infantil.

A Fig. 6.5 reproduz os sinais (dois canais) da gravação biauricular original da lista 07, na sala 7, na posição 2 da cabeça artificial infantil, e será tomada como modelo para exemplificar o procedimento para a geração das gravações biauriculares modificadas.

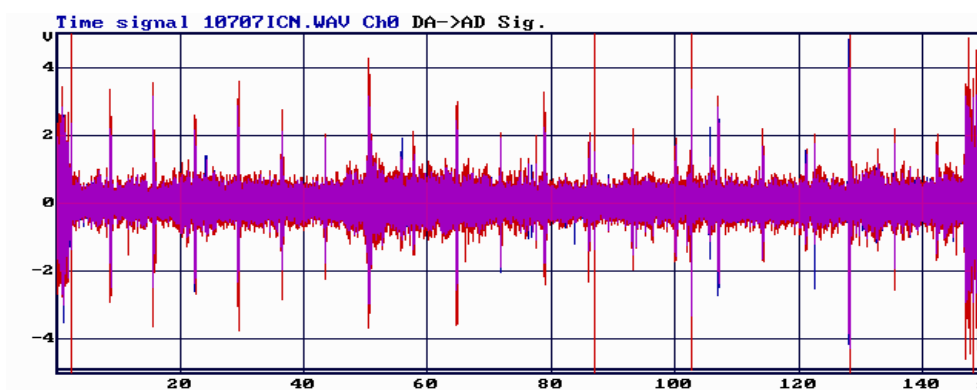


Figura 6.5: Sinal da gravação biauricular original da lista 07, na sala 7 do IENF, na posição 2 da cabeça artificial infantil.

A Fig. 6.6 mostra as curvas de resposta em frequência (módulo) dos dois canais dos fones de ouvido, utilizados neste trabalho. Como já mencionado, essas curvas foram levantadas no Laboratório de Eletroacústica da DIAVI/INMETRO com o auxílio de um ouvido artificial, em procedimento atendendo à norma IEC 268, de 1996 [66]. Constituem, portanto, o módulo da função de transferência dos fones de ouvido, para os dois canais.

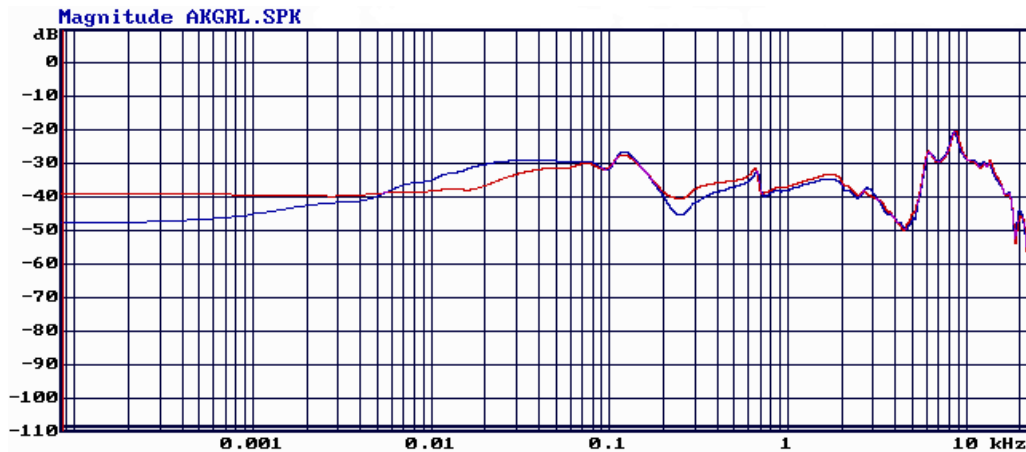


Figura 6.6: Módulo da função de transferência dos fones de ouvido utilizados, dois canais.

Em seguida, a transformada de Fourier (FFT) dos sinais mostrados na Fig. 6.5 é multiplicada pelos sinais apresentados na Fig. 6.6 e, ao resultado, é aplicada a transformada inversa de Fourier (IFFT), resultando nos sinais temporais apresentados na Fig. 6.7, que constitui, então, uma gravação biauricular modificada. Esse procedimento, que constitui uma convolução no domínio do tempo, foi realizado para todos os sinais de listas gravados em sala de aula que vieram a ser aplicados a alunos em testes de articulação virtuais, com utilização dos fones de ouvido.

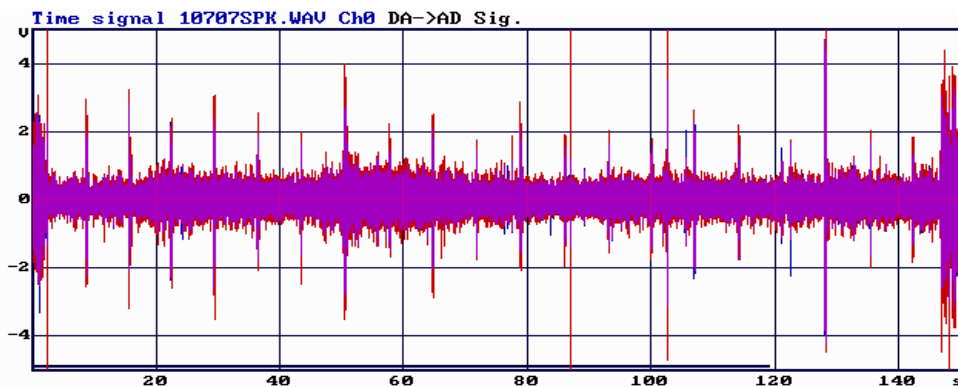


Figura 6.7: Sinal resultante da convolução do sinal da Fig. 6.5 com a resposta impulsiva biauricular dos fones de ouvido.

Naturalmente, devido ao fato de que as funções de transferência dos fones de ouvido, Fig. 6.6, apresentarem comportamento com pequenas variações, os sinais mostrados nas Figs. 6.5 e 6.7 não apresentam diferenças significativas, embora se possam percebê-las ao ouvido.

6.2.2 Aurilização

A aurilização é realizada a partir de um procedimento em quatro etapas. A Fig. 6.8 mostra o resultado da gravação biauricular da média de cinco varreduras em um determinado ponto numa dada sala de aula (sala S07T301, posição 2, da cabeça artificial infantil) que será utilizada como exemplo para ilustrar o procedimento.

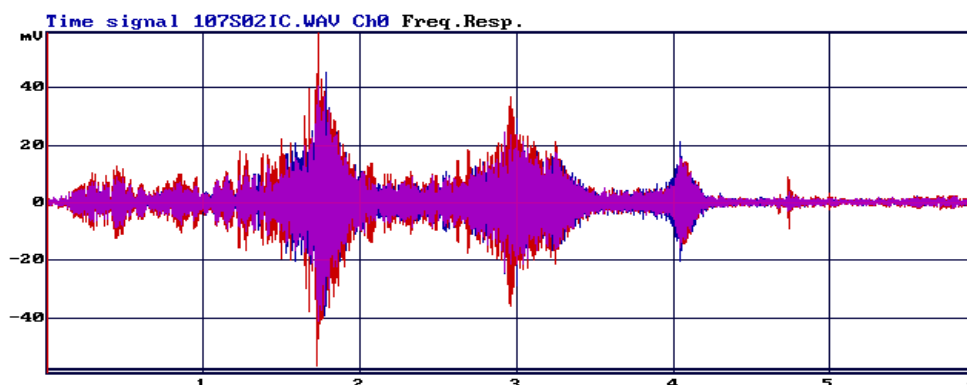


Figura 6.8: Gravação biauricular original da varredura na sala S07T301, posição 2, da cabeça artificial infantil.

A primeira etapa consiste em fazer a deconvolução dos sinais biauriculares com o sinal de varredura enviado ao orador artificial com pré-ênfase, de modo a extrair a resposta impulsiva biauricular da sala, naquele ponto, mostrado na Fig. 6.9.

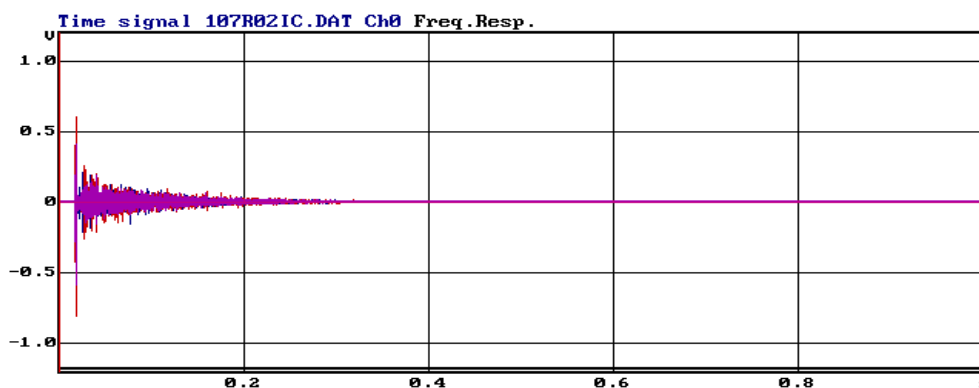


Figura 6.9: Resposta impulsiva biauricular da sala S07T301, posição 2, obtida após a deconvolução.

Em seguida, é feita a convolução de cada resposta impulsiva biauricular com cada um dos sinais das listas anecóicas que foram utilizadas nos testes de articulação reais naquela sala de aula. O resultado, mostrado na Fig. 6.10, é um sinal que indica como a lista é ouvida na sala, com sua reverberação característica, porém sem o ruído de fundo.

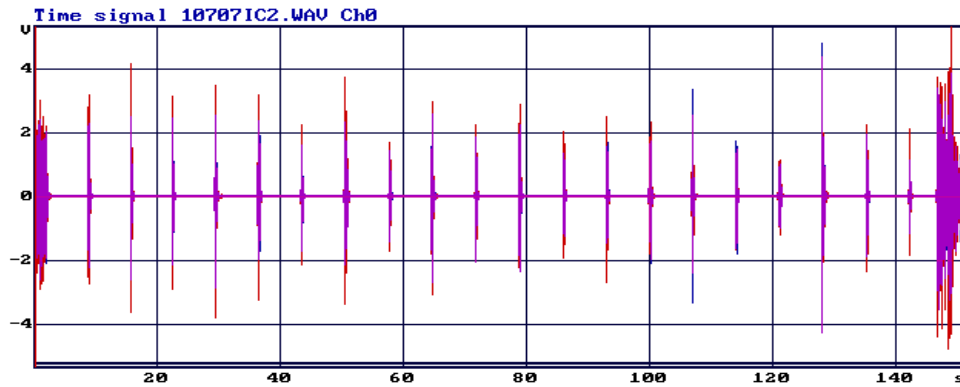


Figura 6.10: Resposta impulsiva convoluída com uma lista anecóica.

Então, é adicionado aos resultados obtidos, como o mostrado na Fig. 6.10, o ruído de fundo da sala, extraído da gravação durante o teste de articulação segundo o procedimento de corte, ver Seção 6.1. O resultado desse processamento é mostrado na Fig. 6.11.

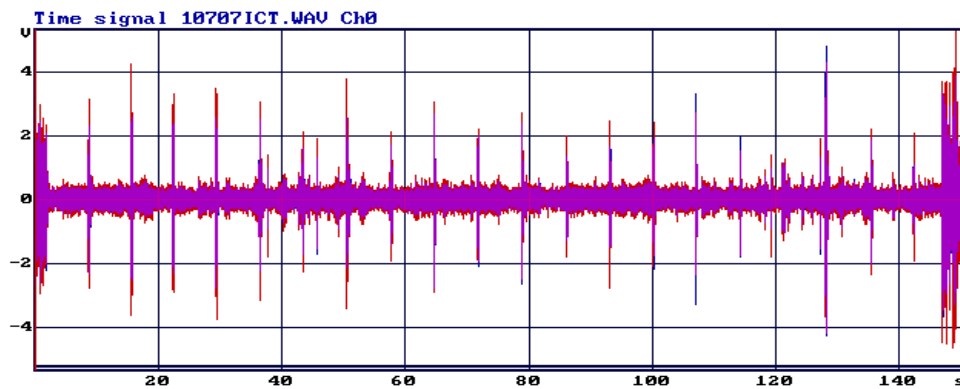


Figura 6.11: Sinal da Fig. 6.10 com o ruído de fundo adicionado.

Para finalizar, faz-se a convolução dos sinais, como o mostrado na Fig. 6.11, com a resposta impulsiva dos fones de ouvido — tal como foi feito com as gravações biauriculares modificadas —, gerando, assim, as auralizações para serem testadas pelos alunos.

Capítulo 7

Resultados experimentais

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos no trabalho. Primeiramente são apresentados os resultados dos testes de articulação reais realizados em salas de aula com turmas do ensino fundamental. Das dez salas de aula avaliadas neste trabalho, os resultados completos de uma sala foram selecionados para apresentação neste capítulo. As informações das outras nove salas podem ser vistas no Apêndice C onde são apresentados todos os resultados experimentais obtidos.

Em seguida, são apresentados os resultados comparativos entre os testes de articulação reais e os testes de articulação virtuais utilizando a gravação biauricular modificada, a partir da cabeça artificial infantil (CAI), para um número reduzido de alunos em quatro salas onde esses dados foram levantados.

Na sequência, apresentam-se os resultados comparativos entre os testes de articulação reais e os testes de articulação virtuais utilizando a aurilização, a partir da cabeça artificial infantil, para os mesmos alunos que participaram dos testes de articulação virtuais com gravação biauricular modificada e nas mesmas salas.

Para efeito de verificação, são apresentados também os resultados comparativos entre os testes de articulação reais e os testes de articulação virtuais utilizando a gravação biauricular modificada, a partir da cabeça artificial de adulto (CAA), para os mesmos alunos.

Na sequência, resultados comparativos entre os testes de articulação reais e os testes de articulação virtuais utilizando a gravação biauricular modificada e a aurilização com a cabeça artificial de adulto, mas agora com o público adulto, são apresentados.

Em seguida, apresentam-se os resultados comparativos entre os testes de articulação reais e os testes de articulação virtuais a partir da cabeça artificial infantil realizados com crianças que não participaram dos testes de articulação reais. Esses dados fornecem informações adicionais sobre a validade da técnica proposta neste trabalho.

Finalmente, são apresentados os resultados para o cálculo do STI e outros parâmetros acústicos avaliados nas dez salas de aula ensaiadas.

Nas tabelas e figuras apresentadas neste capítulo as salas de aula analisadas estão codificadas da seguinte forma: a letra S seguida de dois dígitos indicando o número da sala; e a letra T seguida de três dígitos indicando a turma.

7.1 Resultados dos testes de articulação reais

A Fig. 7.1 mostra uma planta baixa da sala 7, do IENF, com os resultados médios dos testes de articulação reais para 26 alunos, da turma 301, do terceiro ano do ensino fundamental. Esses resultados referem-se à média das quatro listas testadas na sala, indicando a posição de cada aluno, bem como as três posições da cabeça artificial infantil e do orador artificial na sala. As cores indicam os índices de articulação médios, por aluno, para as quatro listas. A Tabela 7.1 apresenta os valores encontrados para cada aluno e para cada lista, bem como as médias por aluno e média geral (índice de articulação da sala).

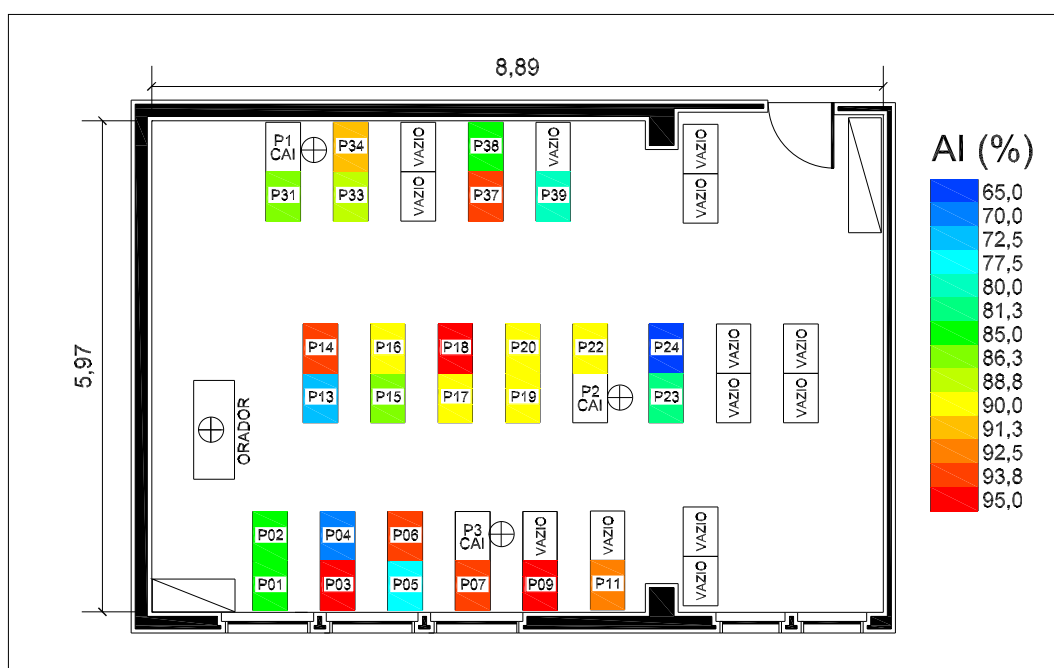


Figura 7.1: Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 7, turma 301 do IENF.

Os testes de articulação reais foram realizados com todos os alunos da turma que estavam presentes no dia do ensaio, mesmo com aqueles que apresentavam alguma dificuldade de aprendizagem ou deficiência auditiva informada previamente pela professora da turma. As colunas da Tabela 7.1 mostram, para cada aluno: o número de identificação; a idade; a posição (referida à Fig. 7.1); o número de acertos

nas quatro listas testadas na sala; a soma dos acertos; e o índice de articulação (percentual) correspondente. Ao final, foram calculadas as médias gerais, entendendo-se por *Média* o resultado dos testes com todos os alunos e por *Média R* uma média revisada onde, para os resultados apresentados, ocorreu a exclusão de dois alunos da turma. Esses eram estudantes que apresentaram dificuldade, identificada pela professora. Os alunos 4 e 20, excluídos dos resultados da média revisada, estão identificados na Tabela 7.1 com um asterisco.

Tabela 7.1: Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 7, turma 301 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	L06	L07	L08	L13	Total	Total(%)
01	8	01	20	13	17	18	68	85,0
02	8	02	18	17	16	17	68	85,0
03	9	03	20	18	19	19	76	95,0
04*	9	04	15	15	13	13	56	70,0
05	9	05	18	11	16	17	62	77,5
06	9	06	19	18	18	20	75	93,8
07	9	07	19	18	18	20	75	93,8
08	8	09	19	18	19	20	76	95,0
09	9	11	19	16	19	20	74	92,5
10	8	13	14	12	16	16	58	72,5
11	8	14	19	19	19	18	75	93,8
12	9	15	18	16	17	18	69	86,3
13	10	16	20	16	16	20	72	90,0
14	9	17	19	17	17	19	72	90,0
15	9	18	19	20	17	20	76	95,0
16	8	19	19	16	18	19	72	90,0
17	9	20	18	17	17	20	72	90,0
18	9	22	19	18	17	18	72	90,0
19	8	23	17	13	17	18	65	81,3
20*	10	24	17	10	10	15	52	65,0
21	8	31	18	15	16	20	69	86,3
22	8	33	16	17	20	18	71	88,8
23	8	34	18	18	18	19	73	91,3
24	9	37	18	18	19	20	75	93,8
25	11	38	16	17	16	19	68	85,0
26	12	39	17	15	13	19	64	80,0
Médias			18,0	16,1	16,8	18,5	69,4	86,8
Médias R			18,2	16,4	17,3	18,8	70,7	88,4

É importante observar que, dependendo da lista de monossílabos utilizada, há uma variação significativa entre os índices de articulação médios da turma. Assim, na sala 7, a lista 07 (L07) teve uma média de acertos de 16,4 (82% de índice de articulação), enquanto a Lista 13 mostrou uma média de acertos de 18,8 (94% de índice de articulação). Em outras palavras, há uma diferença de 12% entre o maior e o menor resultado do índice de articulação, dependendo da lista utilizada, nessa sala. Um resumo com os valores das diferenças máximas entre listas, numa mesma sala, para todas as dez salas que participaram dos testes de articulação reais, é apresentado na Tabela 7.3.

Como mencionado anteriormente, os resultados dos testes de articulação reais para todas as dez salas ensaiadas são apresentados em tabelas similares no Apêndice C. Para cada sala, a informação referente a alunos eventualmente com dificuldades, sejam auditivas ou motoras, foi fornecida pela professora da turma. Quando essas dificuldades resultaram em um baixo rendimento do aluno nos testes de articulação reais — relativamente à sua turma —, os resultados desses alunos foram excluídos das Médias R tal como ocorreu na sala 7 com os alunos 4 e 20. O número de alunos excluídos das Médias R foi diferente para cada turma, variando entre zero e três.

A Fig. 7.2 apresenta graficamente os resultados médios indicados na Tabela 7.1, por aluno, na sala S07T301 (IENF).

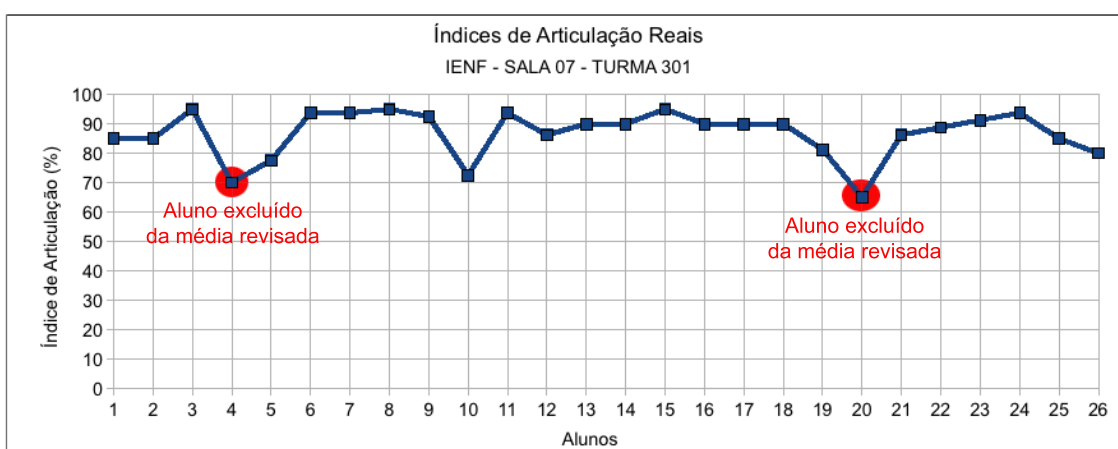


Figura 7.2: Variação da inteligibilidade para os testes de articulação reais obtidos na sala 7, turma 301 do IENF.

O resumo dos resultados com os índices de articulação reais obtidos para todas as dez salas ensaiadas constam da Tabela 7.2. Observe-se que apenas em quatro salas de aula (S05T303, S07T301, S10T502 e S15T302) os índices de articulação (Médias) diferem dos índices de articulação revisados (Médias R), ou seja, apenas nessas salas foram excluídos alunos dos resultados nos testes. Todos os valores são percentuais.

Tabela 7.2: Resultados dos índices de articulação reais (%), obtidos nas dez salas de aula avaliadas.

Sala	Médias	Médias R	Sala	Médias	Médias R
S04T402	82,8	82,8	S10T502	84,8	87,8
S05T303	68,7	81,0	S11T501	87,7	87,7
S06T401	91,3	91,3	S15T302	73,2	82,0
S07T301	86,8	88,4	S01T601	89,6	89,6
S09T503	87,8	87,8	S05T605	82,8	82,8

Tabela 7.3: Resultado das máximas diferenças (D. Máx.) percentuais entre listas, por sala, para todas as dez salas ensaiadas.

Sala	1ª Lista (%)	2ª Lista (%)	3ª Lista (%)	4ª Lista (%)	D. Máx. (%)
S04T402	84,5	83,5	92,0	71,5	20,5
S05T303	82,0	79,5	75,5	87,0	11,5
S06T401	91,0	92,5	89,5	92,5	3,0
S07T301	91,0	82,0	86,5	94,0	12,0
S09T503	76,0	91,5	91,0	93,0	17,0
S10T502	91,0	88,5	87,5	84,5	6,5
S11T501	86,0	92,5	86,0	87,0	6,5
S15T302	82,5	80,0	87,5	78,5	9,0
S01T601	89,5	89,0	94,0	86,0	8,0
S05T605	77,5	81,5	84,5	88,0	10,5

7.2 Comparação entre testes de articulação reais e virtuais com gravação biauricular modificada, a partir da CAI

Nesta seção são apresentados os resultados comparativos entre os testes de articulação reais, designados por TAR, e os testes de articulação virtuais a partir da gravação biauricular modificada obtidos com cabeça artificial infantil (CAI), designados como TAV1-CAI. (Os testes de articulação virtuais a partir da auralização obtidos com cabeça artificial infantil serão designados como TAV2-CAI.)

Os testes de articulação virtuais a partir da gravação biauricular modificada com a CAI foram realizados para um grupo de alunos de quatro turmas que participaram dos testes de articulação reais. Naturalmente, as comparações são feitas utilizando-se as mesmas listas de monossílabos, aplicadas em cada uma das salas.

Para a realização dos testes de articulação virtuais foram selecionados, preferencialmente, alunos que se encontravam nas proximidades de uma das posições da cabeça artificial infantil durante os testes de articulação reais realizados nas salas. Nas Tabelas apresentadas a seguir estão indicadas as posições dos alunos e a posição da cabeça artificial infantil (P1, P2 ou P3).

A Tabela 7.4 mostra os valores obtidos na sala 7, turma 301 do IENF, para a lista 07. As colunas indicam: o número de identificação do aluno; a idade do aluno; a posição do aluno e a a posição da CAI na sala (ver Fig. 7.1); o número de acertos no teste de articulação real para a lista 07, indicado como TAR-L07; o número de acertos no teste de articulação virtual com gravação biauricular modificada, para a mesma lista 07, indicado como TAV1-L07; o índice de articulação do teste de articulação real, indicado como TAR-L07 (%); e o índice de articulação do teste de articulação virtual a partir da gravação biauricular modificada, indicado como

Tabela 7.4: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAI, para a lista 07 na sala 7, turma 301 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR-L07	TAV1-L07	TAR-L07(%)	TAV1-L07(%)
04	9	04-P3	15	14	75	70
05	9	05-P3	11	11	55	55
07	9	07-P3	18	18	90	90
10	8	13-P1	12	13	60	65
16	8	19-P2	16	17	80	85
17	9	20-P2	17	16	85	80
19	8	23-P2	13	11	65	55
20	10	24-P2	10	11	50	55
22	8	33-P1	17	17	85	85
24	9	37-P2	18	17	90	85
26	12	39-P2	15	15	75	75
Médias			14,7	14,5	73,6	72,7
Diferença relativa						$\varepsilon = -1,23\%$

TAV1-L07 (%). As linhas iniciais correspondem aos alunos que realizaram o teste de articulação virtual. A penúltima linha indica as médias para os alunos e a última linha apresenta a diferença média relativa, ε , entre as médias do TAV1 e do TAR, dada pela expressão

$$\varepsilon = \frac{\text{TAV1} - \text{TAR}}{\text{TAR}} \times 100\%. \quad (7.1)$$

A Fig. 7.3 apresenta os valores dos índices de articulação resultantes dos testes reais e virtuais obtidos a partir da gravação biauricular modificada, extraídos da Tabela 7.4.

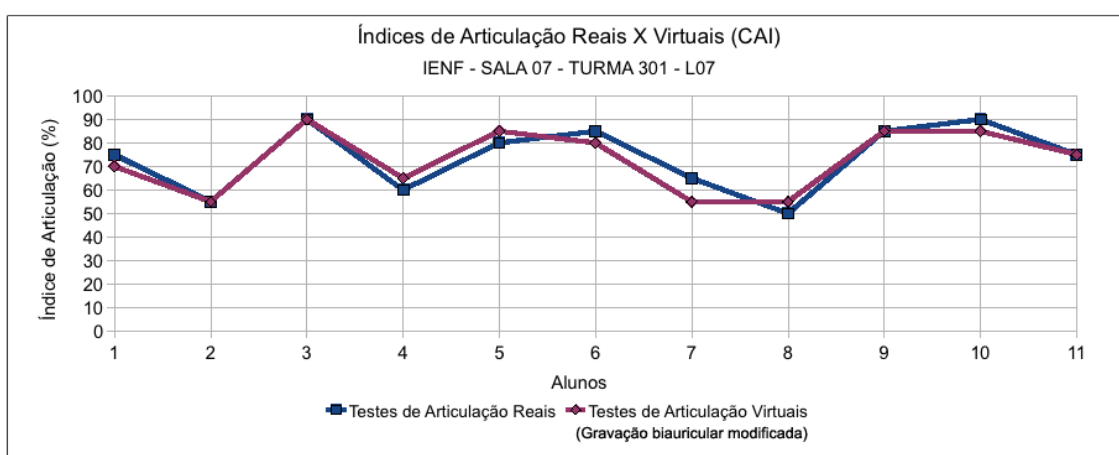


Figura 7.3: Índices de articulação, reais e virtuais com gravação biauricular modificada, por aluno, extraídos da Tabela 7.4.

Para os resultados das demais salas, mostrados nas Tabelas 7.5 a 7.7, as colunas e as linhas correspondem aos mesmos elementos da Tabela 7.4. As Figuras 7.4 a 7.6 correspondem aos índices de articulação reais e virtuais a partir da gravação

biauricular modificada, extraídos dessas tabelas.

Tabela 7.5: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAI, para a lista 04 na sala 5, turma 303 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR-L04	TAV1-L04	TAR-L04(%)	TAV1-L04(%)
06	9	07-P3	11	13	55	65
09	10	10-P2	18	18	90	90
13	9	14-P1	17	17	85	85
13	10	15-P3	19	19	95	95
15	9	17-P2	18	18	90	90
18	9	22-P1	19	17	95	85
20	9	26-P1	19	19	95	95
Médias			17,3	17,3	86,4	86,4
Diferença relativa						$\varepsilon = 0$

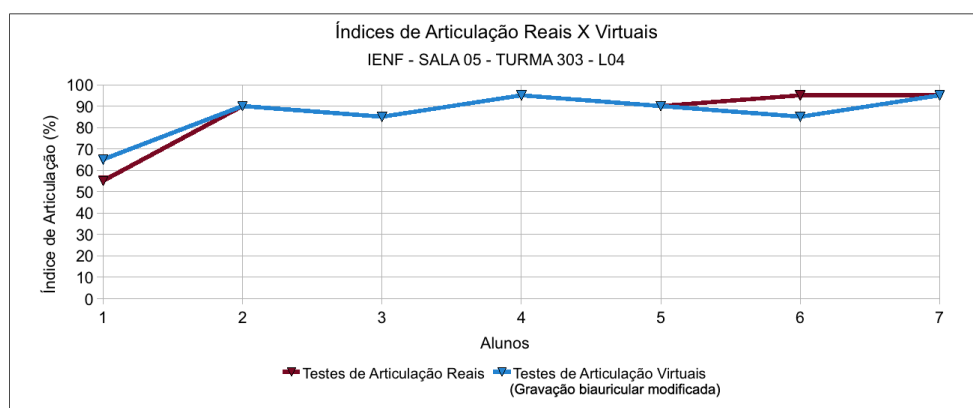


Figura 7.4: Índices de articulação, reais e virtuais com gravação biauricular modificada, por aluno, extraídos da Tabela 7.5.

Tabela 7.6: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAI, para a lista 04 na sala 6, turma 401 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR-L04	TAV1-L04	TAR-L04(%)	TAV1-L04(%)
12	9	17-P2	17	17	85	85
13	11	18-P2	17	16	85	80
15	9	21-P2	17	17	85	85
16	9	23-P3	18	17	90	85
17	9	24-P3	18	18	90	90
19	11	26-P1	19	17	95	85
20	9	28-P1	19	18	95	90
21	10	29-P1	20	18	100	90
23	9	32-P2	19	19	95	95
Médias			18,2	17,4	91,1	87,2
Diferença relativa						$\varepsilon = -4,27\%$

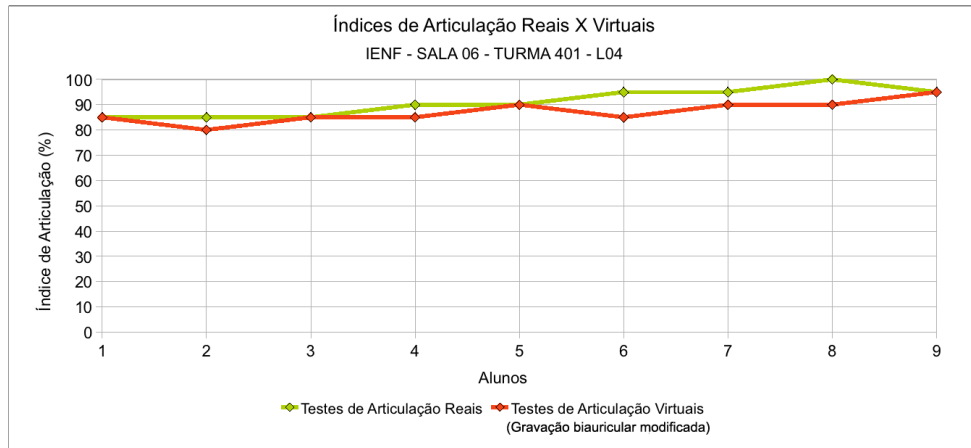


Figura 7.5: Índices de articulação, reais e virtuais com gravação biauricular modificada, por aluno, extraídos da Tabela 7.6.

Tabela 7.7: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAI, para a lista 13 na sala 15, turma 302 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR-L13	TAV1-L13	TAR-L13(%)	TAV1-L13(%)
05	9	06-P2	19	20	95	100
06	8	07-P3	18	18	90	90
10	9	12-P1	17	19	85	95
16	8	18-P2	16	17	80	85
Médias			17,5	18,5	87,5	92,5
Diferença relativa						$\varepsilon = 5,71\%$

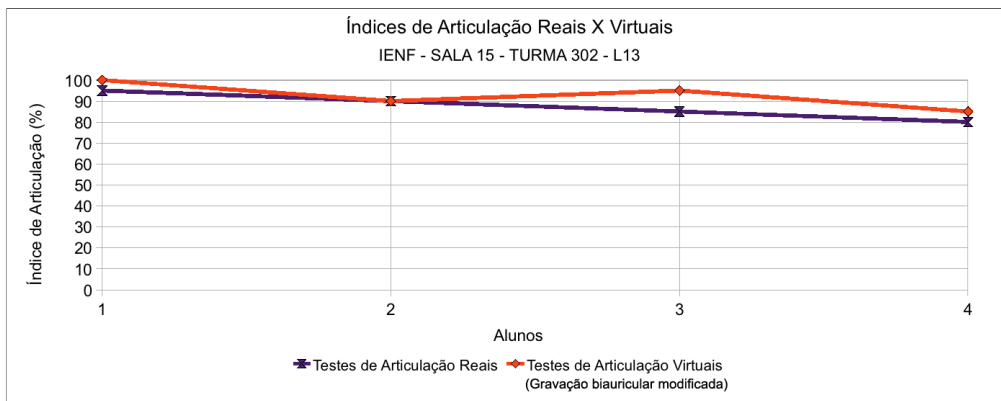


Figura 7.6: Índices de articulação, reais e virtuais, por aluno, extraídos da Tabela 7.7.

Finalmente, a Tabela 7.8 apresenta o resumo dos resultados desta seção, para as quatro salas de aula, dos índices de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada obtida com cabeça artificial infantil. A Figura 7.7 ilustra os índices de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada, para quatro salas de aula avaliados, extraídos da Tabela 7.8.

Tabela 7.8: Resumo dos resultados dos testes de articulação reais e virtuais, a partir da gravação biauricular modificada com a CAI, em quatro salas de aula avaliadas.

Sala	TAR (%)	TAV1 (%)	Diferença relativa (%)
S05T303	86,4	86,4	0
S06T401	91,1	87,2	-4,28
S07T301	73,6	72,7	-1,23
S15T302	87,5	92,5	+5,71

Como se pode deprender dos resultados apresentados na Tabela 7.8, os índices de articulação virtuais obtidos na gravação biauricular modificada com a cabeça artificial infantil, quando comparados com os obtidos através dos testes de articulação reais, mostram uma diferença média relativa entre $-4,28\%$ e $+5,71\%$. Vale ressaltar, contudo, que para os testes de articulação virtuais com gravação biauricular modificada, somente uma lista por turma foi testada, uma vez que a gravação biauricular modificada não é o objeto central da metodologia proposta.

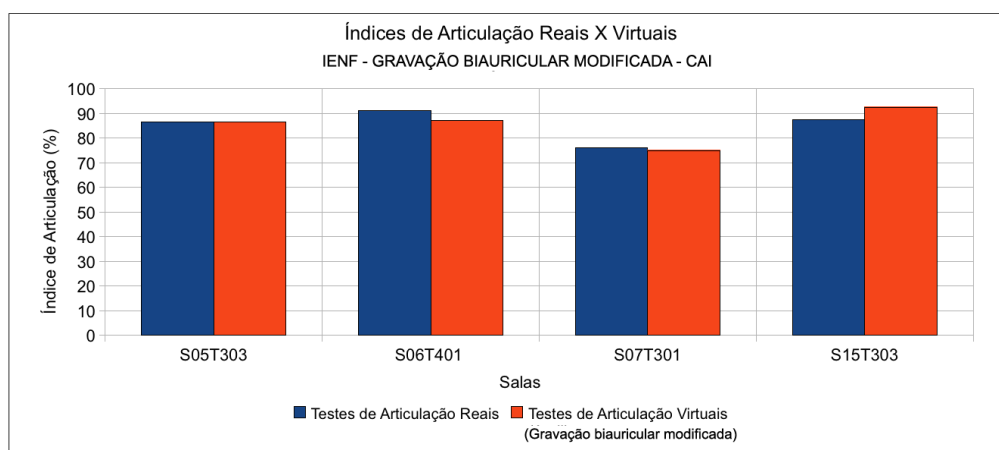


Figura 7.7: Índices de articulação reais e virtuais, com gravação biauricular modificada obtida pela CAI, para 4 salas de aula avaliadas, extraídos da Tabela 7.8.

Note-se que, com uma única lista de 20 monossílabos, uma discordância em um único monossílabo corresponde a 5% de diferença no índice de articulação. Assim, por exemplo, na sala 15, turma 302 do IENF, o teste de articulação real resultou em um índice de 87,5%, enquanto o teste de articulação virtual com gravação biauricular modificada resultou em um índice de 92,5%, uma diferença de 5%. Em outras palavras, na média, os alunos acertaram um monossílabo a mais com o teste de articulação virtual. Estes ensaios visaram tão somente verificar a eficácia da cabeça artificial infantil para a realização de gravações biauriculares, para a realização de testes *off line* com crianças.

7.3 Comparação entre testes de articulação reais e virtuais com aurilização, a partir da CAI

Nesta seção, são apresentados os resultados comparativos entre os testes de articulação reais, TAR, e os testes de articulação virtuais a partir da aurilização obtidos com cabeça artificial infantil, aqui designados como TAV2-CAI. Esses testes foram realizados com o mesmo grupo de alunos das quatro turmas que participaram dos testes de articulação virtuais a partir da gravação biauricular modificada obtidos com cabeça artificial infantil, porém agora com um número maior de listas.

Os resultados desta seção indicam o quanto a metodologia proposta neste trabalho pode se mostrar eficaz para a avaliação da inteligibilidade em salas de aula do ensino fundamental. Por essa razão, o número de listas testadas em cada sala (duas para a sala 7 do IENF e três para as demais) é maior do que na Seção 7.2, onde apenas uma lista foi testada em cada uma das quatro salas.

A Tabela 7.9 indica os valores obtidos na sala 7, turma 301 do IENF, para as listas 06 e 13. As colunas indicam: o número de identificação do aluno; a idade do aluno; a posição do aluno e da CAI na sala; o número de acertos no teste de articulação real, indicado como TAR L6+13; o número de acertos no teste de articulação virtual com aurilização, indicado como TAV2 L6+13; o índice de articulação do teste de articulação real, indicado como TAR L6+13 (%); e o índice de articulação do teste de articulação virtual a partir da aurilização, indicado como TAV2 L6+13 (%). As linhas iniciais correspondem aos mesmos 11 alunos que realizaram o teste de articulação virtual com gravação biauricular modificada. A penúltima linha indica as médias obtidas pelos 11 alunos e a última linha apresenta a diferença média relativa, ε , entre as médias do TAV2 e o TAR, dado pela expressão

$$\varepsilon = \frac{\text{TAV2} - \text{TAR}}{\text{TAR}} \times 100\%. \quad (7.2)$$

Para os resultados das demais salas de aula, mostrados nas Tabelas 7.10 a 7.12, as colunas e as linhas correspondem aos mesmos elementos da Tabela 7.9. As Figuras 7.9 a 7.11 correspondem aos índices de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada, extraídos dessas Tabelas. A Fig. 7.8 mostra os valores dos índices de articulação resultantes dos testes reais e virtuais obtidos a partir da aurilização, extraídos da Tabela 7.9.

Tabela 7.9: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAI, para as listas 06 e 13 na sala 7, turma 301 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L6+13	TAV2 L6+13	TAR L6+L13(%)	TAV2 L6+L13(%)
04	9	04-P3	14,0	17,5	70,0	87,5
05	9	05-P3	17,5	17,0	87,5	85,0
07	9	07-P3	19,5	18,0	97,5	90,0
10	8	13-P1	15,0	15,0	75,0	75,0
16	8	19-P2	19,0	18,0	95,0	90,0
17	9	20-P2	19,0	17,0	95,0	85,0
19	8	23-P2	17,5	18,0	87,5	90,0
20	10	24-P2	16,0	14,0	80,0	70,0
22	8	33-P1	17,0	13,0	85,0	67,5
24	9	37-P2	19,0	17,5	95,0	87,5
26	12	39-P2	18,0	17,5	90,0	87,5
Médias			17,4	16,6	87,0	83,2
Diferença relativa						$\varepsilon = -4,37$

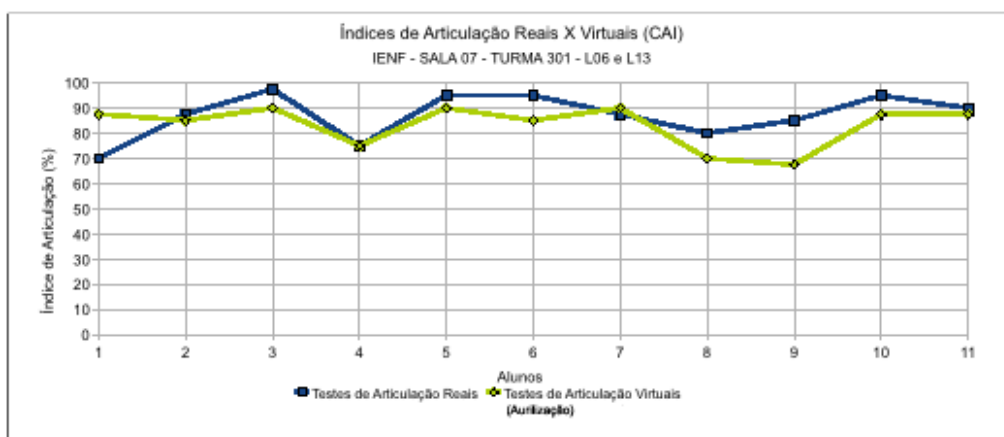


Figura 7.8: Índices de articulação reais e virtuais com aurilização obtida a partir da CAI, para as listas 06 e 13 na sala 7, turma 301 do IENF.

Tabela 7.10: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAI, para as listas 02, 03 e 05 na sala 5, turma 303 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L2+3+5	TAV2 L2+3+5	TAR L2+3+5(%)	TAV2 L2+3+5(%)
06	9	07-P3	50	42	83,3	70,0
09	10	10-P2	53	54	88,3	90,0
12	9	14-P1	54	51	90,0	85,0
13	10	15-P3	55	54	91,7	90,0
15	9	17-P2	54	57	90,0	95,0
18	9	22-P1	52	52	86,7	86,7
20	9	26-P1	52	54	86,7	90,0
Médias			52,9	52,0	88,1	86,7
Diferença relativa						$\varepsilon = -1,59$

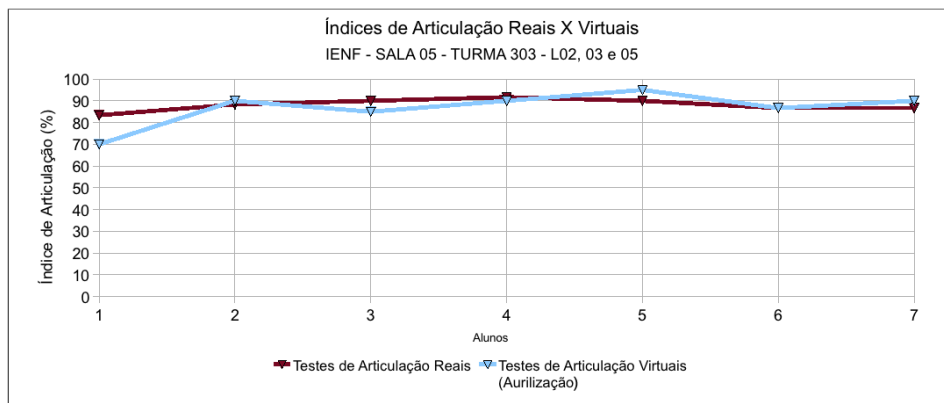


Figura 7.9: Índices de articulação reais e virtuais com aurilização obtida com a CAI, para as listas 02, 03 e 05 na sala 5, turma 303 do IENF.

Tabela 7.11: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAI, para as listas 01, 02 e 05 na sala 6, turma 401 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L1+2+5	TAV2 L1+2+5	TAR L1+2+5(%)	TAV2 L1+2+5(%)
12	9	17-P2	57	49	95,0	81,7
13	11	18-P2	58	54	96,7	90,0
15	9	21-P2	55	53	91,7	88,3
16	9	23-P3	56	58	93,3	96,7
17	9	24-P3	58	56	96,7	93,3
19	11	26-P1	57	58	95,0	96,7
20	9	28-P1	52	52	86,7	86,7
21	10	29-P1	57	58	95,0	96,7
23	9	32-P2	55	52	91,7	86,7
Médias			56,1	54,4	93,5	90,7
Diferença relativa						$\epsilon = -2,99$

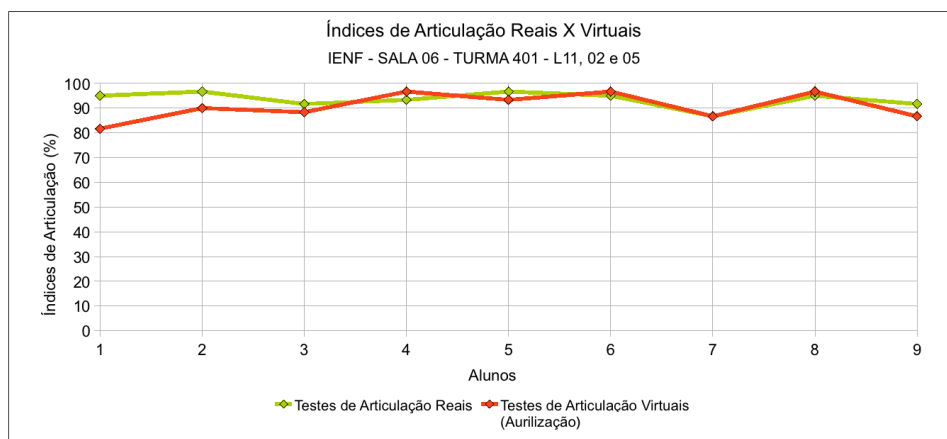


Figura 7.10: Índices de articulação reais e virtuais, com aurilização obtida com a CAI, para as listas 01, 02 e 05 na sala 6, turma 401 do IENF.

Tabela 7.12: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAI, para as listas 04, 08 e 15 na sala 15, turma 302 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L4+8+15	TAV2 L4+8+15	TAR L4+8+15(%)	TAV2 L4+8+15(%)
5	9	06-P2	52	53	86,7	88,3
6	8	07-P3	51	49	85,0	81,7
10	9	12-P1	47	47	78,3	78,3
16	8	18-P2	50	54	83,3	90,0
Médias			50,0	50,8	83,3	84,6
Diferença relativa						$\varepsilon = 1,56$

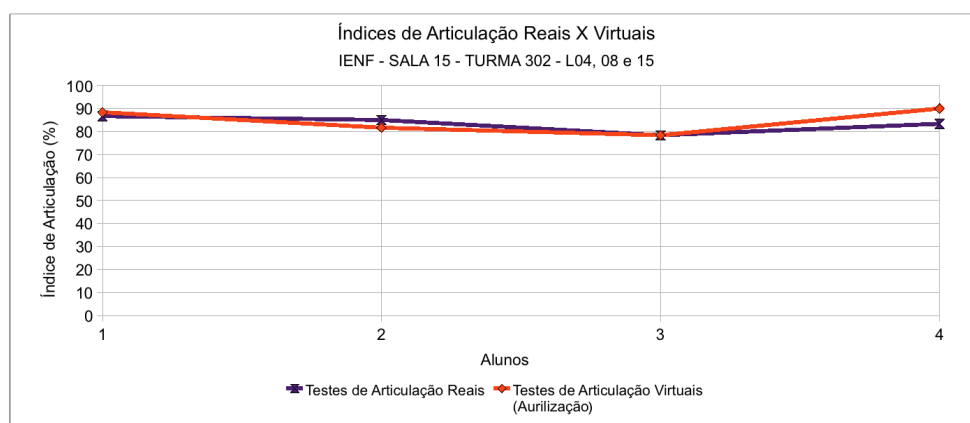


Figura 7.11: Índices de articulação reais e virtuais, com aurilização obtida com a CAI, para as listas 04, 08 e 15 na sala 15, turma 302 do IENF.

Finalmente, a Tabela 7.13 apresenta um resumo dos resultados obtidos nesta seção, para as quatro salas de aula, dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização obtida com cabeça artificial infantil. A Fig. 7.12 mostra os resultados dos testes de articulação reais e virtuais, extraídos da Tabela 7.13.

Tabela 7.13: Resultados médios dos testes de articulação reais e virtuais, a partir da aurilização com a CAI, em quatro salas de aula avaliadas.

Sala	TAR (%)	TAV2 (%)	Diferença (%)	Diferença relativa (%)
S05T303	88,1	86,7	+1,4	-1,59
S06T401	93,5	90,7	+2,8	-2,99
S07T301	87,0	83,2	+3,8	-4,37
S15T303	83,3	84,6	-1,3	+1,56

Para os testes de articulação virtuais realizados foram utilizados os resultados das gravações das respostas impulsivas biauriculares registrados nas salas 5, 6, 7 e 15 do IENF. A diferença entre a maior e a menor média de acertos, entre as 4 listas utilizadas em cada uma das salas, nos testes de articulação reais constam da Tabela 7.14.

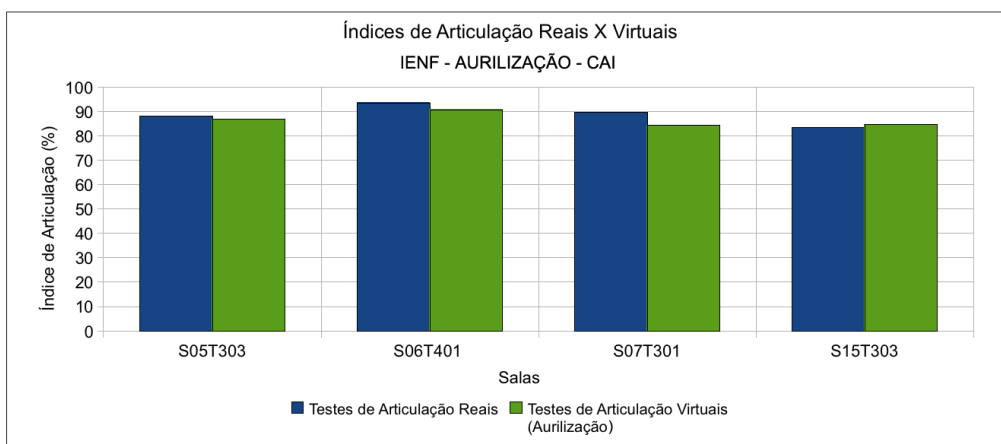


Figura 7.12: Índices de articulação reais e virtuais, com aurilização obtida com a CAI, para quatro salas avaliadas.

Tabela 7.14: Resumo das diferenças entre as médias dos índices de articulação para as listas utilizadas nos testes de articulação reais realizados em quatro salas ensaiadas.

Sala	Menor média (%)	Maior média (%)	Diferença (%)
S05T303	75,5	87,0	11,5
S06T401	86,0	92,5	6,5
S07T301	82,0	94,0	12,0
S15T302	78,5	87,5	9,0

Os resultados apresentados na Tabela 7.13 e na Fig. 7.12 indicam que as diferenças entre os índices de articulação levantados nos testes de articulação reais e virtuais obtidos a partir da aurilização com cabeça artificial infantil estão compreendidos entre $-1,3\%$ e $+3,8\%$ (cumpre notar que este último valor foi obtido na sala 7, onde somente duas listas foram utilizadas).

Analisando-se agora a última coluna da Tabela 7.14 observa-se que a diferença entre a menor e a maior média percentual, obtidas nas quatro salas, varia entre $6,5\%$ e 12% . Isso indica que as diferenças encontradas nos resultados dos testes de articulação reais e virtuais com aurilização são inferiores às diferenças obtidas entre distintas listas em uma mesma sala. Essa comparação entre as Tabelas 7.13 e 7.14 é um bom indicativo de que os testes de articulação virtuais a partir da aurilização são confiáveis, validando a metodologia proposta.

7.4 Comparação entre testes de articulação reais e virtuais com gravação biauricular modificada, a partir da CAA

Esta seção tem como objetivo verificar se é realmente inadequada a utilização de cabeça artificial de adulto para avaliação de inteligibilidade em salas de aula do ensino fundamental, onde o público é predominantemente infantil. Para esse fim os testes de articulação reais são comparados com os testes de articulação virtuais a partir da gravação biauricular modificada, porém utilizando a cabeça artificial de adulto (CAA).

A Tabela 7.15 apresenta os valores obtidos na sala 7, turma 301 do IENF, para a lista 08. As colunas indicam os mesmos elementos da Tabela 7.9. As linhas iniciais correspondem aos mesmos 11 alunos que realizaram o teste de articulação virtual com gravação biauricular modificada e auralização para a CAI. A penúltima linha indica as médias dos 11 alunos e a última linha apresenta a diferença média relativa, ε , entre as médias do TAR e do TAV1 com a CAA. A Fig. 7.13 mostra os índices de articulação, reais e virtuais — a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAA —, por aluno, extraídos da Tabela 7.15.

Tabela 7.15: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAA, para a lista 08 na sala 7, turma 301 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L08	TAV1 L08	TAR L08(%)	TAV1 L08(%)
04	9	04-P3	13	11	65	55
05	9	05-P3	16	15	80	75
07	9	07-P3	18	16	90	80
10	8	13-P1	16	15	80	75
16	8	19-P2	18	14	90	70
17	9	20-P2	17	12	85	60
19	8	23-P2	17	9	85	45
20	10	24-P2	10	13	50	65
22	8	33-P1	20	8	100	40
24	9	37-P2	19	14	95	70
26	12	39-P2	13	12	65	60
Médias			16,1	12,6	80,5	63,2
Diferença relativa						$\varepsilon = -21,49\%$

Como se pode observar, o valor absoluto da diferença média relativa, nesse caso, foi de 21,49%, bem maior do que os valores absolutos das diferenças médias relativas encontrados na Seção 7.2 (entre 0% e 5,71%). Essa piora significativa nos resultados comparativos reforça a indicação do uso da cabeça artificial infantil no lugar da cabeça artificial de adulto para a avaliação de inteligibilidade em salas de aula do ensino fundamental, tal como proposto neste trabalho.

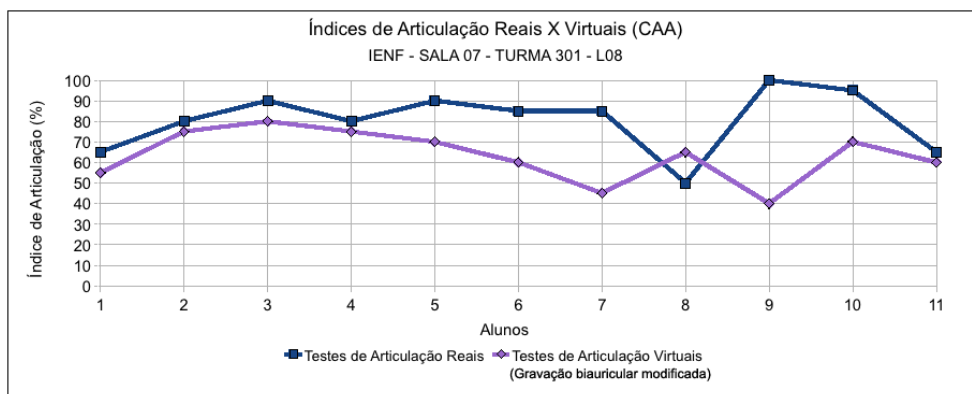


Figura 7.13: Índices de articulação reais e virtuais, a partir da gravação biauricular modificada com a CAA, por aluno, para a lista 08 na sala 7, turma 301 do IENF.

7.5 Comparação entre testes de articulação reais e virtuais com gravação biauricular modificada, a partir da CAA, aplicados a adultos

Com o objetivo de verificar a adequação da cabeça artificial de adulto utilizada em testes de articulação *para adultos*, foram feitos testes de articulação reais e virtuais (com gravação biauricular modificada e aurilização), a partir da cabeça artificial de adulto e aplicados a adultos.

A Tabela 7.16 apresenta os acertos obtidos por quatro adultos que realizaram o teste de articulação real, na sala 7, turma 301 do IENF, para quatro listas com oitenta monossílabos no total. Observe-se que o índice de articulação médio foi de 92,5%. A lista para a qual houve o pior desempenho foi a lista 08, onde o número médio de acertos foi de 16,5, que corresponde ao índice de articulação de 82,5%.

Tabela 7.16: Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 7 do IENF, com 4 adultos.

Adulto	L06	L07	L08	L13	Total	Total (%)
01	20	19	17	17	73	91,3
02	20	19	15	19	73	91,3
03	20	17	18	19	74	92,5
04	20	20	16	20	76	95,0
Médias	20	18,8	16,5	18,8	74,0	92,5

A Tabela 7.17 mostra os resultados comparativos entre os índices de articulação real e virtual com gravação biauricular modificada a partir das gravações biauriculares realizadas na sala 7, turma 301 do IENF, para a lista 08 com a CAA, para adultos. Observe-se que o índice de articulação virtual médio foi de 85%, o que indicou uma diferença de +2,5% em relação ao índice de articulação real, para a mesma lista.

Tabela 7.17: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAA, para a lista 08 na sala 7 do IENF, com 4 adultos.

Adulto	TAR L08	TAV1 L08	TAR L08(%)	TAV1 L08(%)
01	17	17	85	85
02	15	16	75	80
03	18	18	90	90
04	16	17	80	85
Médias	16,5	17,0	82,5	85,0
Diferença relativa				$\varepsilon = 3,03\%$

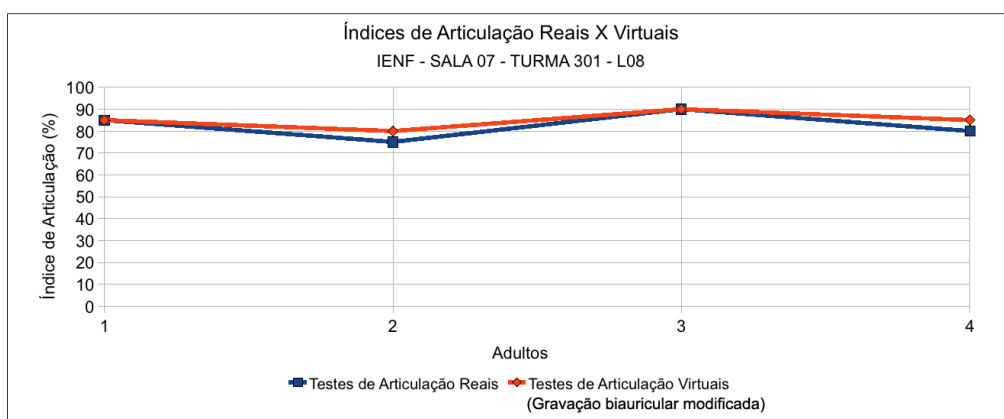


Figura 7.14: Índices de articulação, reais e virtuais, por adulto, extraídos da Tabela 7.17.

A diferença média relativa de +3,03% indica que, para adultos, as gravações biauriculares realizadas com a CAA na sala durante os testes de articulação reais são equivalentes às gravações biauriculares realizadas com a CAI, para crianças (Tabela 7.8). Por outro lado, os testes de articulação virtuais com gravação biauricular modificada utilizando a CAA para crianças, para a mesma lista 08, resultou em uma diferença média relativa de -21,47% (Tabela 7.15). A Fig. 7.14 mostra os valores dos índices de articulação, reais e virtuais obtidos a partir da gravação biauricular modificada para adultos com a CAA, extraídos da Tabela 7.17.

Por fim, a Tabela 7.18 mostra os resultados comparativos entre os índices de articulação real e virtual com aurilização a partir das gravações biauriculares realizadas na sala 7, para a lista 08 com a CAA, para os mesmos quatro adultos que participaram dos testes de articulação virtuais com gravação biauricular modificada. Observe-se que, nesse caso, a diferença média relativa foi de 0,52%, o que afasta qualquer dúvida sobre a qualidade da instrumentação.

A Fig. 7.15 mostra os valores dos índices de articulação, reais e virtuais obtidos a partir da gravação biauricular modificada para adultos com a CAA, extraídos da Tabela 7.18.

Tabela 7.18: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAA, para as listas 06, 07 e 13 na sala 7 do IENF, com adultos.

Adulto	TAR L6+7+13	TAV2 L6+7+13	TAR L6+7+13(%)	TAV2 L6+7+13(%)
01	56	58	93,3	96,7
02	58	57	96,7	95,0
03	56	57	93,3	95,0
04	60	59	100	98,3
Médias	57,5	57,8	95,8	96,3
Diferença relativa				$\varepsilon = 0,52\%$

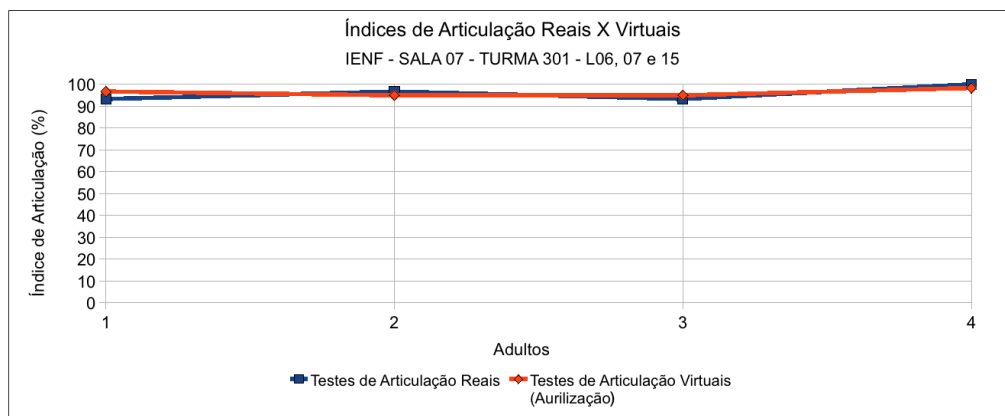


Figura 7.15: Índices de articulação, reais e virtuais, por adulto, extraídos da Tabela 7.18.

A conclusão que se extrai desta seção é que testes de articulação virtuais, tanto com gravação biauricular modificada como com aurilização obtidos com cabeça artificial de adulto são satisfatórios para a avaliação de inteligibilidade em salas de aula *com público adulto*.

7.6 Testes adicionais para validação da metodologia proposta

A seguir são apresentados os resultados da avaliação da inteligibilidade para algumas salas de aula ensaiadas a partir de testes de articulação virtuais com aurilização a partir da CAI, aplicados a crianças que não participaram dos testes de articulação reais a fim de validar a metodologia proposta neste trabalho.

A Tabela 7.19 mostra os valores obtidos por 5 crianças que realizaram o teste de articulação virtual a partir da aurilização com a CAI. Os testes de articulação virtuais foram executados em ambiente silencioso e a aurilização foi obtida a partir do processamento das gravações das respostas impulsivas biauriculares obtidas em três posições na sala 5 do IENF, utilizando a CAI para as listas 02, 03 e 05.

Tabela 7.19: Resultados dos testes de articulação virtuais a partir das aurilizações, obtidos para a sala 5 do IENF, com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.

Criança	Idade	L02	L03	L05	Total	Total (%)
01	10	18	17	19	54	90,0
02	9	18	16	19	53	88,3
03	9	18	13	19	50	83,3
04	10	19	15	17	51	85,0
05	8	18	16	18	52	86,7
Médias		18,2	15,4	18,4	52	86,7

A Tabela 7.20 mostra os resultados dos testes de articulação virtuais a partir da aurilização para as mesmas 5 crianças, nesse caso, a partir do processamento das gravações das respostas impulsivas biauriculares na sala 7, utilizando a CAI para as listas 06, 07 e 13.

Tabela 7.20: Resultados dos testes de articulação virtuais a partir das aurilizações, obtidos para a sala 7 do IENF, com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.

Criança	Idade	L06	L07	L13	Total	Total (%)
01	10	19	17	19	55	91,7
02	9	19	18	19	56	93,3
03	9	19	18	18	55	91,7
04	10	18	19	18	55	91,7
05	8	19	17	19	55	91,7
Médias		18,8	17,8	18,6	55,2	92,0

A Tabela 7.21 mostra os resultados para 5 crianças que realizaram o teste de articulação virtual com aurilização a partir da CAI, agora a partir do processamento das gravações das respostas impulsivas biauriculares na sala 15 do IENF, utilizando a CAI para as listas 04, 08 e 15.

Tabela 7.21: Resultados dos testes de articulação virtuais a partir das aurilizações, obtidos para a sala 15 do IENF, com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.

Criança	Idade	L04	L08	L15	Total	Total (%)
01	10	17	17	16	50	83,3
02	9	20	18	14	52	86,7
03	9	18	18	16	52	86,7
04	10	19	17	15	51	85,0
05	8	19	17	14	50	83,3
Médias		18,6	17,4	15,0	51,0	85,0

A Tabela 7.22 mostra os resultados para 5 crianças que realizaram o teste de articulação virtual com aurilização a partir da CAI, a partir do processamento das gravações das respostas impulsivas biauriculares na sala 1 do CEAP, utilizando a CAI para as listas 10, 11 e 12.

Tabela 7.22: Resultados dos testes de articulação virtuais a partir das aurilizações, obtidos para a sala 1 do CEAP, com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.

Criança	Idade	L10	L11	L12	Total	Total (%)
01	10	18	17	16	51	85,0
02	9	19	18	17	54	90,0
03	9	19	18	17	54	90,0
04	10	17	17	16	50	83,3
05	8	19	18	17	54	90,0
Médias		18,4	17,6	16,6	52,7	87,7

Finalmente, a Tabela 7.23 apresenta um resumo com resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir das aurilizações, a partir da CAI, para as quatro salas de aula constantes nas Tabelas 7.19 a 7.22. Os índices de articulação reais foram obtidos nos testes de articulação reais por crianças das respectivas turmas, enquanto os índices de articulação virtuais foram obtidos nos testes de articulação virtuais a partir das aurilizações aplicados a 5 crianças não pertencentes às turmas, para as mesmas listas.

Tabela 7.23: Resumo dos resultados dos testes de articulação reais e virtuais com aurilização, para as mesmas listas de monossílabos, obtidos com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.

Sala	TAR (%)	TAV2 (%)	Diferença (%)	Diferença Relativa (%)
S05T303	82,8	86,7	3,9	4,71
S07T301	89,0	92,0	3,0	3,37
S15T302	80,3	85,0	4,7	5,85
S01T601	90,8	87,7	-3,1	-3,41

A Fig. 7.16 apresenta um gráfico de barras com os valores dos índices de articulação obtidos nos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização, fornecidos na Tabela 7.23.

Para os testes de articulação virtuais realizados com crianças que não participaram dos testes de articulação reais foram utilizados os resultados das gravações biauriculares registrados nas salas 5, 7 e 15 do IENF e na sala 1 do CEAP, para as mesmas quatro listas em cada sala. Nessas salas a diferença entre a maior e a menor média de acertos, entre listas, nos tars constam da Tabela 7.24.

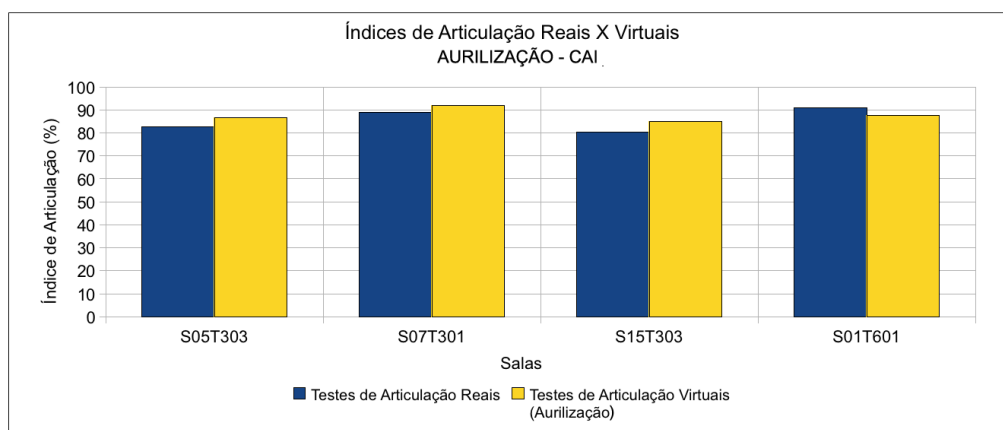


Figura 7.16: Índices de articulação reais e virtuais, a partir da aurilização com a CAI, para as 4 salas avaliadas, com as 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.

Tabela 7.24: Resumo das diferenças entre as médias dos índices de articulação das listas utilizadas nos testes de articulação reais realizados em quatro salas.

Sala	Menor média (%)	Maior média (%)	Diferença (%)
S05T303	75,5	87,0	11,5
S07T301	82,0	94,0	12,0
S15T302	78,5	87,5	9,0
S01T601	86,0	94,0	8,0

A principal conclusão que se extrai da Tabela 7.23 e da Fig. 7.16 é que a diferença média entre os índices de articulação extraídos dos testes de articulação reais e dos testes de articulação virtuais é de 3,73%, enquanto a média dos valores absolutos das diferenças médias relativas é de 4,39%. Como a diferença média é bem inferior à variação máxima de 12% encontrada *entre os resultados de diferentes listas* em uma mesma sala, como mostra a Tabela 7.24, conclui-se que a metodologia proposta possibilita uma avaliação confiável da inteligibilidade para salas de aula frequentadas por crianças.

7.7 STI e outros parâmetros acústicos medidos nas salas

Aqui são apresentadas os resultados do cálculo dos parâmetros STI, EDT, T30, C50 e D50, juntamente com os índices de articulação medidos, AI, para as dez salas de aula ensaiadas.

A partir das respostas impulsivas biauriculares levantadas nas salas de aula, alguns parâmetros acústicos, particularmente aqueles que guardam relação com a inteligibilidade da palavra, foram calculados. Para cada um dos parâmetros foi efetuada a média das seis respostas impulsivas obtidas (para os dois ouvidos e três posições da cabeça artificial infantil), exceto para o STI para o qual, segundo a norma IEC 60268-16, de 2010 [13], foi tomado o valor mais alto entre os obtidos para cada um dos dois ouvidos. Nesse caso, mantendo o espírito da norma, foi também considerado o maior valor entre as três posições da cabeça.

A Tabela 7.25 apresenta os valores dos parâmetros EDT, T30, C50, D50 e STI, calculados para as dez salas avaliadas. Na penúltima coluna apresentam-se os valores médios obtidos dos testes de articulação reais, ou seja, os índices de articulação (AI), apurados nas salas. Na última coluna é apresentada, a título de comparação, a razão R entre o AI medido e o STI calculado, convertido para percentual, dado por

$$R = \frac{\text{AI}}{\text{STI} \times 100}. \quad (7.3)$$

Tabela 7.25: Resultados de alguns parâmetros acústicos, para as dez salas de aula ensaiadas, juntamente com os índices de articulação (AI), obtidos para as mesmas salas.

Sala	EDT (s)	T30 (s)	C50 (dB)	D50 (%)	STI	AI (%)	R
S04T402	0,81	0,91	5,43	72,22	0,72	82,8	1,15
S05T303	0,62	0,68	6,21	80,65	0,71	81,0	1,14
S06T401	0,72	0,73	5,16	76,33	0,72	91,3	1,27
S07T301	0,79	0,86	4,33	72,96	0,67	88,4	1,32
S09T503	0,82	0,84	6,31	79,98	0,75	87,8	1,17
S10T502	0,84	0,86	3,63	69,62	0,65	87,8	1,35
S11T501	0,85	0,84	4,85	75,17	0,67	87,7	1,31
S15T302	0,59	0,80	7,12	83,42	0,73	82,0	1,12
S01T601	0,92	1,11	4,27	72,09	0,70	89,6	1,28
S05T605	0,94	0,98	4,13	71,84	0,66	82,8	1,25

Como pode ser observado nas três últimas colunas da Tabela 7.25, o STI parece sub-avaliar o índice de articulação. Observe-se que a média dos valores de R é 1,24, o que indicaria uma avaliação da inteligibilidade pelo STI cerca de 25% inferior aos medidos pelos testes de articulação reais. Efetivamente, todos os valores calculados para o STI estão na faixa entre 0,60 e 0,75, ou seja, o STI é considerado “bom”,

segundo a norma IEC 60268-16, de 2010 [13]. Contudo, os AI's medidos estão contidos na faixa entre 81 a 91,3% (que poderiam ser considerados como "ótimos").

É interessante observar que, em alguns casos, o parâmetro D_{50} aproximou-se bastante do AI como, por exemplo, na sala S05T303, onde $D_{50} = 80,65\%$ e $AI = 81\%$. Entretanto, essa não se mostrou uma regra geral, pois, por exemplo, na sala S04T402, o parâmetro $D_{50} = 72,22\%$, o $STI = 0,72$, enquanto o $AI = 82,8\%$.

Dentre os parâmetros acústicos constantes da Tabela 7.25, o STI é aquele mais recomendado para a avaliação da inteligibilidade da palavra em ambientes e, como os demais, depende exclusivamente da resposta impulsiva no ponto de medição. Todos os ensaios em salas realizados neste trabalho envolvem gravações biauriculares, o que levanta a questão de qual dos canais considerar. Somente a partir da versão 4 da norma IEC 60268-16, de 2010 [13], há uma indicação de que o STI pode ser avaliado a partir de gravações biauriculares, tomando-se o maior entre os valores obtidos com cada um dos dois canais. Contudo, como já mencionado, se verificou que nas salas ensaiadas o STI subavaliou o índice de articulação médio em cerca de 25%, como mostram os valores de R da Tabela 7.25.

Capítulo 8

Conclusões

Este trabalho objetivou desenvolver, testar, validar e apresentar uma nova metodologia para a avaliação da inteligibilidade em salas de aula do ensino fundamental. A metodologia proposta baseia-se na utilização de cabeças artificiais com dimensões antropométricas infantis para registrar as respostas impulsivas biauriculares em algumas posições na sala de aula. A partir desses registros, um procedimento de geração de realidade virtual acústica — a aurilização — foi executado, e testes de articulação virtuais foram aplicados a 36 crianças. A conclusão geral é que os testes de articulação virtuais mostraram-se fidedignos o bastante para serem utilizados na avaliação do índice de articulação das salas.

Para a validação da técnica, testes de articulação reais foram aplicados em diversas turmas de escolas públicas, num total de dez salas de aula do 3^o ao 6^o anos do ensino fundamental. Os resultados comparativos entre os índices de articulação obtidos nos testes virtuais e nos testes reais demonstraram que a diferença média, da ordem de 3%, é inferior à obtida entre diferentes testes de articulação reais (diferentes listas) em uma mesma sala.

A metodologia adotada para a geração das aurilizações mostrou-se satisfatória. A utilização da varredura em frequência como sinal de excitação, a aplicação de pré-ênfase para corrigir a não-linearidade do orador artificial e a aplicação de filtros de correção aos sinais enviados ao fone de ouvido, permitiram a obtenção de um sinal de aurilização com uma fidedignidade excelente frente aos sons ouvidos pelos alunos durante os testes de articulação reais nas salas de aula, como demonstraram os resultados comparativos. Um dos elementos que contribuíram para o sucesso da metodologia de geração de aurilizações foi o procedimento de corte, que permitiu a re-inserção do ruído de fundo que estava presente nos testes de articulação reais.

Os testes de articulação virtuais a partir da aurilização aplicados a outras crianças da mesma faixa etária, que não pertenciam às turmas das salas avaliadas, serviram para reconfirmar a validade da metodologia. Embora realizado com um universo reduzido de crianças, mostram também uma diferença média inferior a 3%,

quando comparados com o índice de articulação da sala. Em resumo, testes de articulação virtuais via aurilização com cabeça artificial infantil podem ser utilizados para avaliar a inteligibilidade em salas da aula do ensino fundamental.

Em uma das salas estudadas, foram também feitas gravações biauriculares com uma cabeça artificial de adulto. Essas gravações passaram pelo mesmo processamento de sinais para a geração de realidade virtual acústica. Contudo, ao aplicar-se as aurilizações resultantes às mesmas crianças, os resultados mostraram-se totalmente inadequado, com diferenças, nos índices de articulação, superiores a 20% em relação aos reais.

Visando verificar se o resultado obtido, utilizando cabeça artificial de adulto para aurilização aplicada a crianças, pudesse ser fruto de um eventual defeito ou baixa performance do equipamento, foi feito ainda um teste com um público adulto na mesma sala de aula. Verificou-se que, para adultos, os testes de articulação reais e virtuais resultaram bastante próximos, levando a uma diferença da mesma ordem de grandeza daquela obtida na comparação entre os testes de articulação reais e virtuais com cabeça artificial infantil, para um público infantil.

Conclui-se, portanto, é que cabeças artificiais de adulto se prestam à avaliação de inteligibilidade em salas com público adulto, e que cabeças artificiais infantis se prestam à avaliação de inteligibilidade em salas com público infantil. Essa conclusão está em sintonia com os resultados apresentados por Fels [24], que mostram que as funções de transferência associadas à cabeça humana evoluem com o crescimento da cabeça e da parte superior do torso, resultando em que o panorama auditivo de adultos e crianças seja de fato distinto.

É interessante observar que os testes de articulação via aurilização, por serem conduzidos individualmente, também permitem que crianças ainda não alfabetizadas possam participar dos ensaios, repetindo os monossílabos ouvidos para que o profissional responsável pela condução do teste possa anotá-los e obter, ao final do teste, o índice de articulação para salas de aula com turmas em processo de alfabetização. Isso, contudo, não foi testado nas escolas consideradas. Adicionalmente, uma cabeça artificial infantil com dimensões ainda menores deveria ser utilizada.

Embora o universo de salas estudadas nessa pesquisa seja relativamente pequeno, a utilização da metodologia aqui proposta mostrou-se bem confiável, indicando que a técnica pode ser aplicada em salas de aula sem a necessidade da presença dos alunos, bastando para tal que estes se submetam aos testes de articulação virtuais via aurilização. Nesse caso, uma amostra do ruído de fundo característico da sala deverá ser gravada pela cabeça artificial infantil, digamos, após os sweeps, para ser adicionada à aurilização.

A técnica desenvolvida neste trabalho poderia ser utilizada, também, a partir de simulação, para salas de aula ainda não construídas. Bons simuladores de acústica

de salas são capazes de gerar respostas impulsivas biauriculares bastante confiáveis a partir de arquivos computacionais com a geometria da sala e informações adicionais de materiais de revestimento. As aurilizações podem ser então produzidas pelo mesmo procedimento descrito neste trabalho. Contudo, se não houver informação sobre o ruído de fundo, as aurilizações soarão como se a sala fosse isolada acusticamente, podendo resultar em uma diferença de avaliação da inteligibilidade da palavra.

Segundo os resultados obtidos neste trabalho, o STI — resultantes também do levantamento das respostas impulsivas em alguns pontos da sala — parece subavaliar a inteligibilidade da palavra medida por meio de índices de articulação. Nesse sentido, a técnica aqui apresentada mostrou-se mais confiável e precisa.

8.1 Propostas para trabalhos futuros

O desenvolvimento desta pesquisa também nos levou a vários outros possíveis caminhos de desenvolvimentos futuros, dentre os quais podemos citar:

1. Realizar avaliação de inteligibilidade em salas de aula com ruído de fundo variável;
2. Realizar avaliação de inteligibilidade em salas de aula com geometrias e reverberação diferenciadas;
3. Desenvolver parâmetros de qualidade acústica adequados a crianças;
4. Dar maior atenção à relação sinal-ruído durante testes de inteligibilidade;
5. Fazer o levantamento de respostas impulsivas biauriculares utilizando como fonte de excitação um dodecaedro;
6. Calcular outros parâmetros tais o IACC, o U_{50} e o U_{50}^k ;
7. Utilizar a metodologia aqui descrita para avaliar inteligibilidade em salas de aula virtuais, utilizando, para a geração das respostas impulsivas biauriculares, o programa de simulação RAIOS.

Referências Bibliográficas

- [1] HUNT, F. *Origins in Acoustics*. Woodbury, Acoustical Society of America, 1992.
- [2] VITRUVIUS, P. *Tratado de Arquitetura*. São Paulo, Martins Fontes, 2007.
- [3] SEEP, B. “Acústica das salas de aula: um recurso para criar ambientes de aprendizado com condições desejáveis de audibilidade”, *Acústica e Vibrações*, v. 29, 2002.
- [4] COSTA, R., QUERIDO, J. G. “A qualidade acústica ambiental nas salas de aula das escolas públicas, sua influência no processo ensino-aprendizado e na qualidade de vida do professor”, *Acústica e Vibrações*, v. 40, pp. 10–20, 2009.
- [5] DREOSSI, R. C. F., MOMENSOHN – SANTOS, T. “O ruído e sua interferência sobre estudantes em uma sala de aula: revisão de literatura”, *Pró-Fono Revista de Atualização Científica*, v. 17, n. 2, pp. 251–258, 2005.
- [6] BRADLEY, J. S., REICH, R. D., NORCROSS, S. G. “On the combined effects of signal-to-noise ratio in room acoustics on speech intelligibility”, *Journal Acoustical Society of America*, v. 106, pp. 1820–1828, 1999.
- [7] YANG, W., BRADLEY, J. S. “Effects of room acoustics on the intelligibility of speech in classrooms for young children”, *Journal Acoustical Society of America*, v. 125, n. 2, pp. 922–933, 2009.
- [8] BRADLEY, J. S. “Speech intelligibility studies in classrooms”, *Journal Acoustical Society of America*, v. 80, n. 3, pp. 846–854, 1986.
- [9] MEDRADO, L. O. *Avaliação da inteligibilidade de salas de aula de graduação na Universidade Federal do Rio de Janeiro*. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Mecânica da COPPE, Rio de Janeiro, 2004.
- [10] MEDRADO, L. O., TENENBAUM, R. A. “Speech intelligibility study in university classrooms: An improved metric to assess high background noise levels”. In: *Proceedings of 34th Internoise*, Rio de Janeiro, 2005.

- [11] HOUTGAST, T., STEENEKEN, H. J. M. “The modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility”, *Acustica*, v. 28, pp. 66–73, 1973.
- [12] IEC-60268-16. *Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index*. Versão 3, 2003.
- [13] IEC-60268-16. *Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index*. Versão 4, 2010.
- [14] SCHROEDER, M. R. “Modulation transfer function: Definition and measurement”, *Acustica*, v. 49, pp. 179–182, 1981.
- [15] MÜLLER, S. “Avaliação da inteligibilidade com o STI”, *Acústica e Vibrações*, v. 38, pp. 25–38, 2007.
- [16] MÜLLER, S. “Novidades do STI”. In: *Anais do XXIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica*, Salvador, 2010.
- [17] BRADLEY, J. S. “Predictors of speech intelligibility in rooms”, *Journal Acoustical Society of America*, v. 80, n. 3, pp. 837–845, 1986.
- [18] BISTAFA, S. R., BRADLEY, J. S. “Reverberation time and maximum background noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics”, *Journal Acoustical Society of America*, v. 107, pp. 861–875, 2000.
- [19] BRADLEY, J. S., SATO, H., PICARD, M. “On the importance of early reflection for speech in rooms”, *Journal Acoustical Society of America*, v. 113, n. 6, pp. 3233–3244, 2003.
- [20] SATO, H., BRADLEY, J. S. “Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms”, *Journal Acoustical Society of America*, v. 123, n. 4, pp. 2064–2077, 2008.
- [21] BRADLEY, J. S., SATO, H. “A intelligibility of speech in elementary school classrooms”, *Journal Acoustical Society of America*, v. 123, n. 4, pp. 2078–2086, 2008.
- [22] NÁBĚLEK, A. K., PICKETT, J. M. “Reception of consonants in a classroom as affected by monaural and binaural listening, noise, reverberation, and hearing aids”, *Journal Acoustical Society of America*, v. 56, n. 2, pp. 628–639, 1974.

- [23] FARNETANI, A., FELS, J., PRODI, N., SMYRNOVA, Y. “Investigating Classroom Acoustics by Means of Advanced Reproduction Techniques”. In: *Proceedings of 122th Convention of the Audio Engineering Society*, p. 7087, Vienna, 2007.
- [24] FELS, J. *From children to adults: How binaural cues and ear canal impedances grow*. Ph.D. Thesis, Institut für Technische Akustik, Aachen University, Aachen, Germany, 2008.
- [25] FELS, J., FINGERHUTH, S. *Anthropometric data acquisition using photogrammetric techniques to obtain acoustic head-related transfer functions of children*. ITA, 2004.
- [26] FRENCH, N. R., STEINBERG, J. C. “Factors governing the intelligibility of speech sounds”, *Journal Acoustical Society of America*, v. 19, pp. 90–119, 1947.
- [27] THIELE, R. “Directional distribution and time sequence of return of sound in rooms”, *Acustica*, v. 3, n. 2, pp. 291–302, 1953.
- [28] KUTTRUFF, H. *Room Acoustics*. 4th ed. Berlin, Spon Press, 2000.
- [29] HOUTGAST, T., STEENEKEN, H. J. M., PLOMP, R. “Predicting speech intelligibility in rooms from the modulation transfer function”, *Acustica*, v. 46, pp. 60–72, 1980.
- [30] HOUTGAST, T., STEENEKEN, H. J. M. “A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria”, *Journal Acoustical Society of America*, v. 77, pp. 1069–1077, 1985.
- [31] STEENEKEN, H. J. M., HOUTGAST, T. “A physical method for measuring speech-transmission quality”, *Journal Acoustical Society of America*, v. 67, pp. 318–326, 1980.
- [32] ISO-3382. *Acoustics-Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to Others Acoustical Parameters*. International Organization for Standardization, 1997.
- [33] SABINE, W. C. *Collected Papers on Acoustics*. New York, Dover Publications (first published by Harvard University Press, 1922), 1964.
- [34] SCHROEDER, M. R. “New method for measuring reverberation time”, *Journal Acoustical Society of America*, v. 37, pp. 409, 1965.

- [35] REICHARDT, W., ABDEL ALIM, O., SCHMIDT, W. “Abhängigkeit der Grenzen zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Durchsichtigkeit von der Art des Musikmotives der Nachhallzeit und der Nachhalleinsatzzeit”, *Applied Acoustics*, v. 7, n. 4, pp. 243–264, 1974.
- [36] BERANEK, L. *Concert and Opera Halls: How They Sound*. Woodbury, Acoustical Society of America, 1996.
- [37] AIGNER, F., STRUTT, M. J. O. “On the physiological effects of several sources on the year and its consequences on architectural acoustics”, *Journal Acoustical Society of America*, v. 6, pp. 155–139, 1935.
- [38] LOCHNER, J. P. A., BURGER, J. F. “The influence of reflection in auditorium acoustics”, *Journal Sound and Vibration*, v. 1, pp. 426–454, 1964.
- [39] BLAUERT, J. *Spatial Hearing*. Cambridge, The MIT Press, 1997.
- [40] VORLÄNDER, M. *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Berlin, Springer, 2008.
- [41] SHAW, E. A. G. “External ear response and sound localization”. In: Gatehouse, W. (Ed.), *Localization of Sound: Theory and Applications*, Amphora, Groton CT, 1982.
- [42] GENUIT, K. *Ein Modell zur Beschreibung von Aussenohrübertragungseigenschaften* (A model for describing transfer-functions of the outer ear). Ph.D. Thesis, Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen University, Aachen, Germany, 1984.
- [43] GARDNER, W. G., MARTIN, K. D. “HRTF measurements of a KEMAR”, *Journal Acoustical Society of America*, v. 97, pp. 3907–3908, MIT website:<http://sound.media.mit.edu/KEMAR.html>, 1995.
- [44] ALGAZI, V. R., DUDA, O., THOMPSON, D. M., AVENDANO, C. “The CIPIC HRTF database”. In: *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, pp. 99–102, New Paltz, New York, 2001.
- [45] MEHRGARDT, S., MELLERT, V. “Transformation characteristics of the external human ear”, *Journal Acoustical Society of America*, v. 61, pp. 1567–1576, 1977.

- [46] TORRES, J. C. B., PETRAGLIA, M. R., TENENBAUM, R. A. “Sistema eficiente para auralização usando agrupamento e modelagem de HRTFs por wavelets”. In: *Anais do 4^o Congresso da AES Brasil, CD-ROM*, São Paulo, 2006.
- [47] SKUDRZYK, E. *The Foundations of Acoustics*. Wien, Springer-Verlag, 1971.
- [48] TENENBAUM, R. A., CAMILO, T. S., TORRES, J. C. B., GERGES, S. N. Y. “New hybrid method for numerical simulation of room acoustics with auralization: Part 1 – Theoretical and numerical aspects”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 29, n. 2, pp. 211–221, 2007.
- [49] SPANDÖCK, F. “Akustische Modellversuche”, *Annalen der Physik*, v. 20, pp. 345, 1934.
- [50] SCHROEDER, M. R., ATAL, B. S., BIRD, C. “Digital computers in room acoustics”. In: *Proc. 4th ICA*, p. M21, Copenhagen, 1962.
- [51] BORK, I. “A comparison of room acoustics software – the 2nd round robin on room acoustical computer simulation”, *Acustica united with Acta Acustica*, v. 84, pp. 943, 2000.
- [52] KLEINER, M., DALENBÄCK, B. I., SVESSON, P. “Auralization – an overview”, *Journal of the Audio Engineering Society*, v. 41, pp. 861, 1993.
- [53] FEDTKE, T. *Kunstkopftechnik - Eine Bestandsaufnahme, report, Eine Mitteilung aus dem Normenausschusses “Psychoakustische Messtechnik”*. NA 001-01-02-08 AK, vormals NALS A 2 AK 8, 2007.
- [54] MÜLLER, S. *Metrologia aplicada a qualidade acústica de salas de aula — Testes de inteligibilidade e medições binaurais em escolas públicas*. Relatório técnico INMETRO, 2004.
- [55] MØLLER, H., SØRENSEN, M. F., HAMMERSHØI, D., JENSEN, C. B. “Head-related transfer functions of human subjects”, *Journal of the Audio Engineering Society*, v. 43, n. 5, pp. 300–321, 1995.
- [56] FARINA, A. “Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine signal”. In: *Proceedings of 108th Convention of the Audio Engineering Society*, p. 350, Paris, 2000.
- [57] MÜLLER, S., MASSARANI, P. M. “Transfer-function measurements with sweeps”, *Journal of the Audio Engineering Society*, pp. 443–471, 2001.

- [58] SATOH, F., HIRANO, J., SAMOTO, S., TACHIBANA, H. “Sound propagation measurement using swept-sine signals”. In: *Proceedings of 34th Internoise*, Rio de Janeiro, 2005.
- [59] BRADLEY, J. S. “Optimizing the decay range in room acoustics measurements using maximum-length-sequences techniques”, *Journal of the Audio Engineering Society*, v. 44, pp. 266–273, 1996.
- [60] XIANG-GEN, X. “System identification using chirp signals and time-variant filters in the joint time-frequency domain”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 45, n. 8, pp. 2072–2084, 1997.
- [61] ALRUTZ, H., SCROEDER, M. R. “A fast Hadamart transform method for the evaluation of measurements using pseudorandom test signals”. In: *Proceedings of the 11th International Congress on Acoustics*, p. 235, Paris, 1983.
- [62] VORLÄNDER, M. “Application of maximum length sequences in acoustics”. In: *I Simpósio Brasileiro de Metrologia em Acústica e Vibrações e 17^o Encontro da SOBRAC*, p. 35, Petrópolis, RJ, 1996.
- [63] DUNN, C., HAWKSFORD, M. O. “Distortion immunity of MLS-derived response measurements”, *Journal Audio Engineering Society*, v. 41, n. 5, pp. 314–335, 1993.
- [64] BEHLER, G. K. “Uncertainties of measured parameters in room acoustics caused by the directivity of source and/or receiver”. In: *Proceedings of 33th Tecniacustica*, Sevilha, 2002.
- [65] BEHLER, G. K., MÜLLER, S. “Technique for the derivation of wide band room impulse responses”. In: *Proceedings of EEA Symposium on Architectural Acoustics*, Madri, 2000.
- [66] IEC-268. *Sound System Equipment Part 7: Headphones and Earphones*. 1996.


Apêndice A

Formulários para realização dos ensaios de campo

1. Modelo de formulário para registro do NPS

 LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO EM DINÂMICA, ACÚSTICA E VIBRAÇÕES	NÍVEL DE PRESSÃO SONORA			
ESCOLA: _____				
DATA: ____/____/20____ SALA/TURMA: ____/____				
Participaram do ensaios ____ alunos				
Professor (a): _____				
Temperatura: _____ °C				
Umidade do ar: _____ %.				
<i>Tabela: Registro da pressão sonora no SOLO dos ensaios realizados</i>				
Nº Medição no Solo	LAeq (dBA)	LCpk (dB)	Posição da cabeça	Observações
			1	1ª lista
			1	Sweep
			1	2ª lista
			2	3ª lista
			2	Sweep
			3	4ª lista
			3	Sweep

2. Modelo de formulário para o relatório de medição




LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO EM DINÂMICA, ACÚSTICA E VIBRAÇÕES

RELATÓRIO DE MEDIÇÃO

ESCOLA: _____

DATA: ____/____/20____ SALA/TURMA: ____/____



Temperatura (° C): _____ Umidade do ar (%): _____ Ruído de fundo (dBA): _____

Horário do início da medição: _____ Horário do término da medição: _____

Participaram do ensaios ____ alunos

Professor (a): _____

Tabela: Coordenadas das posições das cabeças artificiais, utilizadas no ensaio, na sala.

COORDENADAS:	X	Y	Z
ORADOR			
CABEÇA (1)			
CABEÇA (2)			
CABEÇA (3)			

Tabela: Registro da pressão sonora no SOLO dos ensaios realizados.

Nº Medição no Solo	LAeq (dBA)	LCpk (dB)	Posição da CAI ou CAA	Observações
			1	1ª lista
			1	Sweep
			1	2ª lista
			2	3ª lista
			2	Sweep
			3	4ª lista
			3	Sweep

OBSERVAÇÕES:

Apêndice B

Protocolo de medição em salas

1. Montagem do experimento

1. Verificar a tensão da sala de aula com o multímetro e anotar no Relatório de Medição.
2. Ligar o transformador, se necessário, a extensão e o filtro de linha.
3. Posicionar o notebook e o frontend CMF 22.
4. Posicionar o orador no local do professor.
5. Posicionar a cabeça infantil na posição 1 escolhida.
6. Conectar o canal de saída do frontend ao orador.
7. Conectar a cabeça infantil aos canais de entrada do frontend.
8. Inserir o cardbus no notebook.
9. Conectar o CMF22 Front End e o CardBus com o cabo *host*.
10. Conectar os equipamentos ao filtro de linha.
11. Ligar o filtro de linha, o notebook e o frontend, nessa ordem.
12. Anotar as coordenadas (x, y, z) do orador e da posição 1 da cabeça infantil.
13. Medir a temperatura e a umidade com o termo-higrômetro e anotá-las no Relatório de Medição.
14. Calibrar o medidor de pressão sonora e colocá-lo no tripé.
15. Medir o ruído de fundo (LAeq, 1 min) e anotar o resultado no Relatório de Medição.

16. Colocar as folhas do ditado numeradas e os lápis em todas as carteiras da sala de aula.
17. Iniciar fotografias para registro do posicionamento da cabeça artificial infantil e do orador artificial na sala.
18. Medir o NPS do orador a 1 m (LAeq, 1 min) e anotar o resultado no Relatório de Medição.

2. Nomeação de arquivos a serem gravados

Para nomeação de arquivos definiu-se um procedimento descrito a seguir:

1. O nome do arquivo deve possuir 8 caracteres devido à limitação do software de processamento de sinais Monkey Forest que opera em plataforma DOS.
2. Adotou-se, então, o código NXXLYYLL, onde: N = número da escola (1 para IENF e 2 para CEAP); XX = número da sala avaliada; L = L para lista, S para sweep ou R para resposta impulsiva; YY = posição da cabeça artificial infantil na sala ou o número da lista de monossílabos utilizada; LL = I para cabeça artificial infantil ou A para adulto e C para sala cheia ou V para vazia.
3. Anotar o nome (no formulário Protocolo de armazenamento de arquivos) do arquivo a ser gravado;
4. Salvar o arquivo e continuar o ensaio.

3. Testes de articulação e medição da resposta impulsiva (sala cheia)

1. Receber os alunos na sala de aula.
2. Explicar para turma o procedimento para o ensaio.
3. Reproduzir uma lista curta para demonstração e salvar segundo o protocolo definido para nomeação de arquivos.
4. Continuar fotografando o andamento do ensaio.
5. Reproduzir a primeira lista, gravando com a cabeça infantil e salvar segundo o protocolo.
6. Recolher as folhas do ditado da primeira lista e distribuir as folhas da segunda lista, anotando as posições.
7. Pedir silêncio, reproduzir o *sweep* e gravar a resposta impulsiva da sala com a cabeça infantil na posição 1, segundo o protocolo.

8. Mudar a cabeça infantil para a posição 2 e anotar as coordenadas.
9. Repetir procedimento para a segunda e terceira listas, salvando as respostas biauriculares segundo o protocolo.
10. Pedir silêncio, reproduzir o sweep e gravar a resposta impulsiva da sala com a cabeça infantil na posição 2, segundo o protocolo.
11. Mudar a cabeça infantil para a posição 3 e anotar as coordenadas.
12. Repetir procedimento para a quarta lista, salvando a resposta biauricular segundo o protocolo.
13. Pedir silêncio, reproduzir o sweep e gravar a resposta impulsiva da sala com a cabeça infantil na posição 3, segundo o protocolo.
14. Agradecer à professora e aos alunos solicitando à professora a retirada da turma.

4. Medição da resposta impulsiva (sala vazia)

1. Reproduzir o *sweep* e salvar a resposta impulsiva com a cabeça infantil na posição 3, segundo o protocolo.
2. Repetir item anterior para as posições 2 e 1 da cabeça, anotando as coordenadas.
3. Desligar e guardar os equipamentos.

Apêndice C

Resultados dos ensaios em campo

Na sequência, são apresentados todos os resultados experimentais dos testes de articulação reais e virtuais realizados em turmas do ensino fundamental em duas escolas públicas do estado do Rio de Janeiro.

C.1 Testes de articulação reais, com crianças

Nesta seção são apresentados os resultados dos testes de articulação reais realizados em 10 salas de aula com turmas do ensino fundamental, sendo 8 salas de aula pertencentes ao Instituto de Educação de Nova Friburgo - IENF, em Nova Friburgo, e 2 salas do Colégio Estadual Antônio Peçly - CEAP, em Cordeiro.

A Fig. C.1 mostra uma planta baixa da sala 4, do IENF, com os resultados médios dos testes de articulação reais para 26 alunos, da turma 402, do quarto ano do ensino fundamental. Esses resultados referem-se à média das quatro listas testadas na sala, indicando a posição de cada aluno, bem como as três posições da cabeça artificial infantil e do orador artificial na sala. As cores indicam os índices de articulação médios, por aluno, para as quatro listas. A planta baixa com os respectivos resultados médios dos testes de articulação reais das demais salas de aula avaliadas são mostradas nas Figuras (ímpares) C.3 a C.19.

As Tabelas C.1 a C.10 apresentam os valores encontrados para cada aluno e para cada lista, bem como as médias por aluno e média geral (índice de articulação da sala). As Figuras (pares) C.2 a C.20, mostram os valores dos testes de articulação reais, extraídos dessas Tabelas.

C.1.1 Instituto de Educação de Nova Friburgo - IENF

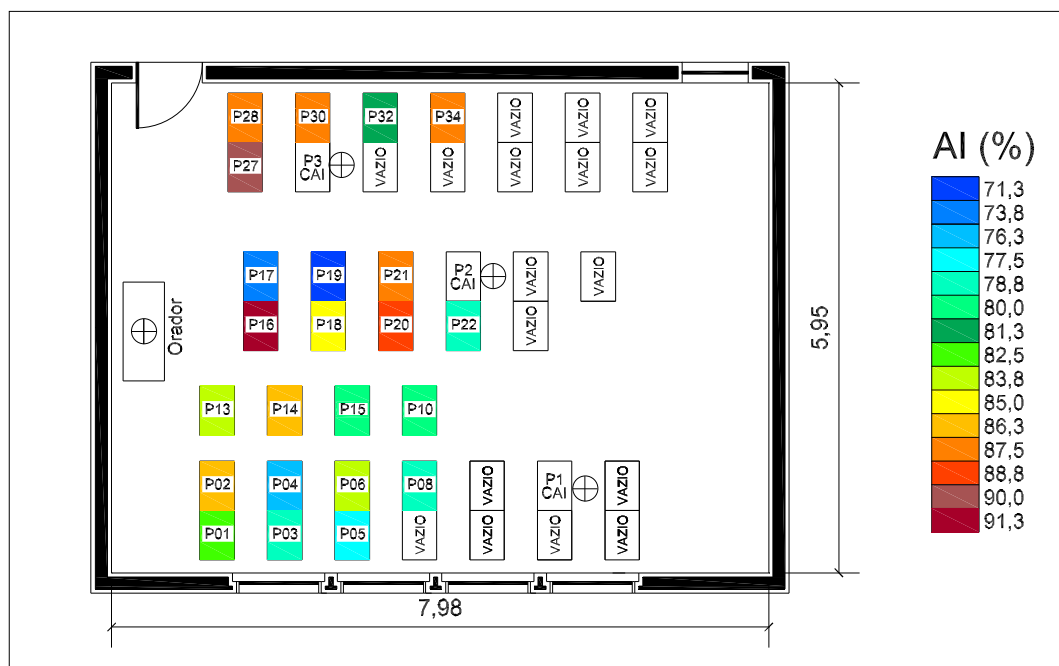


Figura C.1: Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 4, turma 402 do IENF.

Tabela C.1: Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 4, turma 402 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	L10	L11	L12	L15	Total	Total (%)
01	9	01	18	17	17	14	66	82,5
02	9	02	18	16	19	16	69	86,3
03	10	03	17	17	18	11	63	78,8
04	9	04	14	16	18	13	61	76,3
05	12	05	17	14	18	13	62	77,5
06	11	06	17	15	20	15	67	83,8
07	10	08	18	14	17	14	63	78,8
08	9	10	15	19	17	13	64	80,0
09	9	13	17	18	17	15	67	83,8
10	10	14	18	15	19	17	69	86,3
11	10	15	16	15	17	16	64	80,0
12	9	16	20	20	19	14	73	91,3
13	10	17	13	19	16	11	59	73,8
14	9	18	17	16	20	15	68	85,0
15	10	19	11	17	19	10	57	71,3
16	10	20	19	15	20	17	71	88,8
17	10	21	18	18	19	15	70	87,5
18	9	22	16	15	16	16	63	78,8
19	9	27	19	18	20	15	72	90,0
20	10	28	18	16	20	16	70	87,5
21	10	30	17	19	19	15	70	87,5
22	11	32	16	16	20	13	65	81,3
23	12	34	19	18	19	14	70	87,5
Médias			16,9	16,7	18,4	14,3	66,2	82,8

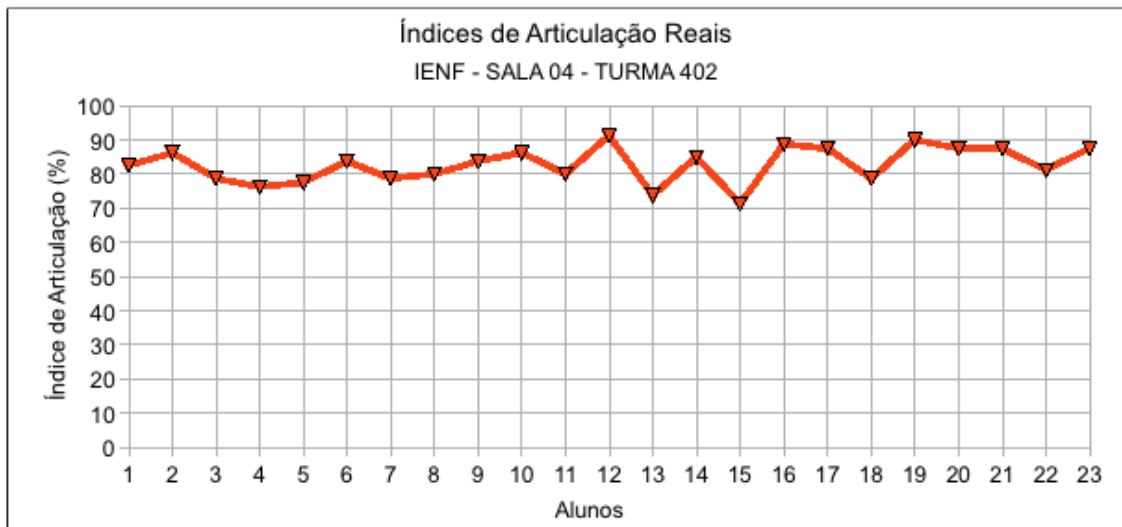


Figura C.2: Variação da inteligibilidade para os testes de articulação reais na sala 4, turma 402 do IENF.

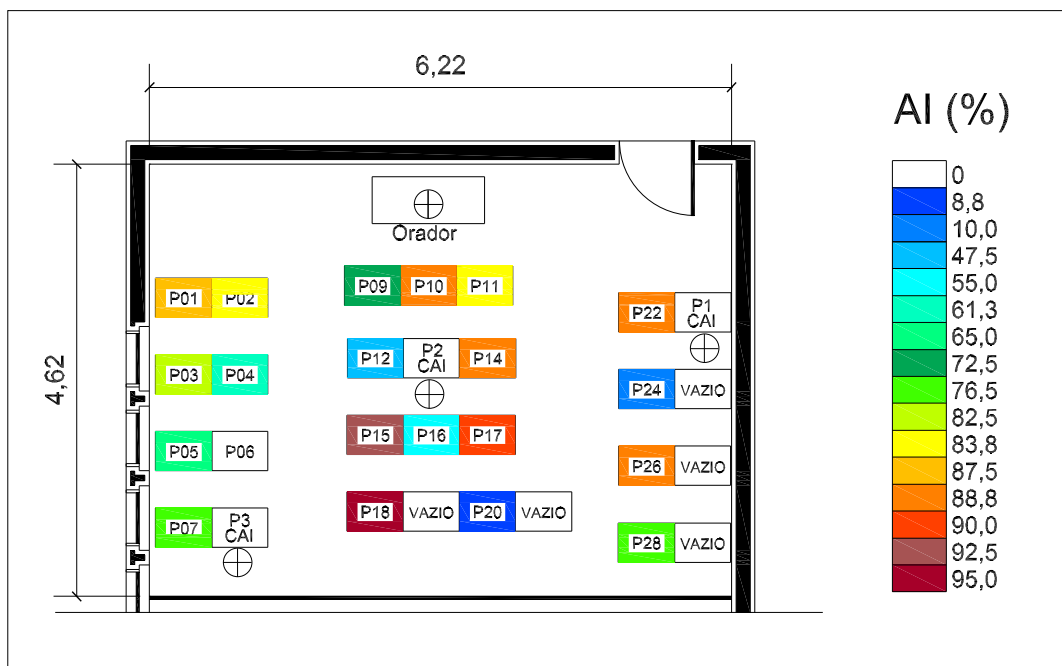


Figura C.3: Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 5, turma 303 do IENF.

Tabela C.2: Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 5, turma 303 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	L02	L03	L04	L05	Total	Total (%)
01	9	02	19	17	13	18	67	83,8
02	12	03	19	17	13	17	66	82,5
03	9	04	10	12	11	16	49	61,3
04	9	05	10	13	14	15	52	65,0
05*	10	06	0	0	0	0	0	0
06	9	07	17	17	11	16	61	76,3
07	9	08	18	19	15	18	70	87,5
08	10	09	15	15	11	17	58	72,5
09	10	10	17	17	18	19	71	88,8
10	10	11	19	15	16	17	67	83,8
11*	13	12	9	13	6	10	38	47,5
12	9	14	18	17	17	19	71	88,8
13	10	15	19	17	19	19	74	92,5
14	11	16	10	13	9	12	44	55,0
15	9	17	18	17	18	19	72	90,0
16	8	18	20	18	19	19	76	95,0
17*	14	20	0	2	1	4	7	8,8
18	9	22	16	18	19	18	71	88,8
19*	11	24	2	6	0	0	8	10,0
20	9	26	19	15	19	18	71	88,8
21	13	28	14	14	15	18	61	76,3
Médias			13,8	13,9	12,6	14,7	55	68,7
Médias R			16,4	15,9	15,1	17,4	64,8	81,0

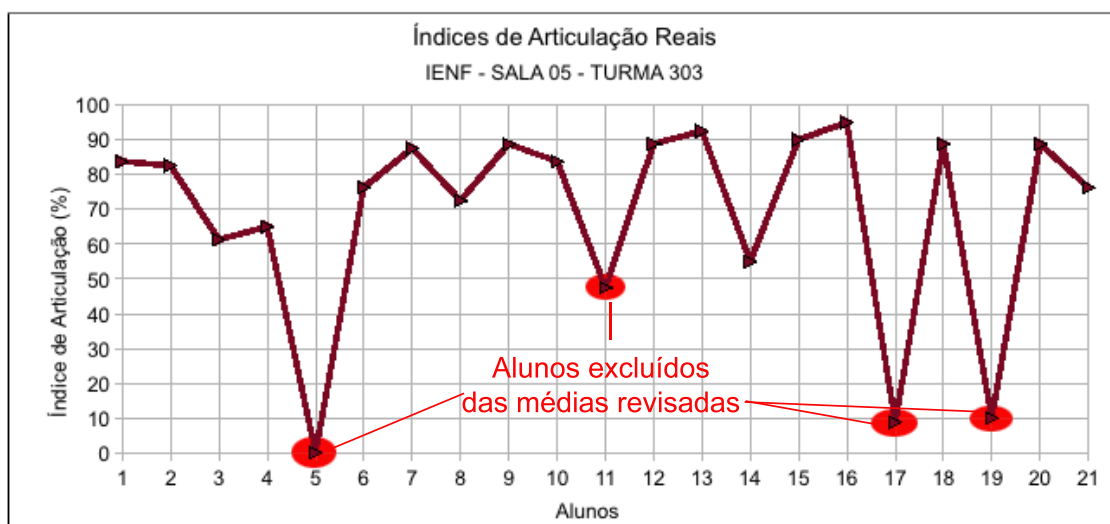


Figura C.4: Variação da inteligibilidade para os testes de articulação reais na sala 5, turma 303 do IENF.

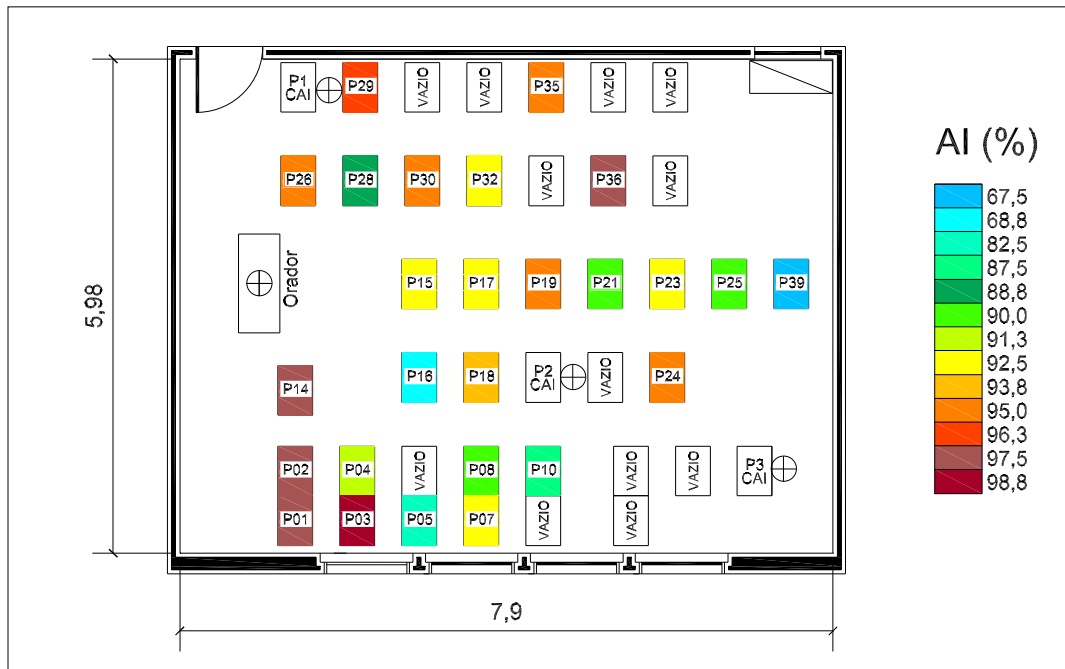


Figura C.5: Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 6, turma 401 do IENF.

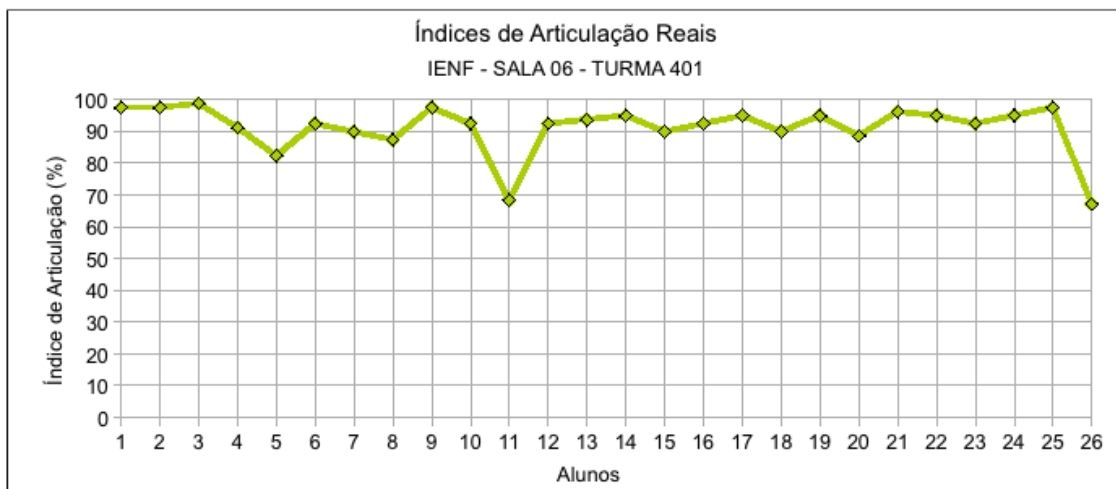


Figura C.6: Variação da inteligibilidade para os testes de articulação reais na sala 6, turma 401 do IENF.

Tabela C.3: Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 6, turma 401 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	L11	L02	L04	L05	Total	Total (%)
01	9	01	20	20	18	20	78	97,5
02	9	02	19	20	19	20	78	97,5
03	9	03	20	20	19	20	79	98,8
04	9	04	18	19	17	19	73	91,3
05	10	05	13	20	15	18	66	82,5
06	10	07	18	19	18	19	74	92,5
07	9	08	19	16	18	19	72	90,0
08	9	10	17	18	17	18	70	87,5
09	10	14	19	20	19	20	78	97,5
10	9	15	18	17	20	19	74	92,5
11	12	16	12	15	12	16	55	68,8
12	9	17	19	20	17	18	74	92,5
13	11	18	20	20	17	18	75	93,8
14	9	19	19	18	20	19	76	95,0
15	9	21	19	17	17	19	72	90,0
16	9	23	19	18	18	19	74	92,5
17	9	24	20	18	18	20	76	95,0
18	10	25	19	20	15	18	72	90,0
19	11	26	19	18	19	20	76	95,0
20	9	28	16	18	19	18	71	88,8
21	10	29	19	20	20	18	77	96,3
22	9	30	19	18	20	19	76	95,0
23	9	32	19	18	19	18	74	92,5
24	10	35	18	19	19	20	76	95,0
25	10	36	20	19	20	19	78	97,5
26	9	39	14	15	15	10	54	67,5
Médias			18,2	18,5	17,9	18,5	73,0	91,3

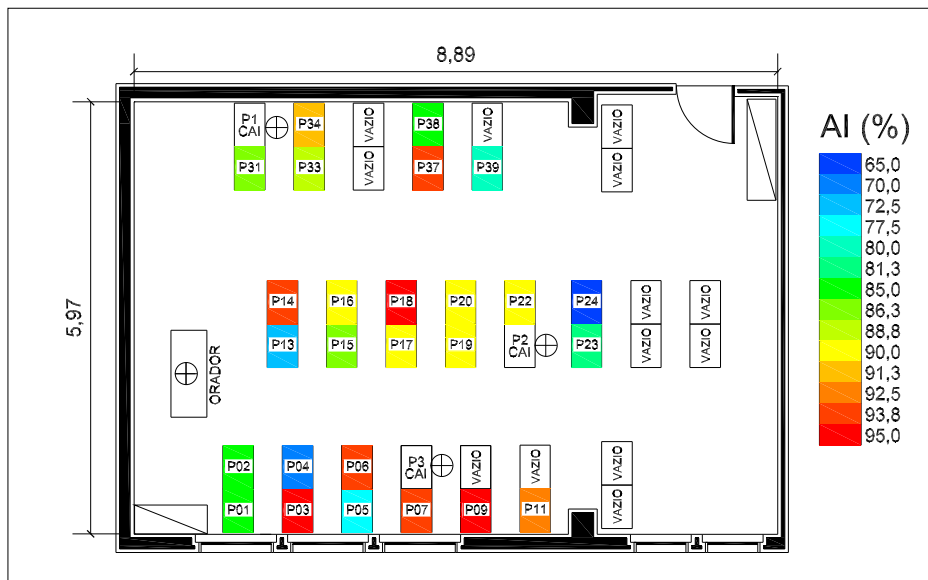


Figura C.7: Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 7, turma 301 do IENF.

Tabela C.4: Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 7, turma 301 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	L06	L07	L08	L13	Total	Total (%)
01	8	01	20	13	17	18	68	85,0
02	8	02	18	17	16	17	68	85,0
03	9	03	20	18	19	19	76	95,0
04*	9	04	15	15	13	13	56	70,0
05	9	05	18	11	16	17	62	77,5
06	9	06	19	18	18	20	75	93,8
07	9	07	19	18	18	20	75	93,8
08	8	09	19	18	19	20	76	95,0
09	9	11	19	16	19	20	74	92,5
10	8	13	14	12	16	16	58	72,5
11	8	14	19	19	19	18	75	93,8
12	9	15	18	16	17	18	69	86,3
13	10	16	20	16	16	20	72	90,0
14	9	17	19	17	17	19	72	90,0
15	9	18	19	20	17	20	76	95,0
16	8	19	19	16	18	19	72	90,0
17	9	20	18	17	17	20	72	90,0
18	9	22	19	18	17	18	72	90,0
19	8	23	17	13	17	18	65	81,3
20*	10	24	17	10	10	15	52	65,0
21	8	31	18	15	16	20	69	86,3
22	8	33	16	17	20	18	71	88,8
23	8	34	18	18	18	19	73	91,3
24	9	37	18	18	19	20	75	93,8
25	11	38	16	17	16	19	68	85,0
26	12	39	17	15	13	19	64	80,0
Médias			18,0	16,1	16,8	18,5	69,4	86,8
Médias R			18,2	16,4	17,3	18,8	70,7	88,4

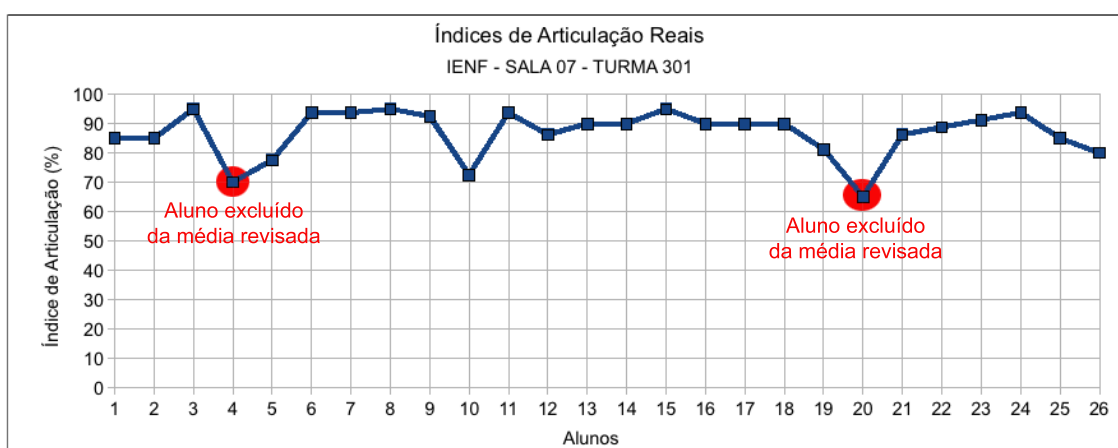


Figura C.8: Variação da inteligibilidade para os testes de articulação reais obtidos na sala 7, turma 301 do IENF.

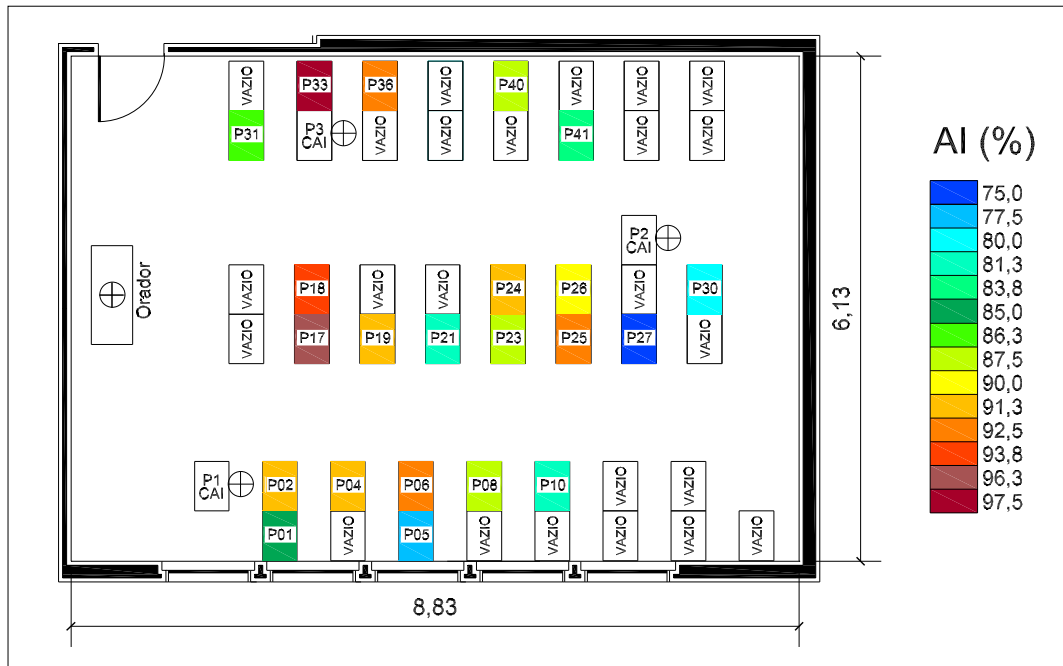


Figura C.9: Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 9, turma 503 do IENF.

Tabela C.5: Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 9, turma 503 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	L03	L04	L05	L13	Total	Total (%)
01	10	01	14	18	18	18	68	85,0
02	12	02	15	18	20	20	73	91,3
03	10	04	15	20	19	19	73	91,3
04	11	05	14	16	16	16	62	77,5
05	11	06	17	19	19	19	74	92,5
06	13	08	14	19	17	20	70	87,5
07	12	10	15	16	16	18	65	81,3
08	12	17	19	20	19	19	77	96,3
09	11	18	18	19	19	19	75	93,8
10	11	19	18	16	20	19	73	91,3
11	12	21	13	18	17	17	65	81,3
12	11	23	15	18	18	19	70	87,5
13	11	24	15	20	19	19	73	91,3
14	10	25	16	19	19	20	74	92,5
15	11	26	17	19	18	18	72	90,0
16	10	27	12	16	17	15	60	75,0
17	11	30	13	18	14	19	64	80,0
18	10	31	13	19	18	19	69	86,3
19	11	33	19	19	20	20	78	97,5
20	11	36	15	20	19	20	74	92,5
21	13	40	14	18	20	18	70	87,5
22	11	41	14	17	18	18	67	83,8
Médias			15,2	18,3	18,2	18,6	70,3	87,8

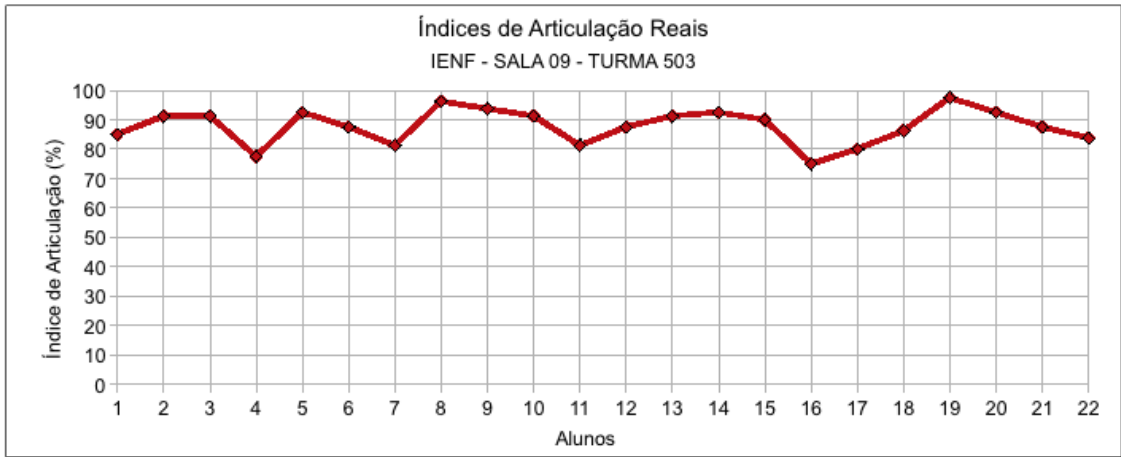


Figura C.10: Variação da inteligibilidade para os testes de articulação reais na sala 9, turma 503 do IENF.

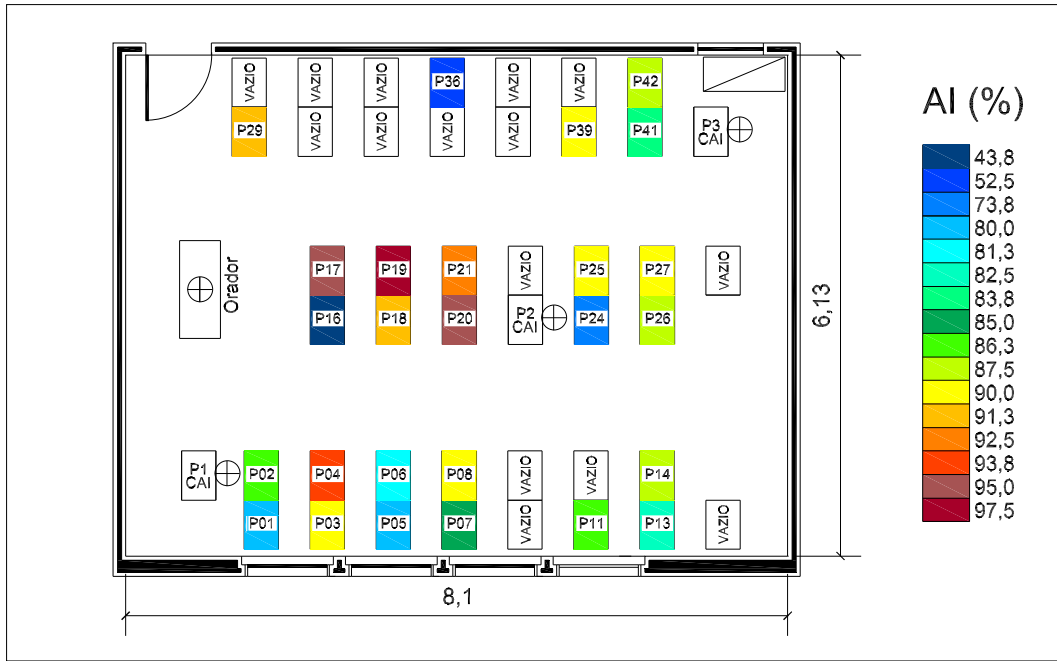


Figura C.11: Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 10, turma 502 do IENF.

Tabela C.6: Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 10, turma 502 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	L06	L07	L09	L14	Total	Total (%)
01	10	01	16	16	16	16	64	80,0
02	10	02	16	19	16	18	69	86,3
03	10	03	19	19	17	17	72	90,0
04	10	04	19	19	19	18	75	93,8
05	10	05	13	17	16	18	64	80,0
06	11	06	17	19	16	13	65	81,3
07	10	07	17	15	19	17	68	85,0
08	11	08	19	19	18	16	72	90,0
09	12	11	19	16	20	14	69	86,3
10	13	13	17	16	16	17	66	82,5
11	11	14	19	18	16	17	70	87,5
12*	10	16	8	14	5	8	35	43,8
13	10	17	19	20	20	17	76	95,0
14	11	18	19	18	17	19	73	91,3
15	11	19	19	19	20	20	78	97,5
16	10	20	20	20	19	17	76	95,0
17	12	21	20	19	18	17	74	92,5
18	10	24	17	13	15	14	59	73,8
19	11	25	19	17	17	19	72	90,0
20	12	26	20	17	17	16	70	87,5
21	10	27	20	17	17	18	72	90,0
22	12	29	18	19	19	17	73	91,3
23*	11	36	9	9	13	11	42	52,5
24	11	39	19	18	18	17	72	90,0
25	13	41	18	16	17	16	67	83,8
26	12	42	17	18	17	18	70	87,5
Médias			17,4	17,2	16,8	16,3	67,8	84,8
Médias R			18,2	17,7	17,5	16,9	70,3	87,8



Figura C.12: Variação da inteligibilidade para os testes de articulação reais na sala 10, turma 502 do IENF.

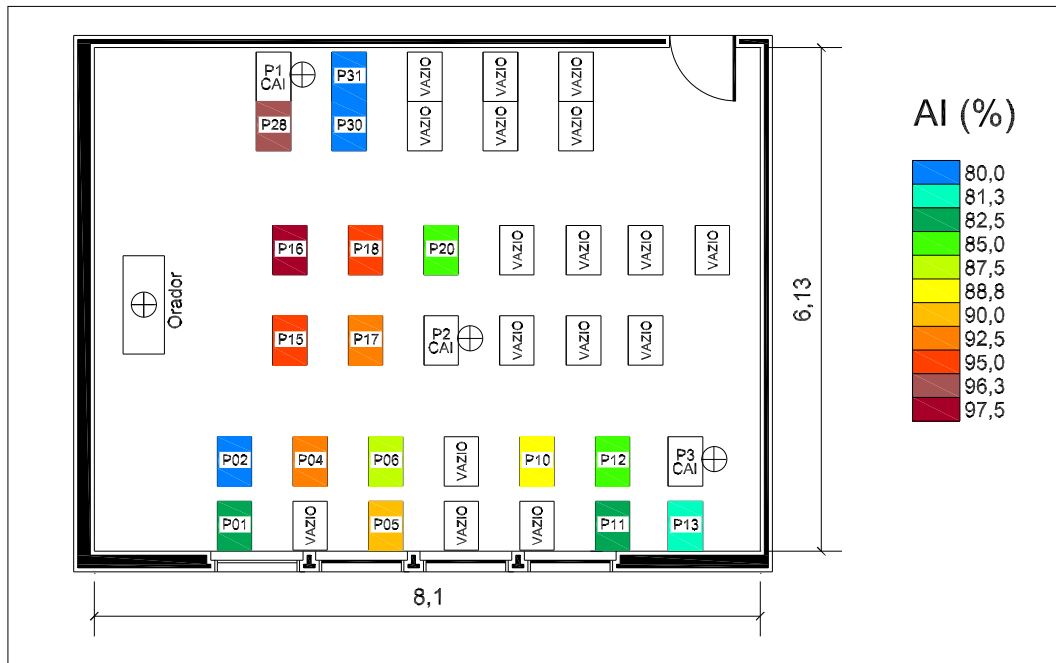


Figura C.13: Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 11, turma 501 do IENF.

Tabela C.7: Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 11, turma 501 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	L01	L02	L13	L14	Total	Total (%)
01	12	01	13	18	16	19	66	82,5
02	10	02	12	17	18	17	64	80,0
03	11	04	18	20	18	18	74	92,5
04	10	05	16	18	20	18	72	90,0
05	10	06	17	19	17	17	70	87,5
06	10	10	18	19	17	17	71	88,8
07	11	11	16	19	17	14	66	82,5
08	12	12	18	19	15	16	68	85,0
09	13	13	17	16	16	16	65	81,3
10	10	15	19	19	18	20	76	95,0
11	11	16	20	20	19	19	78	97,5
12	10	17	17	20	19	18	74	92,5
13	11	18	19	20	18	19	76	95,0
14	11	20	18	17	14	19	68	85,0
15	11	28	20	19	19	19	77	96,3
16	10	30	17	18	14	15	64	80,0
17	11	31	17	16	17	14	64	80,0
Médias			17,2	18,5	17,2	17,4	70,0	87,7

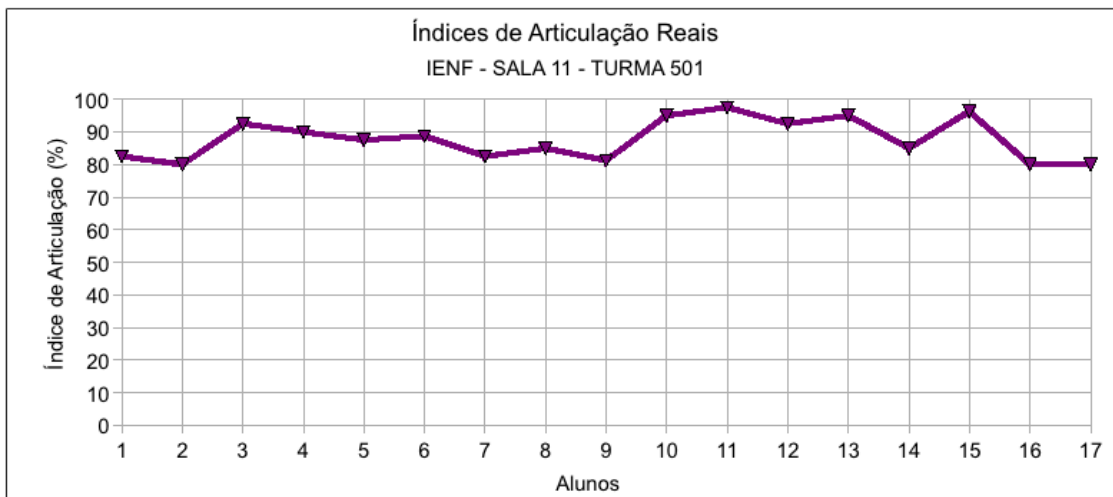


Figura C.14: Variação da inteligibilidade para os testes de articulação reais na sala 11, turma 501 do IENF.

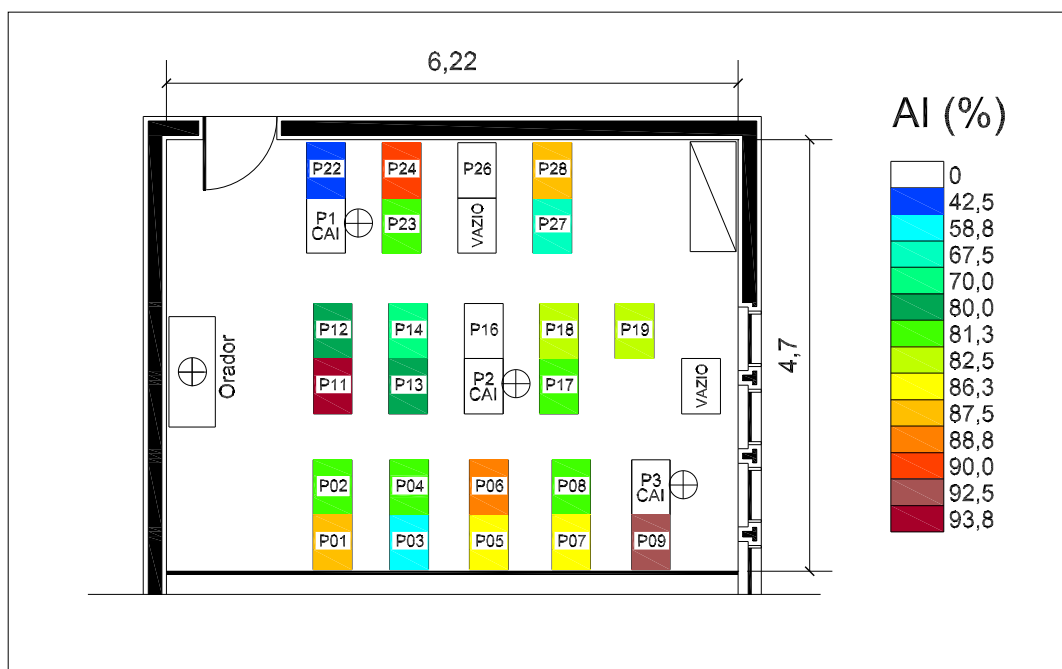


Figura C.15: Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 15, turma 302 do IENF.

Tabela C.8: Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 15, turma 302 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	L04	L08	L13	L15	Total	Total (%)
01	8	01	19	17	18	16	70	87,5
02	10	02	17	15	17	16	65	81,3
03	11	03	9	9	17	12	47	58,8
04	8	04	17	16	17	15	65	81,3
05	8	05	18	17	18	16	69	86,3
06	9	06	19	17	19	16	71	88,8
07	8	07	17	17	18	17	69	86,3
08	8	08	16	16	16	17	65	81,3
09	9	09	19	17	20	18	74	92,5
10	9	11	19	19	19	18	75	93,8
11	9	12	15	16	17	16	64	80,0
12	8	13	19	16	16	13	64	80,0
13	8	14	11	14	18	13	56	70,0
14*	9	16	0	0	0	0	0	0
15	8	17	15	17	16	17	65	81,3
16	8	18	17	17	16	16	66	82,5
17	9	19	19	12	18	17	66	82,5
18*	8	22	1	10	11	12	34	42,5
19	8	23	16	16	19	14	65	81,3
20	9	24	19	18	19	16	72	90,0
21*	10	26	0	0	0	0	0	0
22	8	27	14	14	11	15	54	67,5
23	8	28	15	19	20	16	70	87,5
Médias			14,4	14,3	15,7	14,2	58,5	73,2
Médias R			16,5	16,0	17,5	15,7	65,6	82,0

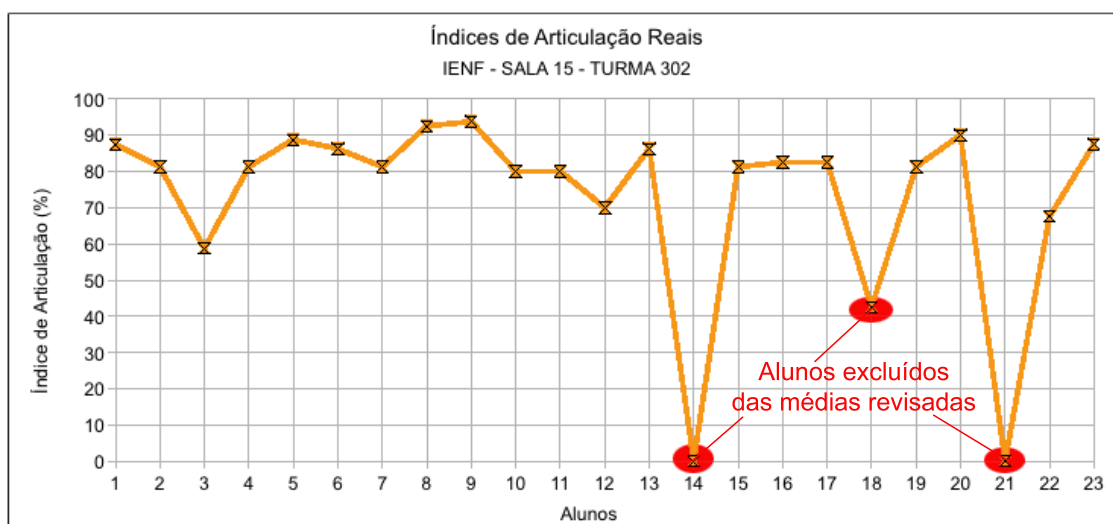


Figura C.16: Variação da inteligibilidade para os testes de articulação reais na sala 15, turma 302 do IENF.

C.1.2 Colégio Estadual Antônio Peçly - CEAP

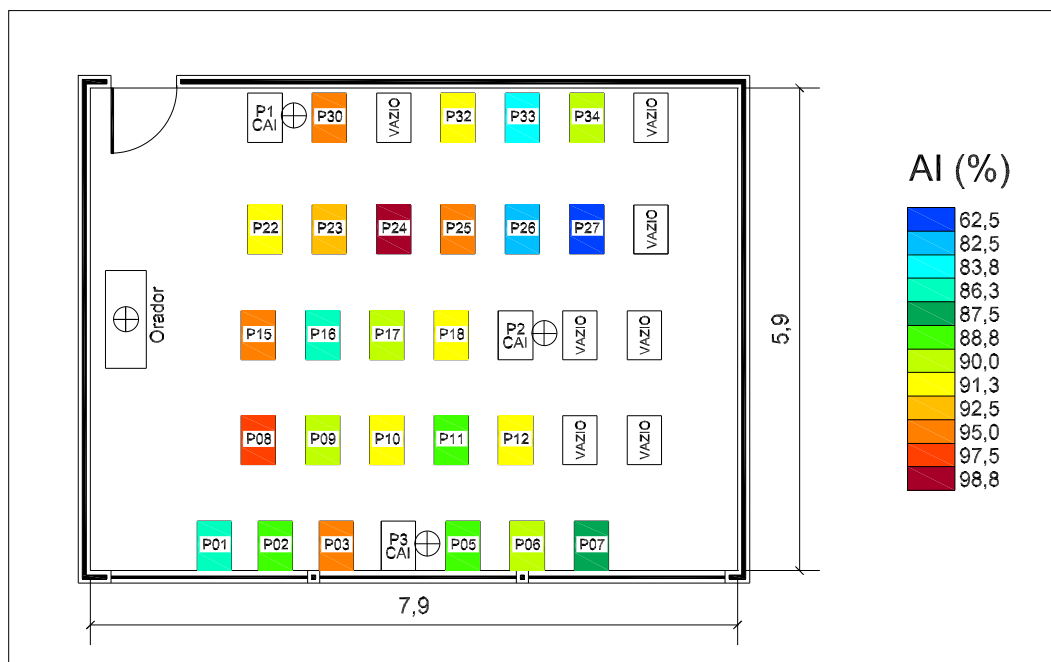


Figura C.17: Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 1, turma 601 do CEAP.

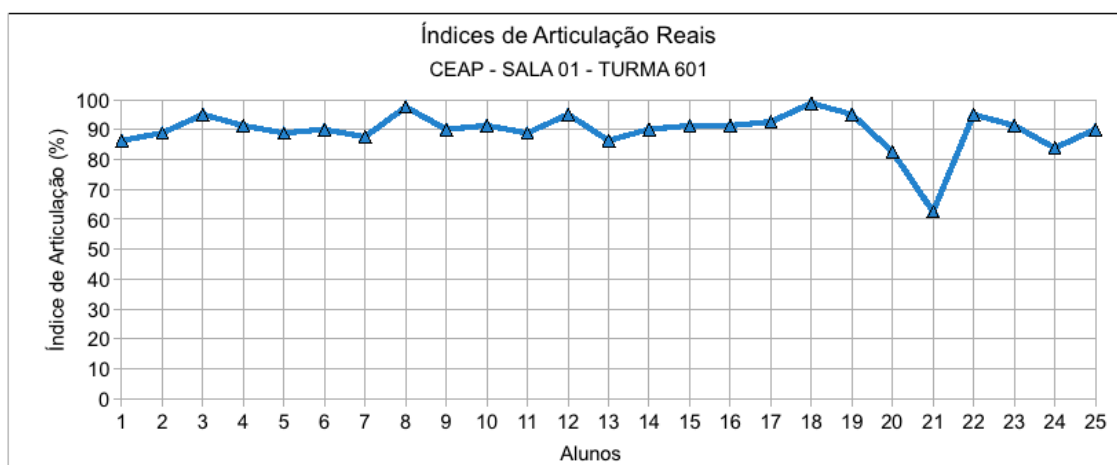


Figura C.18: Variação da inteligibilidade para os testes de articulação reais na sala 1, turma 601 do CEAP.

Tabela C.9: Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 1, turma 601 do CEAP.

Aluno	Idade	Posição	L10	L11	L12	L15	Total	Total (%)
01	12	01	18	18	18	15	69	86,3
02	11	02	17	18	19	17	71	88,8
03	12	03	20	18	20	18	76	95,0
04	11	05	19	17	20	15	71	88,8
05	11	06	17	18	20	17	72	90,0
06	14	07	18	17	18	17	70	87,5
07	12	08	20	20	20	18	78	97,5
08	11	09	20	16	18	18	72	90,0
09	13	10	18	19	18	18	73	91,3
10	16	11	18	17	20	16	71	88,8
11	11	12	18	17	19	19	73	91,3
12	11	15	19	20	20	17	76	95,0
13	15	16	19	17	17	16	69	86,3
14	13	17	17	17	20	18	72	90,0
15	11	18	18	17	19	19	73	91,3
16	12	22	18	19	20	16	73	91,3
17	11	23	18	19	19	18	74	92,5
18	12	24	20	20	20	19	79	98,8
19	13	25	19	18	20	19	76	95,0
20	12	26	13	18	19	16	66	82,5
21	13	27	14	10	13	13	50	62,5
22	12	30	19	19	19	19	76	95,0
23	11	32	17	18	19	19	73	91,3
24	14	33	17	17	18	15	67	83,8
25	12	34	17	20	17	18	72	90,0
Médias			17,9	17,8	18,8	17,2	71,7	89,6

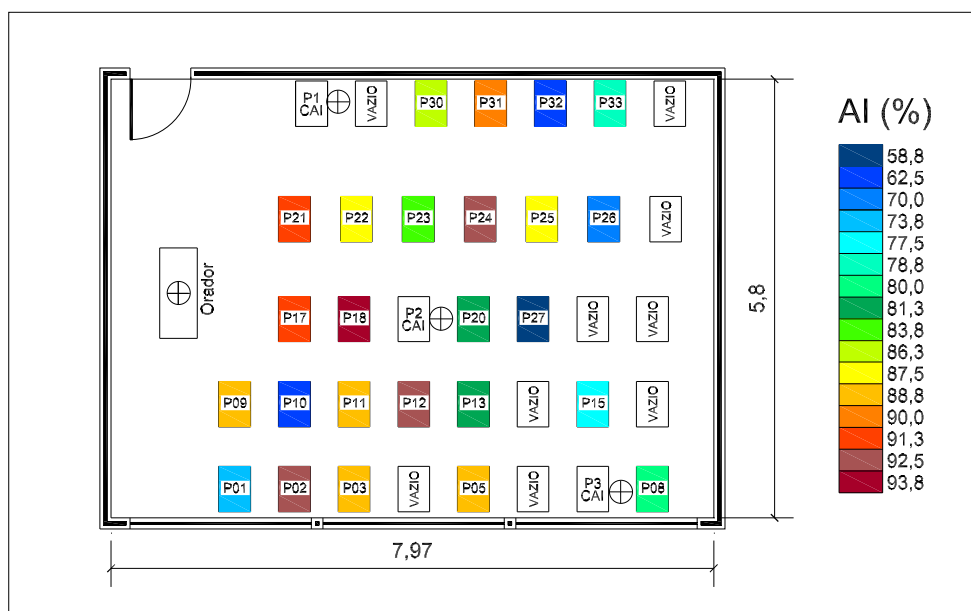


Figura C.19: Mapa de cores com os resultados médios, por aluno/posição, dos testes de articulação reais (TAR), obtidos na sala 5, turma 605 do CEAP.

Tabela C.10: Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 5, turma 605 do CEAP.

Aluno	Idade	Posição	L03	L04	L05	L13	Total	Total (%)
01	11	01	12	15	13	19	59	73,8
02	12	02	17	20	18	19	74	92,5
03	11	03	18	16	19	1188	71	88,8
04	11	05	17	18	18	18	71	88,8
05	12	08	14	16	17	17	64	80,0
06	11	09	17	19	17	18	71	88,8
07	14	10	15	11	12	12	50	62,5
08	11	11	18	15	19	19	71	88,8
09	13	12	18	18	19	19	74	92,5
10	12	13	17	14	16	18	65	81,3
11	11	15	14	16	15	17	62	77,5
12	12	17	16	18	19	20	73	91,3
13	12	18	17	18	20	20	75	93,8
14	13	20	14	18	18	15	65	81,3
15	12	21	18	16	19	20	73	91,3
16	13	22	17	16	18	19	70	87,5
17	12	23	15	19	18	15	67	83,8
18	12	24	18	19	19	18	74	92,5
19	14	25	16	18	18	18	70	87,5
20	14	26	09	14	17	16	56	70,0
21	14	27	13	12	10	12	47	58,8
22	11	30	17	16	17	19	69	86,3
23	11	31	16	17	19	20	72	90,0
24	14	32	11	13	13	13	50	62,5
25	13	33	13	15	15	20	63	78,8
Médias			15,5	16,3	16,9	17,6	62,2	82,8

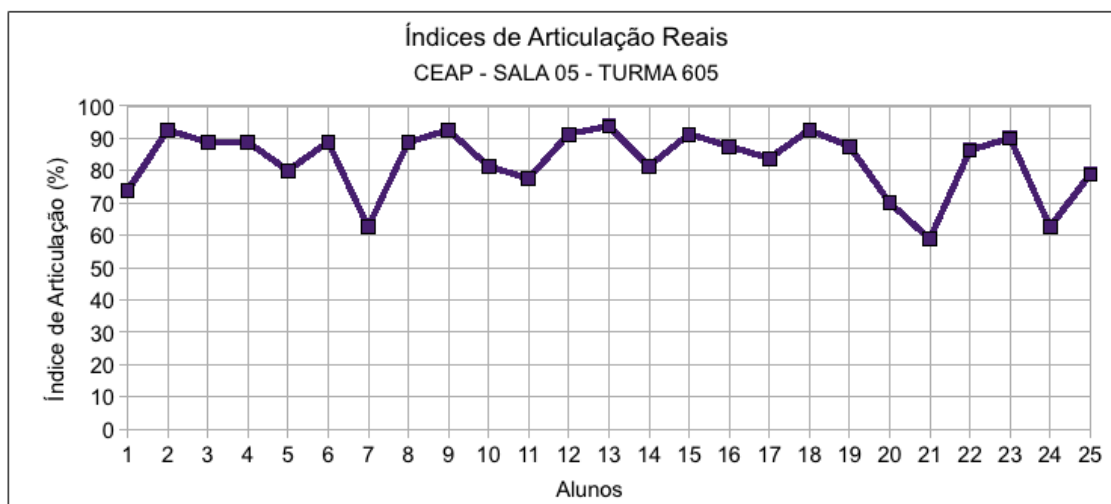


Figura C.20: Variação da Inteligibilidade para os Testes de Articulação Reais na sala 5, turma 605, do CEAP.

C.2 Testes de articulação reais, com adultos

A Tabela C.11 apresenta os acertos obtidos por quatro adultos que realizaram o teste de articulação real, na sala 7, turma 301 do IENF, para quatro listas de oitenta monossílabos no total.

Tabela C.11: Resultados dos testes de articulação reais, obtidos na sala 7 do IENF, com 4 adultos.

Adulto	L06	L07	L08	L13	Total	Total (%)
01	20	19	17	17	73	91,3
02	20	19	15	19	73	91,3
03	20	17	18	19	74	92,5
04	20	20	16	20	76	95,0
Médias	20,0	18,8	16,5	18,8	74,0	92,5

C.3 Testes de articulação virtuais, com crianças

C.3.1 Gravação biauricular modificada, a partir da CAI

A seguir são apresentados os resultados comparativos entre os testes de articulação reais e virtuais com gravação biauricular modificada, para as diferentes listas de monossílabos utilizadas nas salas S05T303, S06T401, S07T301 e S15T302.

A Tabela C.12 apresenta os valores obtidos nos testes de articulação reais e virtuais com gravação biauricular modificada, a partir da CAI, na sala 5 do IENF, para alunos localizados nas proximidades da cabeça artificial infantil, bem como as médias por aluno e geral (índice de articulação da sala). Os resultados das demais salas são apresentados nas Tabelas C.13 a C.15.

Tabela C.12: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAI, para a lista 04 na sala 5, turma 303 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L04	TAV1 L04	TAR L04(%)	TAV1 L04(%)
06	9	07-P3	11	13	55	65
09	10	10-P2	18	18	90	90
12	9	14-P1	17	17	85	85
13	10	15-P3	19	19	95	95
15	9	17-P2	18	18	90	90
18	9	22-P1	19	17	95	85
20	9	26-P1	19	19	95	95
Médias			17,3	17,3	86,4	86,4
Diferença relativa						$\varepsilon = 0$

Tabela C.13: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAI, para a lista 04 na sala 6, turma 401 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L04	TAV1 L04	TAR L04(%)	TAV1 L04(%)
12	9	17-P2	17	17	85	85
13	11	18-P2	17	16	85	80
15	9	21-P2	17	17	85	85
16	9	23-P3	18	17	90	85
17	9	24-P3	18	18	90	90
19	11	26-P1	19	17	95	85
20	9	28-P1	19	18	95	90
21	10	29-P1	20	18	100	90
23	9	32-P2	19	19	95	95
Médias			18,2	17,4	91,1	87,2
Diferença relativa						$\varepsilon = -4,28$

Tabela C.14: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAI, para a lista 07 na sala 7, turma 301 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L07	TAV1 L07	TAR L07(%)	TAV1 L07(%)
04	9	04-P3	15	14	75	70
05	9	05-P3	11	11	55	55
07	9	07-P3	18	18	90	90
10	8	13-P1	12	13	60	65
16	8	19-P2	16	17	80	85
17	9	20-P2	17	16	85	80
19	8	23-P2	13	11	65	55
20	10	24-P2	10	11	50	55
22	8	33-P1	17	17	85	85
24	9	37-P2	18	17	90	85
26	12	39-P2	15	15	75	75
Médias			14,7	14,5	73,6	72,7
Diferença relativa						$\varepsilon = -1,23\%$

Tabela C.15: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAI, para a lista 13 na sala 15, turma 302 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L13	TAV2 L13	TAR L13(%)	TAV2 L13(%)
05	9	06-P2	19	20	95	100
06	8	07-P3	18	18	90	90
10	9	12-P1	17	19	85	95
16	8	18-P2	16	17	80	85
Médias			17,5	18,5	87,5	92,5
Diferença relativa						$\varepsilon = 5,71$

C.3.2 Gravação biauricular modificada, a partir da CAA

A Tabela C.16 apresenta os valores obtidos nos testes de articulação reais e virtuais com gravação biauricular modificada, a partir da CAA, para a lista 08 na sala 7 do IENF, para alunos localizados nas proximidades da cabeça artificial de adulto, bem

como as médias por aluno e geral (índice de articulação da sala).

Tabela C.16: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAA, para a lista 08 na sala 7, turma 301 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L08	TAV1 L08	TAR L08(%)	TAV1 L08(%)
04	9	04-P3	13	11	65	55
05	9	05-P3	16	15	80	75
07	9	07-P3	18	16	90	80
10	8	13-P1	16	15	80	75
16	8	19-P2	18	14	90	70
17	9	20-P2	17	12	85	60
19	8	23-P2	17	9	85	45
20	10	24-P2	10	13	50	65
22	8	33-P1	20	8	100	40
24	9	37-P2	19	14	95	70
26	12	39-P2	13	12	65	60
Médias			16,1	12,6	80,5	63,2
Diferença relativa						$\varepsilon = -21,49\%$

C.3.3 Aurilização, a partir da CAI

A seguir são apresentados os resultados comparativos entre os testes de articulação reais e virtuais com aurilização, para as diferentes listas de monossílabos utilizadas nas salas S05T303, S06T401, S07T301 e S15T302.

A Tabela C.17 apresenta os valores obtidos nos testes de articulação reais e virtuais com aurilização, a partir da CAI, para a lista 02 na sala 5 do IENF, para alunos localizados nas proximidades da cabeça artificial infantil, bem como as médias por aluno e geral (índice de articulação da sala). Todos os resultados obtidos para as demais salas são apresentados nas Tabelas C.18 a C.31.

Tabela C.17: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAI, para a lista 02 na sala 5, turma 303 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L02	TAV2 L02	TAR L02(%)	TAV2 L02(%)
06	9	07-P3	17	17	85	85
09	10	10-P2	17	20	85	100
12	9	14-P1	18	18	90	90
13	10	15-P3	19	17	95	85
15	9	17-P2	18	20	90	100
18	9	22-P1	16	17	80	85
20	9	26-P1	19	18	95	90
Médias			17,7	18,1	88,5	90,7
Diferença relativa						$\varepsilon = 2,49$

Tabela C.18: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da auriliação utilizando a CAI, para a lista 03 na sala 5, turma 303 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L03	TAV2 L03	TAR L03(%)	TAV2 L03(%)
06	9	07-P3	17	12	85	60
09	10	10-P2	17	16	85	80
12	9	14-P1	17	16	85	80
13	10	15-P3	17	18	85	90
15	9	17-P2	17	18	85	90
18	9	22-P1	18	19	90	95
20	9	26-P1	15	17	75	85
Médias			16,9	16,6	84,3	82,9
Diferença relativa						$\varepsilon = -1,66$

Tabela C.19: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da auriliação utilizando a CAI, para a lista 05 na sala 5, turma 303 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L05	TAV2 L05	TAR L05(%)	TAV2 L05(%)
06	9	07-P3	16	13	80	65
09	10	10-P2	19	18	95	90
12	9	14-P1	19	17	95	85
13	10	15-P3	19	19	95	95
15	9	17-P2	19	19	95	95
18	9	22-P1	18	16	90	80
20	9	26-P1	18	19	90	95
Médias			18,3	17,3	91,4	86,4
Diferença relativa						$\varepsilon = -5,47$

Tabela C.20: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da auriliação utilizando a CAI, para as listas 02, 03 e 05 na sala 5, turma 303 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L2+3+5	TAV2 L2+3+5	TAR L2+3+5(%)	TAV2 L2+3+5(%)
06	9	07-P3	50	42	83,3	70,0
09	10	10-P2	53	54	88,3	90,0
12	9	14-P1	54	51	90,0	85,0
13	10	15-P3	55	54	91,7	90,0
15	9	17-P2	54	57	90,0	95,0
18	9	22-P1	52	52	86,7	86,7
20	9	26-P1	52	54	86,7	90,0
Médias			52,9	52,0	88,1	86,7
Diferença relativa						$\varepsilon = -1,59$

Tabela C.21: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da auriliação utilizando a CAI, para a lista 01 na sala 6, turma 401 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L01	TAV2 L01	TAR L01(%)	TAV2 L01(%)
12	9	17-P2	19	16	95	80
13	11	18-P2	20	19	100	95
15	9	21-P2	19	16	95	80
16	9	23-P3	19	19	95	95
17	9	24-P3	20	20	100	100
19	11	26-P1	19	20	95	100
20	9	28-P1	16	16	80	80
21	10	29-P1	19	18	95	90
23	9	32-P2	19	15	95	75
Médias			18,9	17,7	94,4	88,3
Diferença relativa						$\varepsilon = -6,46$

Tabela C.22: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da auriliação utilizando a CAI, para a lista 02 na sala 6, turma 401 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L02	TAV2 L02	TAR L02(%)	TAV2 L02(%)
12	9	17-P2	20	18	100	90
13	11	18-P2	20	20	100	100
15	9	21-P2	17	19	85	95
16	9	23-P3	18	20	90	100
17	9	24-P3	18	18	90	90
19	11	26-P1	18	20	90	100
20	9	28-P1	18	18	90	90
21	10	29-P1	20	20	100	100
23	9	32-P2	18	20	90	100
Médias			18,6	19,2	92,8	96,1
Diferença relativa						$\varepsilon = 3,56$

Tabela C.23: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da auriliação utilizando a CAI, para a lista 05 na sala 6, turma 401 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L05	TAV2 L05	TAR L05(%)	TAV2 L05(%)
12	9	17-P2	18	15	90	75
13	11	18-P2	18	15	90	75
15	9	21-P2	19	18	95	90
16	9	23-P3	19	19	95	95
17	9	24-P3	20	18	100	90
19	11	26-P1	20	18	100	90
20	9	28-P1	18	18	90	90
21	10	29-P1	18	20	90	100
23	9	32-P2	18	17	90	85
Médias			18,7	17,6	93,3	87,8
Diferença relativa						$\varepsilon = -5,89$

Tabela C.24: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da auriliação utilizando a CAI, para as listas 01, 02 e 05 na sala 6, turma 401 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L1+2+5	TAV2 L1+2+5	TAR L1+2+5(%)	TAV2 L1+2+5(%)
12	9	17-P2	57	49	95,0	81,7
13	11	18-P2	58	54	96,7	90,0
15	9	21-P2	55	53	91,7	88,3
16	9	23-P3	56	58	93,3	96,7
17	9	24-P3	58	56	96,7	93,3
19	11	26-P1	57	58	95,0	96,7
20	9	28-P1	52	52	86,7	86,7
21	10	29-P1	57	58	95,0	96,7
23	9	32-P2	55	52	91,7	86,7
Médias			56,1	54,4	93,5	90,7
Diferença relativa						$\varepsilon = -2,99$

Tabela C.25: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da auriliação utilizando a CAI, para a lista 06 na sala 7, turma 301 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L06	TAV2 L06	TAR L06(%)	TAV2 L06(%)
04	9	04-P3	15	18	75	90
05	9	05-P3	18	17	90	85
07	9	07-P3	19	17	95	85
10	8	13-P1	14	14	70	70
16	8	19-P2	19	19	95	95
17	9	20-P2	18	16	90	80
19	8	23-P2	17	18	85	90
20	10	24-P2	17	14	85	70
22	8	33-P1	16	12	80	60
24	9	37-P2	18	16	90	80
26	12	39-P2	17	17	85	85
Médias			17,1	16,2	85,5	80,9
Diferença relativa						$\varepsilon = -5,32$

Tabela C.26: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da auriliação utilizando a CAI, para a lista 13 na sala 7, turma 301 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L13	TAV2 L13	TAR L13(%)	TAV2 L13(%)
04	9	04-P3	13	17	65	85
05	9	05-P3	17	17	85	85
07	9	07-P3	20	19	100	95
10	8	13-P1	16	16	80	80
16	8	19-P2	19	17	95	85
17	9	20-P2	20	18	100	90
19	8	23-P2	18	18	90	90
20	10	24-P2	15	14	75	70
22	8	33-P1	18	15	90	75
24	9	37-P2	20	19	100	95
26	12	39-P2	19	18	95	90
Médias			17,7	17,1	88,6	85,4
Diferença relativa						$\varepsilon = -3,61$

Tabela C.27: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da auriliação utilizando a CAI, para as listas 06 e 13 na sala 7, turma 301 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L6+13	TAV2 L6+13	TAR L6+L13(%)	TAV2 L6+L13(%)
04	9	04-P3	14,0	17,5	70,0	87,5
05	9	05-P3	17,5	17,0	87,5	85,0
07	9	07-P3	19,5	18,0	97,5	90,0
10	8	13-P1	15,0	15,0	75,0	75,0
16	8	19-P2	19,0	18,0	95,0	90,0
17	9	20-P2	19,0	17,0	95,0	85,0
19	8	23-P2	17,5	18,0	87,5	90,0
20	10	24-P2	16,0	14,0	80,0	70,0
22	8	33-P1	17,0	13,0	85,0	67,5
24	9	37-P2	19,0	17,5	95,0	87,5
26	12	39-P2	18,0	17,5	90,0	87,5
Médias			17,4	16,6	87,0	83,2
Diferença relativa						$\varepsilon = -4,37$

Tabela C.28: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da auriliação utilizando a CAI, para a lista 04 na sala 15, turma 302 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L04	TAV2 L04	TAR L04(%)	TAV2 L04(%)
05	9	06-P2	19	20	95	100
06	8	07-P3	17	16	85	80
10	9	12-P1	15	16	75	80
16	8	18-P2	17	19	85	95
Médias			17,0	17,8	85,0	88,8
Diferença relativa						$\varepsilon = 4,47$

Tabela C.29: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da auriliação utilizando a CAI, para a lista 08 na sala 15, turma 302 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L08	TAV2 L08	TAR L08(%)	TAV2 L08(%)
05	9	06-P2	17	16	85	80
06	8	07-P3	17	16	85	80
10	9	12-P1	16	14	80	70
16	8	18-P2	17	17	85	85
Médias			16,8	15,8	83,8	78,8
Diferença relativa						$\varepsilon = -5,97$

Tabela C.30: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da auriliação utilizando a CAI, para a lista 15 na sala 15, turma 302 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L15	TAV2 L15	TAR L15(%)	TAV2 L15(%)
05	9	06-P2	16	17	80	85
06	8	07-P3	17	17	85	85
10	9	12-P1	16	17	80	85
16	8	18-P2	16	18	80	90
Médias			16,3	17,3	81,3	86,3
Diferença relativa						$\varepsilon = 6,15$

Tabela C.31: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da auriliação utilizando a CAI, para as listas 04, 08 e 15 na sala 15, turma 302 do IENF.

Aluno	Idade	Posição	TAR L4+8+15	TAV2 L4+8+15	TAR L4+8+15(%)	TAV2 L4+8+15(%)
5	9	06-P2	52	53	86,7	88,3
6	8	07-P3	51	49	85,0	81,7
10	9	12-P1	47	47	78,3	78,3
16	8	18-P2	50	54	83,3	90,0
Médias			50,0	50,8	83,3	84,6
Diferença relativa						$\varepsilon = 1,56$

C.4 Testes de articulação virtuais, com adultos

C.4.1 Gravação biauricular modificada, a partir da CAA

A Tabela C.32 mostra os resultados comparativos entre os índices de articulação real e virtual com gravação biauricular modificada a partir das gravações biauriculares realizadas na sala 7 do IENF, para a lista 08 com a CAA, para adultos. A Fig. C.21 apresenta os valores dos índices de articulação dos testes reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada para adultos com a CAA, extraídos na Tabela C.32.

Tabela C.32: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada utilizando a CAA, para a lista 08 na sala 7 do IENF, com 4 adultos.

Adulto	TAR L08	TAV1 L08	TAR L08(%)	TAV1 L08(%)
01	17	17	85	85
02	15	16	75	80
03	18	18	90	90
04	16	17	80	85
Médias	16,5	17,0	82,5	85,0
Diferença relativa				$\varepsilon = 3,03\%$

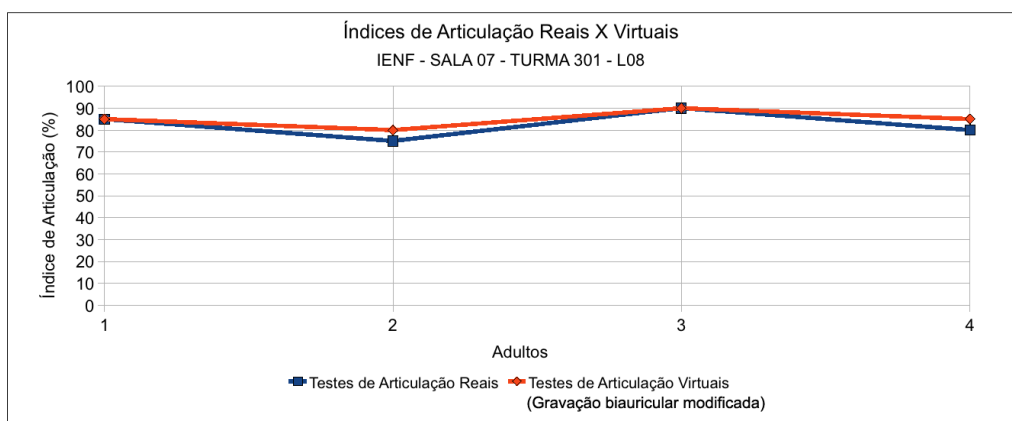


Figura C.21: Índices de articulação, reais e virtuais, por adulto, fornecidos na Tabela C.32.

C.4.2 Aurilização, a partir da CAA

As Tabelas C.33 a C.35 mostram os resultados comparativos entre os índices de articulação real e virtual com aurilização a partir das gravações biauriculares realizadas na sala 7, individualmente para as listas 06, 07 e 13, respectivamente, com a CAA, para os mesmos quatro adultos que participaram dos testes de articulação virtuais com gravação biauricular modificada. A Tabela C.36 mostra os resultados comparativos entre os índices de articulação real e virtual com aurilização na sala 7, para o somatório das listas 06, 07 e 13, com a CAA, para os mesmos quatro adultos.

Tabela C.33: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAA, para a lista 06 na sala 7 do IENF, com adultos.

Adulto	TAR L06	TAV2 L06	TAR L06(%)	TAV2 L06(%)
01	20	20	100	100
02	20	19	100	95
03	20	20	100	100
04	20	20	100	100
Médias	20,0	19,8	100	98,8
Diferença relativa				$\varepsilon = -1,20\%$

Tabela C.34: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAA, para a lista 07 na sala 7 do IENF, com adultos.

Adulto	TAR L07	TAV2 L07	TAR L07(%)	TAV2 L07(%)
01	19	19	95	95
02	19	19	95	95
03	17	18	85	90
04	20	20	100	100
Médias	18,8	19,0	93,8	95,0
Diferença relativa				$\varepsilon = 1,28\%$

Tabela C.35: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAA, para a lista 13 na sala 7 do IENF, com adultos.

Adulto	TAR L13	TAV2 L13	TAR L13(%)	TAV2 L13(%)
01	17	19	85	95
02	19	19	95	95
03	19	19	95	95
04	20	19	100	95
Médias	18,8	19,0	93,8	95,0
Diferença relativa				$\varepsilon = 1,28\%$

Tabela C.36: Resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir da aurilização utilizando a CAA, para as listas 06, 07 e 13 na sala 7 do IENF, com adultos.

Adulto	TAR L6+7+13	TAV2 L6+7+13	TAR L6+7+13(%)	TAV2 L6+7+13(%)
01	56	58	93,3	96,7
02	58	57	96,7	95,0
03	56	57	93,3	95,0
04	60	59	100	98,3
Médias	57,5	57,8	95,8	96,3
Diferença relativa				$\varepsilon = 0,52\%$

A Fig. C.22 apresenta os índices de articulação reais e virtuais a partir da gravação biauricular modificada, para adultos com a CAA, extraídos da Tabela C.36.

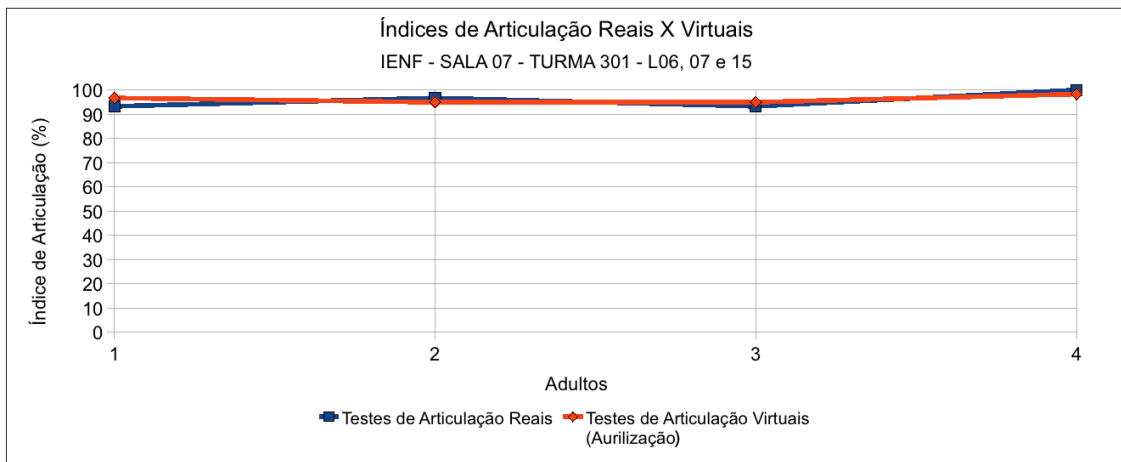


Figura C.22: Índices de articulação, reais e virtuais, por adulto, fornecidos na Tabela C.36.

C.5 Testes de articulação virtuais a partir da CAI, com crianças que não participaram dos testes de articulação reais

C.5.1 Gravação biauricular modificada, a partir da CAI

Para os testes de articulação virtuais, com gravação biauricular modificada realizados com crianças que não participaram dos testes de articulação reais, foram utilizados os resultados das gravações biauriculares registrados nas salas 15 do IENF e na sala 1 do CEAP, para as mesmas três listas em cada sala. As Tabelas C.37 e C.38 mostram os valores obtidos por 5 crianças que realizaram o teste de articulação virtual com gravação biauricular modificada a partir da CAI nessas salas de aula. A Tabela C.39 apresenta um resumo com resultados dos testes de articulação reais e virtuais utilizando gravação biauricular modificada, a partir da CAI, para as duas salas de aula constantes nas Tabelas C.37 e C.38.

Tabela C.37: Resultados dos testes de articulação virtuais a partir das gravações biauriculares modificadas, obtidos para a sala 15 do IENF, com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.

Criança	Idade	L04	L08	L15	Total	Total (%)
01	10	18	17	15	50	83,3
02	9	19	17	17	53	88,3
03	9	17	16	16	49	81,7
04	10	20	17	16	53	88,3
05	8	19	18	16	53	88,3
Médias		18,6	17,0	16,0	51,6	86,0

Tabela C.38: Resultados dos testes de articulação virtuais a partir das gravações biauriculares modificadas, obtidos para a sala 1 do CEAP, com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.

Criança	Idade	L10	L11	L12	Total	Total (%)
01	10	18	15	19	52	86,7
02	9	18	17	18	53	88,3
03	9	18	20	19	57	95,0
04	10	17	15	18	50	83,3
05	8	19	13	19	51	85,0
Médias		18,0	16,0	18,6	52,6	87,7

Tabela C.39: Resumo dos resultados dos testes de articulação reais e virtuais com gravação biauricular modificada, para as mesmas listas de monossílabos, obtidos com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.

Sala	TAR (%)	TAV1 (%)	Diferença (%)	Diferença Relativa (%)
S15T302	80,3	86,0	+5,7	+7,01
S01T601	90,8	87,7	-3,1	-3,41

C.5.2 Aurilização, a partir da CAI

Para os testes de articulação virtuais, com aurilização realizados com crianças que não participaram dos testes de articulação reais, foram utilizados os resultados das gravações biauriculares registrados nas salas 5, 7 e 15 do IENF e na sala 1 do CEAP, para as mesmas três listas em cada sala. As Tabelas C.40 a C.43 mostram os valores obtidos por 5 crianças que realizaram o teste de articulação virtual com aurilização a partir da CAI nessas salas de aula. A Tabela C.44 apresenta um resumo com resultados dos testes de articulação reais e virtuais a partir das aurilizações, a partir da CAI, para as quatro salas de aula constantes nas Tabelas C.40 a C.43.

Tabela C.40: Resultados dos testes de articulação virtuais a partir das aurilizações, obtidos para a sala 5 do IENF, com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.

Criança	Idade	L02	L03	L05	Total	Total (%)
01	10	18	17	19	54	90,0
02	9	18	16	19	53	88,3
03	9	18	13	19	50	83,3
04	10	19	15	17	51	85,0
05	8	18	16	18	52	86,7
Médias		18,2	15,4	18,4	52,0	86,7

Tabela C.41: Resultados dos testes de articulação virtuais a partir das aurilizações, obtidos para a sala 7 do IENF, com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.

Criança	Idade	L06	L07	L13	Total	Total (%)
01	10	19	17	19	55	91,7
02	9	19	18	19	56	93,3
03	9	19	18	18	55	91,7
04	10	18	19	18	55	91,7
05	8	19	17	19	55	91,7
Médias		18,8	17,8	18,6	55,2	92

Tabela C.42: Resultados dos testes de articulação virtuais a partir das aurilizações, obtidos para a sala 15 do IENF, com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.

Criança	Idade	L04	L08	L15	Total	Total (%)
01	10	17	17	16	50	83,3
02	9	20	18	14	52	86,7
03	9	18	18	16	52	86,7
04	10	19	17	15	51	85,0
05	8	19	17	14	50	83,3
Médias		18,6	17,4	15,0	51,0	85,0

Tabela C.43: Resultados dos testes de articulação virtuais a partir das aurilizações, obtidos para a sala 1 do CEAP, com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.

Criança	Idade	L10	L11	L12	Total	Total (%)
01	10	18	17	16	51	85,0
02	9	19	18	17	54	90,0
03	9	19	18	17	54	90,0
04	10	17	17	16	50	83,3
05	8	19	18	17	54	90,0
Médias		18,4	17,6	16,6	52,7	87,7

Tabela C.44: Resumo dos resultados dos testes de articulação reais e virtuais com aurilização, para as mesmas listas de monossílabos, obtidos com 5 crianças que não participaram dos testes de articulação reais.

Sala	TAR (%)	TAV2 (%)	Diferença (%)	Diferença Relativa (%)
S05T303	82,8	86,7	+3,9	+4,71
S07T301	89,0	92,0	+3,0	+3,37
S15T302	80,3	85,0	+4,7	+5,85
S01T601	90,8	87,7	-3,1	-3,41