

FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Inteligibilidade em salas de aula do ensino superior e sua avaliação via aurilizações simuladas

Mahl, A. L.¹; Tenenbaum, R. A.^{1,2}; Melo, V. S. G.^{1,2}; Sampaio, G. B. R.²

¹ Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, {eng.anamahl, ratenenbaum}@gmail.com

² Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, {viviane.melo, gabriel.sampaio}@eac.ufsm.br

Resumo

Salas de aula são ambientes educacionais onde a boa inteligibilidade da fala é o objetivo principal, visando favorecer o processo de ensino-aprendizagem. Assim, estudá-las para garantir o conforto acústico é imprescindível. Neste trabalho, busca-se consolidar uma metodologia para avaliar, de forma expedita, a inteligibilidade da fala em salas. É apresentado um estudo de caso com duas salas de aula do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria. Adotando-se uma posição de fonte sonora onidirecional e seis posições de receptores são medidas as respostas impulsivas monoauriculares (RIRs). A partir das RIRs, calculam-se os tempos de reverberação (TRs), além dos parâmetros fator de clareza para a fala, definição e tempo de decaimento inicial. Em seguida, as salas são simuladas acusticamente, visando a determinação de seus TRs simulados. Procede-se, em seguida, a um estudo de otimização com restrições, visando aproximar os TRs simulados aos medidos, alterando-se os coeficientes de absorção que são dados de entrada do programa de simulação. Uma vez feito esse ajuste, simula-se novamente as salas, agora para a obtenção das respostas impulsivas biauriculares (BRIRs). O passo seguinte é gerar aurilizações, por meio de um procedimento de convolução, a partir de sinais sonoros contendo listas de monossílabos, gravados em câmara anecoica. Ao final, as aurilizações simuladas são submetidas, por meio de fones de ouvido, a um grupo de voluntários com boa saúde auditiva e os índices de articulação simulados são calculados e comparados, para cada sala, com os índices de articulação previamente medidos nas mesmas salas. O objetivo principal da pesquisa, portanto, é validar a metodologia de avaliação da inteligibilidade em salas de aula sem a necessidade de efetuar um teste de articulação presencial, o que é particularmente útil em situações de pandemia, como o mundo vivencia atualmente.

Palavras-chave: acústica de salas de aula, aurilização, índice de articulação.

PACS: 43.55.Br, 43.55.Hy, 43.71.Es.

Intelligibility in higher education classrooms and its assessment via simulated auralizations

Abstract

Classrooms are educational environments where good speech intelligibility is the main objective, aiming to favor the teaching-learning process. Thus, studying them to ensure acoustic comfort is essential. In this work, we seek to consolidate a methodology to quickly assess the intelligibility of speech in classrooms. A case study with two classrooms of the Technology Center of the Federal University of Santa Maria is presented. Adopting an omnidirectional sound source position and six receiver positions, monaural impulse responses (RIRs) are measured. From the RIRs, the reverberation times (TRs) are calculated, in addition to the parameters of clarity factor for speech, definition and initial decay time. Then, the rooms are acoustically simulated, aiming to determine their simulated TRs. Then, an optimization study with restrictions is carried out, aiming to approximate the simulated TRs to the measured ones, changing the absorption coefficients that are input data of the simulation program. Once this adjustment is performed, the rooms are simulated again, this time to obtain the binaural impulse responses (BRIRs). The next step is to generate auralizations, through a convolution procedure, from sound signals containing lists of monosyllables, recorded in an anechoic chamber. By the end, the simulated hearing signals are submitted, through headphones, to a group of volunteers with good hearing health and the simulated articulation indexes are calculated and compared, for each room, with the articulation indexes previously measured in the same rooms. The main objective of the research, therefore, is to validate the methodology for evaluating intelligibility in classrooms without the need to carry out a face-to-face articulation test, which is particularly useful in pandemic situations, as the world is currently experiencing.

Keywords: acoustics of classrooms, auralization, articulation index.



1. INTRODUÇÃO

Visando estudar o comportamento acústico de uma sala, é imprescindível conhecer alguns fatores, como as propriedades acústicas, aspectos da geometria da sala, os materiais empregados (disposição e quantidade), aberturas (maneira e quantidade que foram empregadas), bem como o modo como a onda sonora se comporta e a finalidade do local [1].

A característica acústica de cada sala varia de acordo com sua finalidade. Em uma sala de aula, é necessário que o discente ouça o professor para que haja um processo de ensino e aprendizagem efetivo. No estudo de Ibrahim [2], a qualidade acústica de salas de aula de ensino superior foi analisada, tendo sido aferidos o ruído residual e o tempo de reverberação. Os resultados exprimem o quanto a qualidade acústica das salas é deficiente, o que torna difícil a inteligibilidade da fala e, conseqüentemente, dificulta o entendimento do conteúdo compartilhado, além de causar incômodo e desconforto nos alunos.

A relação entre as palavras pronunciadas pelo locutor e as palavras compreendidas pelo ouvinte é chamada de inteligibilidade da fala. Esse parâmetro é subjetivo e mensurá-lo é uma tarefa difícil, pois traduz a influência humana sobre o fator inteligibilidade. Ou seja, a inteligibilidade pode ser afetada de acordo com a posição do ouvinte — ou do locutor — em uma sala, dificultando sua medição [3, 4].

Os testes de articulação são utilizados como uma das formas de avaliação da inteligibilidade da fala, de modo a considerar tanto a influência da sala, quanto do indivíduo. Com esses testes, se obtém o índice de articulação, métrica desenvolvida por French e Steinberg [5] e aprimorada por Kryter [6].

Para mensurar a interferência da sala, são utilizadas métricas de predição de inteligibilidade, que são os parâmetros objetivos tempo de reverberação (TR), tempo de decaimento inicial (EDT), fator de clareza para a fala (C_{50}) e definição para a fala (D_{50}), que são fundamentados nas características físicas internas da sala. Esses parâmetros possuem boa correlação com a medição da inteligibilidade por meio dos testes de articulação.

Quando o intuito é estudar salas de aula existen-

tes, faz-se necessário avaliar a qualidade acústica com as ferramentas disponíveis na atualidade, isto é, medições acústicas, simulações acústicas computacionais e, quando necessário, aurilizações. Através dos resultados, são estudadas e propostas melhorias para os ambientes, que podem ser feitas com tratamento acústico, que acarretam na melhoria da inteligibilidade da fala e do processo de ensino e aprendizagem [7, 8].

Modelar salas de aula acusticamente propicia a concepção ou adequação de ambientes educacionais melhores do ponto de escuta acústico, o que é fundamental para espaços com essa finalidade [9]. A simulação acústica de salas pode auxiliar na previsão de parâmetros acústicos, através de *software* específicos, cujo objetivo é simular as experiências auditivas em determinada sala, previamente modelada [10].

Uma das técnicas de modelagem e simulação acústica é a aurilização, que possibilita recriar a impressão sonora em um ambiente por meio da modelagem matemática ou física. Ou seja, simula-se a experiência da audição binaural em determinada posição no ambiente modelado previamente [11].

As medições e simulações com aurilização tornam possível a aplicação de testes de articulação com os alunos de uma sala de aula, presencial ou virtualmente, obtendo o índice de articulação com o objetivo de avaliar a inteligibilidade da sala [12].

Este estudo destina-se a auxiliar na validação de técnicas de aplicação de testes de articulação através de medição, simulação e aurilização, utilizando as características acústicas de salas de aula de ensino superior.

2. METODOLOGIA

O presente estudo foi realizado em cinco etapas:

1. Caracterização da amostra;
2. Medições acústicas;
3. Simulações acústicas;
4. Aurilização;
5. Obtenção do índice de articulação.

O desenvolvimento de cada etapa será descrito nas seções seguintes. Reitera-se que essa pesquisa foi aprovada no Comitê de Ética e Pesquisa (CEP) da UFSM sob parecer nº 5.402.931.

2.1 Caracterização da amostra

Duas salas de aula do Centro de Tecnologia da UFSM foram selecionadas para a realização da pesquisa.

A sala de aula 224 localiza-se no Prédio 7, o mais antigo da universidade, edificado há mais de 60 anos, onde situa-se o prédio principal do CT (ver Figura 1). A identificação dessa sala de aula é S224. Suas dimensões são: 6,50 m de largura, 9,48 m de comprimento e pé direito de 3,90 m, totalizando o volume de 240,32 m³.



Figura 1: Sala de aula S224.

Essa sala de aula possui piso em madeira parquet, teto em gesso acartonado, parede em alvenaria com reboco liso e pintura, janela basculante de alumínio com vidro simples com cortinas do tipo blecaute, porta em madeira com bandeira em vidro simples e um quadro negro em madeira. Os equipamentos presentes na sala são dois ventiladores, dois aparelhos de ar condicionado e um projetor multimídia. As mesas e cadeiras são revestidas em fórmica. O material da mesa do professor é madeira e o balcão ao lado também é do mesmo material.

A sala de aula 251 está localizada no Prédio 9A do CT e foi edificada em 2008, sua identificação neste estudo é S251. Possui largura de 6,50 m, comprimento de 11,79 m e pé direito de 3,28 m. Totalizando um volume de 251,36 m³ (ver Figura 2).

As paredes e o teto da sala de aula S251 são em alvenaria com reboco liso e pintura, o piso é em madeira parquet, as janelas são basculantes com caixilho em ferro pintado e vidro fumê simples,



Figura 2: Sala de aula S251.

há duas portas (uma no fundo e outra na frente da sala) em madeira pintada, e uma lousa branca com acabamento laminado melamínico. Quanto aos equipamentos, a sala possui três ventiladores, dois aparelhos de ar condicionado e um projetor multimídia.

Destaca-se que a pesquisa foi realizada em meio à pandemia de Covid-19 causada pelo Coronavírus e decretada em março de 2020 pelo diretor da *World Health Organization*. Uma das medidas para contê-la foi o distanciamento social e, por esse motivo, as duas salas de aula foram organizadas, para este trabalho, com base no distanciamento social, com a distância entre os alunos tendo sido definida no primeiro estudo realizado pela Comissão de Biossegurança do CT (CBio-CT), que, na ocasião, ocorreu baseado nas recomendações do Ministério da Saúde e orientações do governo do estado do Rio Grande do Sul em julho de 2021. Conforme orientação da CBio-CT, a Sala S224 poderia comportar apenas nove alunos e a Sala S251 contaria com doze alunos. O restante das mesas e cadeiras foram retirados das salas de aula.

2.2 Medições acústicas

Todos os equipamentos utilizados nos ensaios são do Laboratório de Acústica e Vibrações do Curso de Graduação em Engenharia Acústica da UFSM.

São escolhidas, para cada sala de aula, seis posições de receptor e uma posição de fonte sonora. A disposição de receptor e fonte sonora para as salas de aula, S224 e S251, respectivamente, ocorre de acordo com as plantas de medição das Figuras 3 e 4, em que F1 designa a fonte sonora e R1



a R6 os receptores.

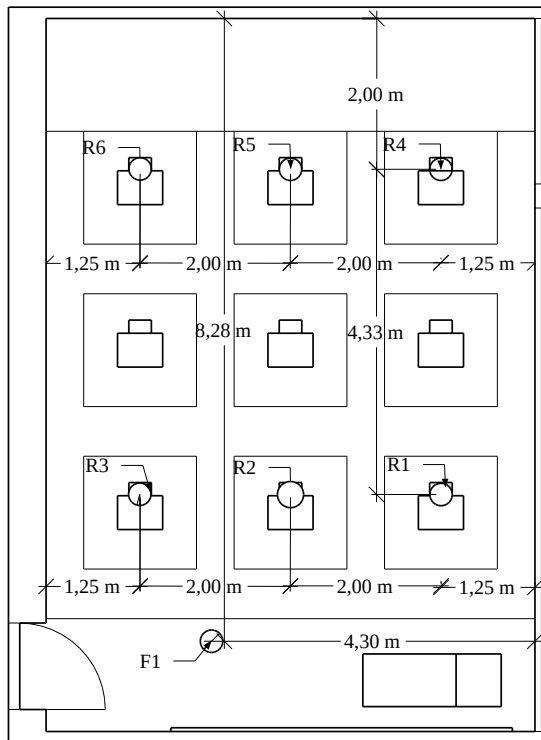


Figura 3: Pontos de medição para a Sala S224.

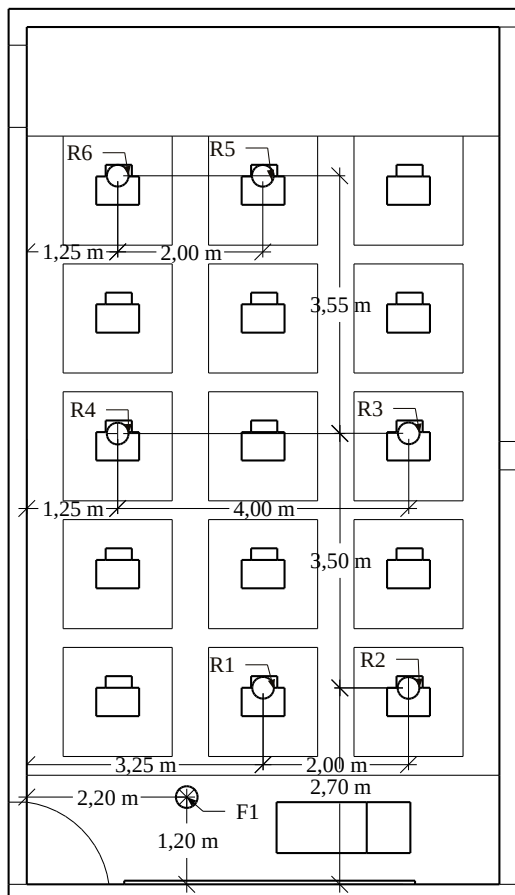


Figura 4: Pontos de medição para a Sala S251.

Os microfones são posicionados a 1,20 m do piso e a fonte sonora a 1,50 m do piso ao centro acústico da fonte, do mesmo modo que no estudo de Yang e Mak [13] e simbolizando a altura e a localização de um professor em uma sala de aula.

Na ocasião das medições, as condições climáticas presentes na Sala S224 foram: temperatura de 26 °C, umidade relativa do ar de 42% e pressão atmosférica de 1.013 Pa, resultando na velocidade de propagação do som de 346,69 m/s. Já na Sala S251, registramos a temperatura de 25,9 °C, umidade relativa do ar de 51% e pressão atmosférica de 1.014 Pa, culminando na velocidade de propagação do som de 346,43 m/s.

O procedimento de medição ocorre com a fonte sonora emitindo cinco varreduras de senos (*sweep sine*) a cada medição, sendo os sinais gravados por todos os microfones simultaneamente. No pós-processamento, utilizando o ITA *Toolbox* e o *software* Matlab, é feita a média dos sinais e extraída a resposta impulsiva monoauricular para cada par fonte-receptor e são calculados os parâmetros objetivos: T_{20} , EDT, C_{50} e D_{50} .

2.3 Simulações acústicas

As simulações acústicas são efetuadas no código computacional RAIOS 7, disponibilizado pelo Curso de Graduação em Engenharia Acústica da UFSM. Os dados de entrada fornecidos, de cada sala de aula, para iniciar o procedimento de simulação, são: 1) volumetria; 2) coeficientes de absorção (α) e espalhamento (δ); 3) posições e demais informações de fonte sonora e receptor; 4) demais parâmetros a seguir detalhados.

A modelagem das duas salas de aula é construída com os *software* Google SketchUp e AutoCad. Em seguida, exporta-se a volumetria na extensão aceita pelo código computacional RAIOS 7, para que esta seja importada pelo programa.

Ressalta-se que as volumetrias a serem importadas em *software* de simulação acústica não necessitam conter todos os detalhes do ambiente, isto é, espessuras ou objetos pequenos, como pés de mesas e cadeiras, maçaneta, ventiladores, luminárias, entre outros [14, 15].

Na sequência, são atribuídos os coeficientes de absorção e espalhamento para cada superfície, encontrados no banco de dados do próprio *soft-*

ware. Por fim, são inseridas as posições de fonte e receptor. Ao inserir a posição da fonte sonora, configura-se a quantidade de raios que devem ser emitidos, no caso, 10 mil raios e, também, a direcionalidade da fonte sonora, que para as duas salas de aula é onidirecional, assim como a fonte sonora utilizada nas medições acústicas.

As condições climáticas equivalentes ao momento das medições acústicas são inseridas, além dos dados apresentados nas Figuras 5 e 6, cujas imagens são retiradas do programa.

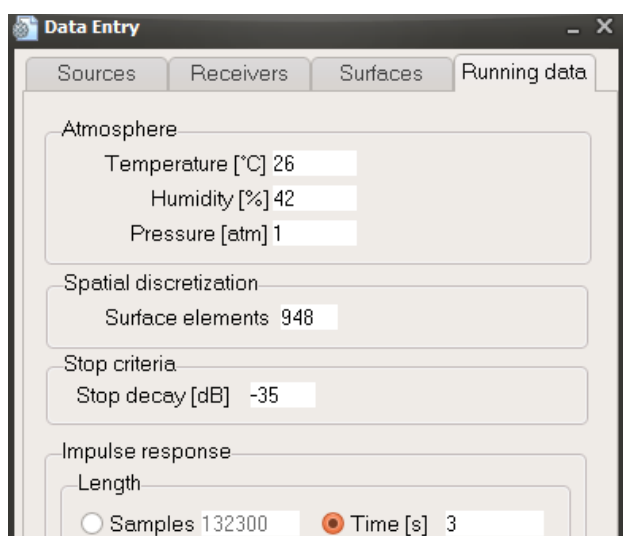


Figura 5: Parâmetros para a simulação da Sala S224.

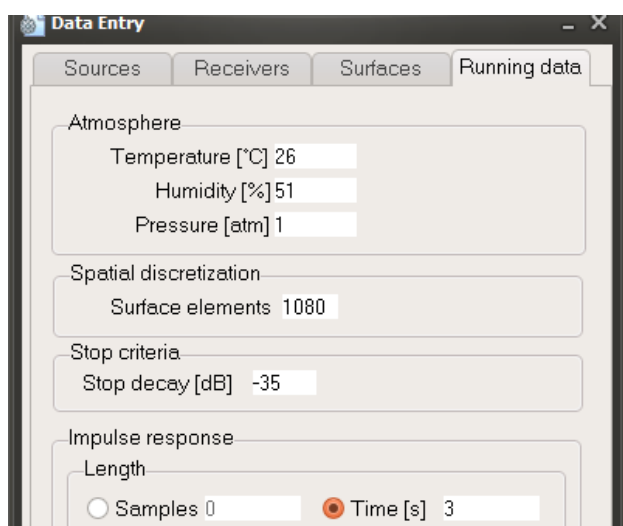


Figura 6: Parâmetros para a simulação da Sala S251.

É possível verificar as salas de aula inseridas no código computacional RAIOS 7 nas Figuras 7 e 8 já com os receptores e fonte sonora inclusos. Os receptores estão representados pelos poliedros verdes e a fonte sonora pelo icosaedro vermelho.

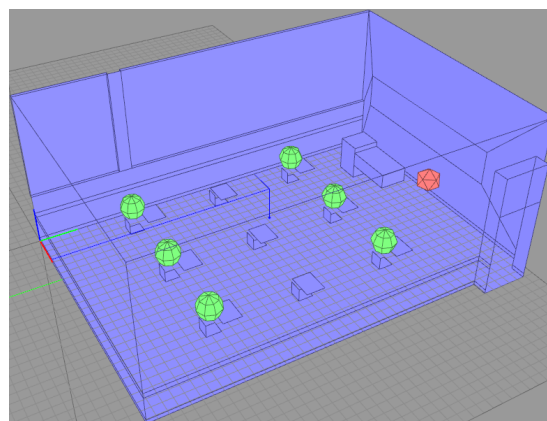


Figura 7: Sala S224 inserida no programa RAIOS 7.

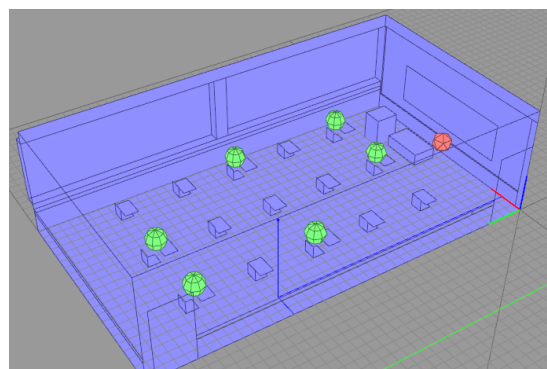


Figura 8: Sala S251 inserida no programa RAIOS 7.

Após a simulação, os resultados do TR são comparados ao TR medido. A cada teste, os erros quadráticos médios (EQM) são calculados. Os coeficientes de absorção das maiores superfícies, ou seja, teto e paredes de cada sala são ajustados conforme necessário e com o intuito de aproximar o TR simulado ao medido. Quanto ao coeficiente de espalhamento, devido à falta de banco de dados com materiais que se assemelham aos encontrados nas salas de aula, são utilizados os valores fornecidos pelo programa, que são, para todas as frequências e materiais, de 0,01. Os coeficientes de absorção resultantes da calibração do modelo simulado são apresentados na Seção 3.2.

Finalizado o ajuste, é possível simular as respostas impulsivas biauriculares de cada par fonte-receptor, de cada sala. Tal procedimento também é efetuado no *software* RAIOS 7, inserindo os arquivos especular e difuso resultantes da simulação da RIR. A orientação de azimuth e elevação é de 0° para ambas, pois simula-se a cabeça do ouvinte direcionada para o quadro.



2.4 Aurilização

A geração das aurilizações é realizada no *software* RAIOS 7, por meio do processo de convolução entre as BRIRs simuladas e sinais gravados em uma câmara anecoica.

Os sinais anecoicos utilizados no presente estudo, são listas anecoicas de monossílabos aleatórios gravadas na câmara anecoica do Inmetro, em Xerém, no Rio de Janeiro. Foram gravados em português brasileiro, por uma oradora, de sotaque carioca e boa dicção. Fazem parte de um banco de dados de 226 monossílabos, utilizados por Melo [16] e Melo, Tenenbaum e Musafir [17]. Para este estudo, são escolhidos 200 monossílabos do banco de dados disponibilizado, divididos em dois grupos de cinco listas cada, sendo cada lista com 20 palavras.

Tendo em vista que esta pesquisa é realizada no estado do Rio Grande do Sul, sabe-se que o sotaque local difere do sotaque carioca. Por isso, os monossílabos são ouvidos um a um, com o intuito de selecionar e excluir aqueles que pudessem causar confusão ao ouvinte durante os testes de articulação. Exemplo: o monossílabo ZÁS, na gravação ouve-se ZAIS. Os monossílabos são dispostos nas cinco listas de maneira aleatória, sem qualquer relação com o próximo da lista.

2.5 Obtenção dos índices de articulação

Para obter os índices de articulação, efetuam-se testes de articulação de duas maneiras distintas. Inicialmente, são realizados os testes de articulação reais (TAR) e, em seguida, os testes de articulação com sinais simulados (TASS).

Destaca-se que, é utilizado um grupo com 100 monossílabos distintos para cada sala de aula. Todavia, para TAR e TASS, temos as mesmas palavras, porém com ordenação distinta.

Participaram dos testes 24 voluntários, de ambos os sexos, com boa saúde auditiva, idades entre 21 e 30 anos e com ensino superior completo ou em andamento, pertencentes aos níveis de graduação, mestrado ou doutorado da UFSM.

2.5.1 Testes de articulação reais

Para os TAR, os voluntários são divididos em grupos de seis, conforme sua disponibilidade de horários. A organização de cada sala no momento

desse teste é a mesma das Figuras 3 e 4. Ao chegarem, os voluntários são convidados a ocupar uma das seis posições de receptores na sala e recebem a folha de anotação e uma caneta.

A fonte sonora é posicionada no mesmo ponto das medições para obtenção das RIRs. A utilização de uma fonte sonora em TAR evita que os voluntários efetuem a leitura labial do orador no momento da leitura da lista, conforme elencado por Seep [18].

A ordem de grandeza do nível sonoro médio da fala humana é de, aproximadamente, 70 dB e o risco de dano auditivo ocorre para valores superiores a 85 dB. Buscou-se ter o cuidado de não ultrapassar 85 dB tanto nos TAR quanto nos TASS. Por esse motivo, é realizada a medição do NPS com a fonte sonora emitindo um ruído rosa, certificando-se de que o NPS na posição do receptor mais próximo a fonte sonora tenha $L_{Aeq, 60s}$ de, aproximadamente, 70 dB.

Antes de iniciar os testes, a fonte sonora emite uma lista com cinco monossílabos (aleatórios e que não constam dos 200 monossílabos selecionados para os testes), para facilitar o entendimento do procedimento. Em seguida, a fonte sonora emite os 100 monossílabos, que são anotados pelo voluntário na folha que lhe foi entregue.

2.5.2 Testes de articulação com sinais simulados

Os testes de articulação com sinais simulados consistem em efetuá-lo com fones de ouvido para escutar os sinais gerados pela aurilização.

Com um intervalo de pouco mais de duas semanas da realização do TAR, os mesmos voluntários são submetidos ao TASS e ouvem o áudio equivalente à posição de receptor em que estavam no TAR.

A realização do TASS é similar ao TAR. Ou seja, o voluntário anota os monossílabos em uma folha. Esse teste é realizado em uma sala de aula do CT da UFSM, com um voluntário por vez. Apenas uma das pesquisadoras e o voluntário permanecem na sala no momento do teste.

2.5.3 Correção dos testes de articulação

No processo de correção dos testes de articulação são considerados erros fonêmicos, entre eles: 1) “chã”: xã, xan, chan, xam; 2) “rol”: rou, rall, hall;

3) “cais”: cas, caz, caix; 4) “as”: áz, ace; 5) “vou”: voo, vôo; dentre outros casos.

Casos de oposição fonêmica, formação de palavras a partir dos monossílabos ou alteração de sentido do monossílabo, são considerados errados. Exemplos: 1) “ba”: bar, par, pa; 2) “ca”: carne, car; 3) “frei”: freio, prei; 4) “mi”: mim, mir; 5) “mão”: mã, não; dentre outros.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta Seção são apresentados os resultados obtidos com a metodologia apresentada. Iniciando pelas medições acústicas, seguindo pela simulação acústica, aurilização e, por fim, os testes de articulação.

3.1 Medições acústicas

Os parâmetros acústicos objetivos, extraídos do levantamento da resposta impulsiva, T_{20} , EDT, C_{50} e D_{50} são apresentados para cada sala de aula de forma separada e em gráficos, para melhor entendimento e discussão.

3.1.1 Sala de aula S224

Iniciando a análise dos dados medidos pela reverberação da sala, têm-se os parâmetros TR e EDT. Considerando o TR (Figura 9) nas frequências de 500 Hz a 2 kHz, verifica-se que tal parâmetro está acima do recomendado (entre 0,6 s e 0,8 s [3, 19]).

Nota-se que, por considerar as primeiras reflexões, o EDT (Figura 10) apresenta variação um pouco maior com relação à localização do receptor na sala, se comparado ao TR. Em 500 Hz, por exemplo, os três receptores, localizados à frente da sala de aula, apresentam EDT muito próximos entre si e distantes dos três situados ao fundo da sala de aula.

Com relação às métricas relacionadas à inteligibilidade da fala, tem-se o fator de clareza (Figura 11) e a definição (Figura 12) para a fala.

Para Marshall [20], é possível classificar a inteligibilidade da fala pelo C_{50} . Assim, a inteligibilidade da fala na Sala S224 poderia ser classificada, em 1 kHz, como pobre, para todos os pares fonte-receptor.

Os valores obtidos para o C_{50} na faixa de frequência que está sendo analisada, são negativos e os

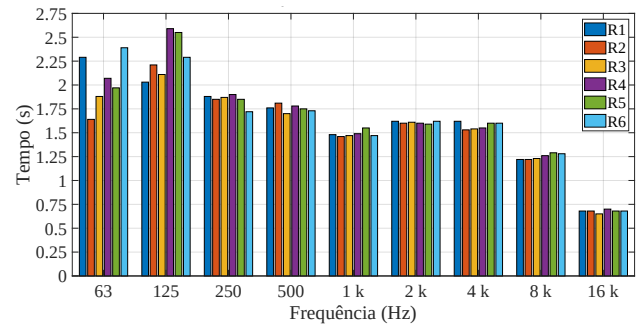


Figura 9: T_{20} medido – Sala S224.

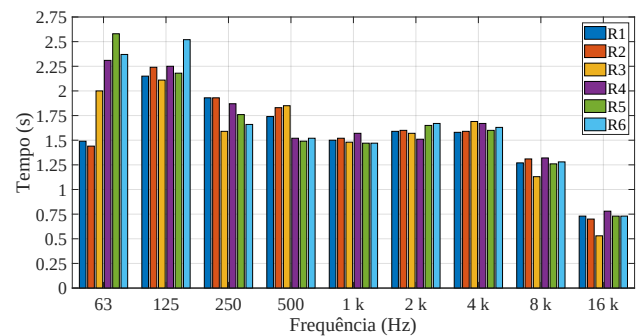


Figura 10: EDT medido – Sala S224.

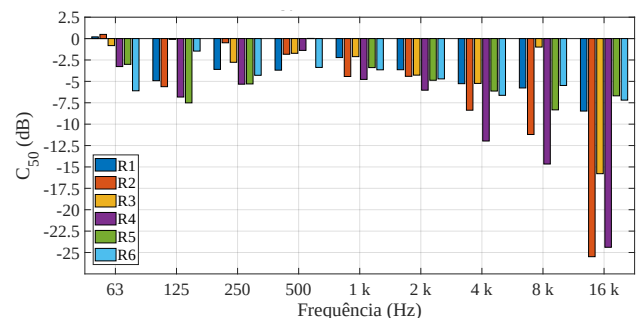


Figura 11: C_{50} medido – Sala S224.

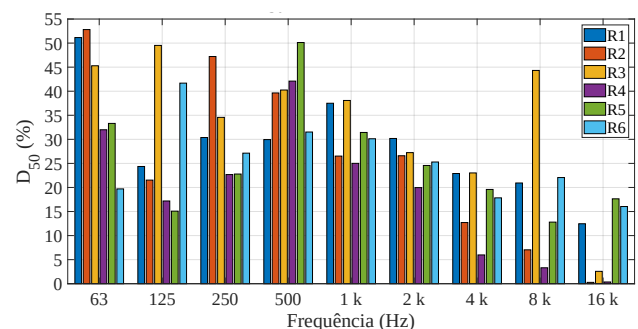


Figura 12: D_{50} medido – Sala S224.

resultados do D_{50} , exprimem, em sua maioria, valores abaixo de 50%. Portanto, há maior energia na cauda reverberante do que nas primeiras reflexões. Considerando que as primeiras reflexões favorecem a inteligibilidade da fala em salas de



aula, pode-se afirmar, que tal fator é precário na sala avaliada.

3.1.2 Sala de aula S251

Os parâmetros, relacionados à reverberação, medidos na sala de aula S251, TR (Figura 13) e EDT (Figura 14), resultaram em valores elevados e acima do recomendado para salas de aula. Entretanto, apesar de a sala em questão possuir maior volume e de o TR e o EDT serem elevados nas faixas de frequência de 63 a 500 Hz, verifica-se, para frequências acima de 500 Hz e, especificamente na frequência de 1 kHz, para ambos os parâmetros, valores mais baixos. Como os valores dos dois parâmetros são semelhantes, afirma-se que a energia contida nas primeiras reflexões é semelhante à energia da cauda reverberante [21].

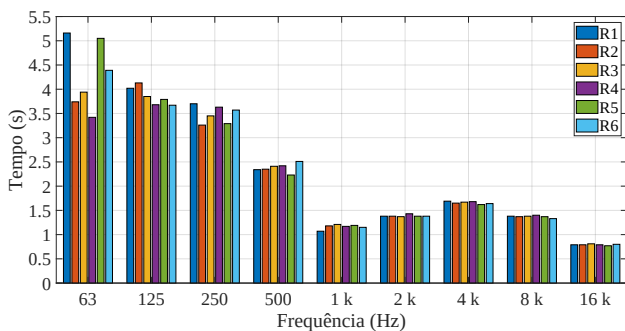


Figura 13: T_{20} medido – Sala S251.

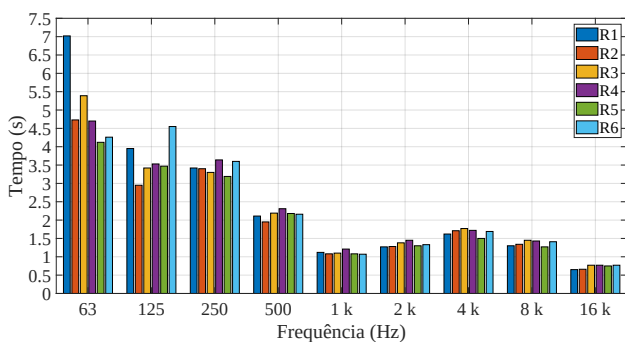


Figura 14: EDT medido – Sala S251.

Quanto aos parâmetros relacionados à clareza da fala, quando o C_{50} está próximo de 0 dB, a energia contida nas primeiras reflexões é a mesma que a energia da cauda reverberante [21]. Tendo em vista que os valores de C_{50} (Figura 15) para os Receptores 1, 2, 3, 4 e 6 estão próximos a -1 dB em 1 kHz e o Receptor 5 está próximo a 0 dB, constata-se que a energia na cauda reverberante é um pouco maior do que a das primeiras reflexões, para os Receptores 1, 2, 3, 4 e 6. Para o R5,

a quantidade de energia contida nas primeiras reflexões é maior, o que é benéfico para salas destinadas à fala.

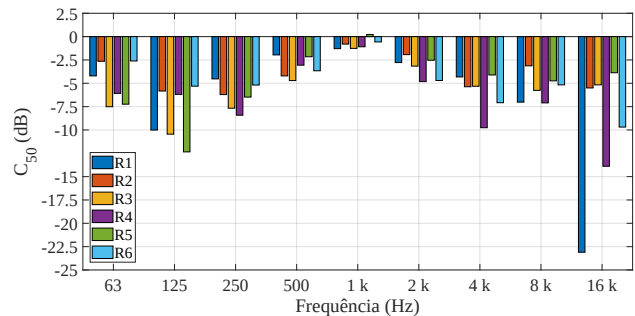


Figura 15: C_{50} medido – Sala S251.

Classificando a inteligibilidade da fala pelo C_{50} [20], tem-se que, para a sala de aula S251, em 1 kHz e para todos os receptores, esta é razoável.

A Figura 16, exprime que, assim como na outra sala, a definição está abaixo do adequado para uma inteligibilidade da fala efetiva (abaixo de 50%). Como já era previsto, a melhor definição está na frequência de 1 kHz, para todos os receptores, especialmente para o R5, em que o D_{50} é de 51,30%.

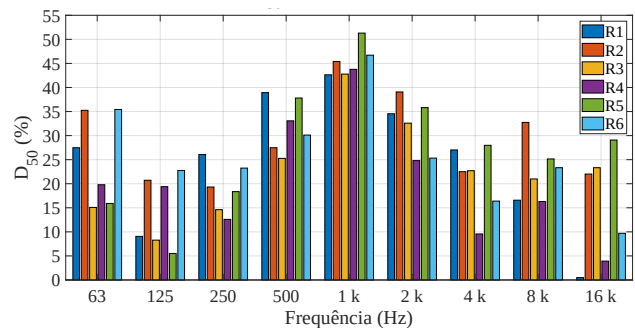


Figura 16: D_{50} medido – Sala S251.

3.2 Simulações acústicas

Os resultados das simulações acústicas são apresentados para cada sala de aula, separadamente. A primeira simulação acústica efetuada no *software* RAIOS 7 de ambas as salas para início do ajuste, foi com os coeficientes de absorção e espalhamento disponíveis no programa. Após esse procedimento, foi possível verificar qual a melhor forma de ajuste a ser realizada.

Uma tentativa de ajustar os resultados de EDT simulados aos medidos para calibrar as salas de aula foi realizada. Todavia, verificou-se que, quanto maior a proximidade com o EDT, mais distante

ficavam os resultados dos TRs medidos aos simulados. Por esse motivo, optou-se por ajustar os modelos das salas de aula por meio do tempo de reverberação, visando considerar não só as primeiras reflexões, mas também a cauda reverberante.

3.2.1 Ajuste do modelo da sala de aula S224

Para a sala de aula S224 apenas os coeficientes de absorção das paredes e do teto são alterados, que consistem nas superfícies maiores. Sua alteração ocorre conforme o necessário (aumentar o α para reduzir o TR ou o procedimento inverso), verificando, a cada tentativa, o EQM. Foram necessários três ajustes para aproximar o máximo possível os resultados do TR simulado ao medido.

Os coeficientes de absorção das superfícies da sala de aula, resultantes do ajuste da simulação, são os dispostos na Tabela 1. Buscou-se aproximar, principalmente, os TRs medido ao simulado, nas frequências de 500 Hz a 4 kHz.

Tabela 1: Coeficientes de absorção dos materiais da Sala S224.

Freq. (Hz)	α				
	Alvenaria	Gesso	Parquet	Vidro	Madeira
63	0,04	0,56	0,20	0,35	0,11
125	0,06	0,56	0,20	0,35	0,11
250	0,07	0,35	0,15	0,25	0,12
500	0,08	0,32	0,10	0,18	0,12
1 k	0,10	0,13	0,10	0,12	0,12
2 k	0,11	0,15	0,05	0,07	0,10
4 k	0,06	0,07	0,10	0,04	0,10
8 k	0,001	0,001	0,15	0,04	0,10
16 k	0,001	0,001	0,20	0,04	0,10

O resultado da comparação entre o TR do último ajuste efetuado na simulação e o TR medido, podem ser verificados na Figura 17.

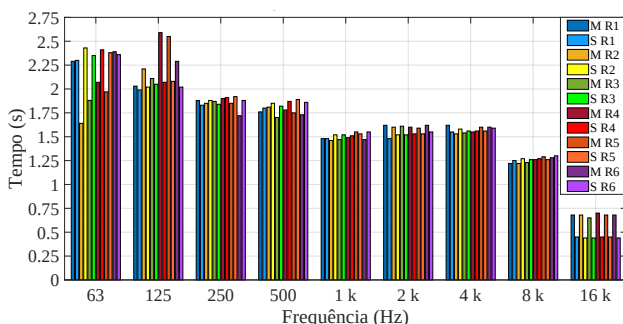


Figura 17: Comparação entre T_{20} medido e simulado na Sala S224.

O receptor cujo TR ficou mais próximo ao simu-

lado foi o R1, com EQM de $0,01 \text{ s}^2$. Isso ocorreu devido ao fato de, como a simulação ocorreu, simultaneamente, para todos os pares de fonte-receptor, um dos receptores foi escolhido para efetuar o ajuste, que foi o R1. Certamente, os valores dos TRs dos outros eram observados, mas apenas um deveria ser escolhido para efetuar o ajuste do α . Desse modo, para o R2 o EQM foi de $0,08 \text{ s}^2$; R3 de $0,03 \text{ s}^2$; R4 de $0,05 \text{ s}^2$; R5 de $0,05 \text{ s}^2$; e R6 de $0,02 \text{ s}^2$.

Percebe-se, ao analisar os coeficientes de absorção finais e os gráficos supracitados, que o programa subestima os valores de T_{20} nas altas frequências. Prova disso, é que nenhum valor de TR simulado em 16 kHz ficou bem próximo ao TR medido, e os α da alvenaria e do gesso ficaram bem próximos a 0, ou seja, não havia mais como reduzir os coeficientes de absorção para aumentar o TR.

3.2.2 Ajuste do modelo da sala de aula S251

Após a simulação acústica efetuada com os coeficientes de absorção retirados do programa RAIOS 7, são efetuados quatro ajustes visando aproximar o TR simulado ao medido. Os α encontrados após o ajuste do modelo da Sala S251, podem ser vistos na Tabela 2. Foi alterado apenas o α do material alvenaria, que corresponde ao encontrado no teto e nas paredes da sala de aula.

Tabela 2: Coeficientes de absorção dos materiais da Sala S251.

Freq. (Hz)	α				
	Alvenaria	Parquet	Lousa	Vidro	Madeira
63	0,014	0,20	0,04	0,35	0,11
125	0,014	0,20	0,04	0,35	0,11
250	0,027	0,15	0,03	0,25	0,12
500	0,06	0,10	0,04	0,18	0,12
1 k	0,18	0,10	0,04	0,12	0,12
2 k	0,15	0,05	0,03	0,07	0,10
4 k	0,09	0,10	0,02	0,04	0,10
8 k	0,001	0,15	0,02	0,04	0,10
16 k	0,001	0,20	0,02	0,04	0,10

A comparação entre os TRs medido e simulado, resultantes do ajuste da simulação, podem ser visualizados na Figura 18.

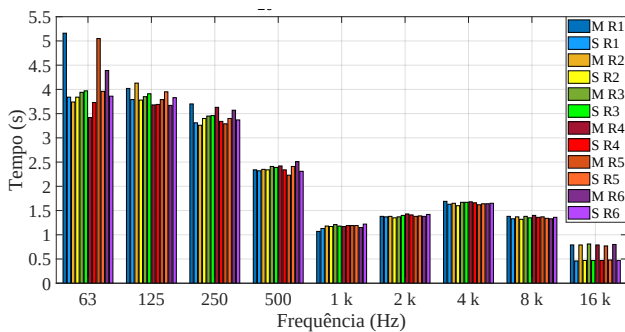


Figura 18: Comparação entre o T_{20} medido e simulado na Sala S251.

Nessa sala de aula, o TR medido em 63 Hz, principalmente, variou bastante entre um receptor e outro, fazendo com que o EQM variasse também. Porém, como se estava analisando as faixas de frequência da fala, prioritariamente, os dados medidos ficaram muito próximos dos simulados entre 500 Hz e 4 kHz. Os EQMs encontrados para os Receptores 1 a 6 foram, nessa ordem, $0,23 \text{ s}^2$; $0,03 \text{ s}^2$; $0,01 \text{ s}^2$; $0,03 \text{ s}^2$; $0,15 \text{ s}^2$; e $0,06 \text{ s}^2$.

3.2.3 Simulação da resposta impulsiva biauricular

Após o ajuste do modelo computacional, foi obtida a resposta impulsiva biauricular (BRIR) para todos os pares fonte-receptor de cada sala de aula.

É possível observar o sinal normalizado da BRIR simulada para o R1 da sala de aula S224 na Figura 19, em que o sinal em vermelho corresponde à orelha esquerda e, em azul, à orelha direita.

Verifica-se maior amplitude na resposta impulsiva correspondente à orelha direita, o que é condizente ao som direto e representa a Posição R1 na Sala S224, em que a fonte sonora está localizada mais próxima à orelha direita do ouvinte.

3.2.4 Aurilização

A aurilização obtida por meio da convolução entre as BRIRs geradas na simulação e os sinais anecoicos é efetuada para todos os receptores das duas salas de aula. Observa-se, na Figura 20, o sinal aurilizado normalizado para o R1 da sala de aula S224.

3.3 Obtenção dos índices de articulação

Os voluntários relataram maior dificuldade no entendimento dos monossílabos devido ao sotaque

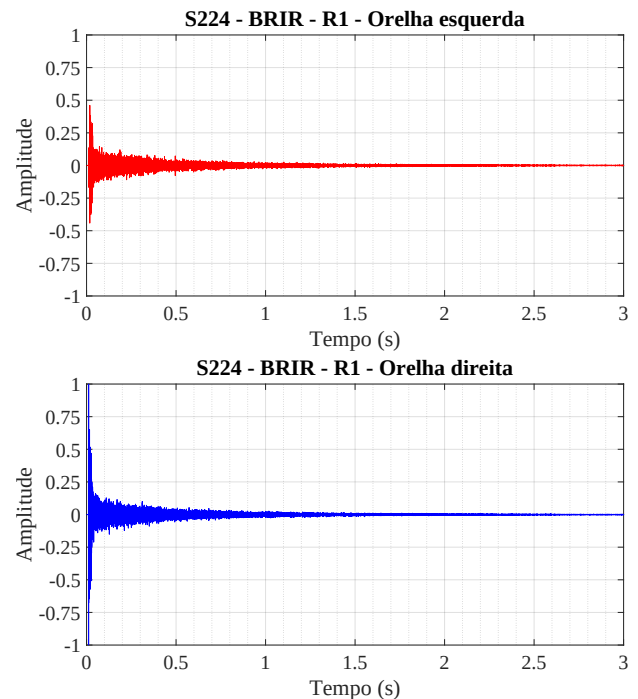


Figura 19: BRIR – R1 – Sala S224

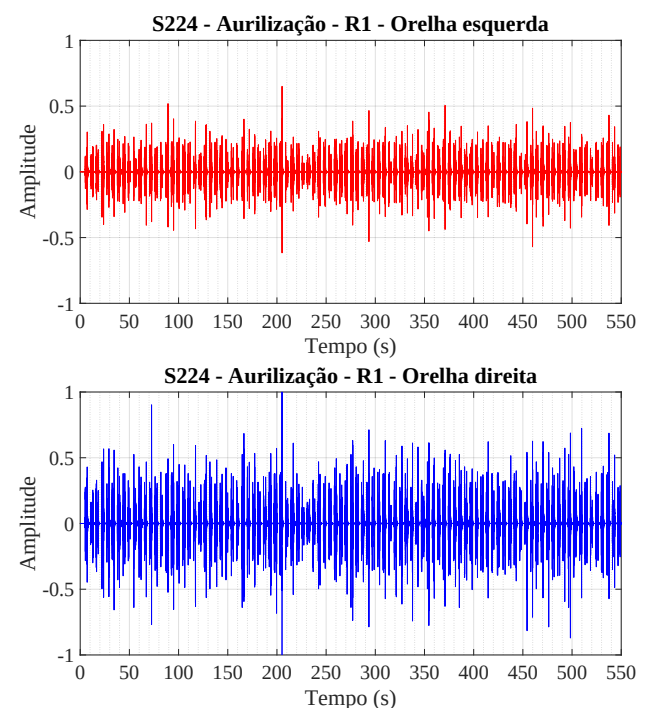


Figura 20: Aurilização – R1 – Sala S224

carioca da oradora. Os testes foram efetuados na região central do Rio Grande do Sul, onde o sotaque é gaúcho. Notou-se, na correção dos testes, a confusão do “r” no final de alguns monossílabos. O monossílabo “se” com o R ao final quando não havia, o mesmo aconteceu com os monossílabos “mi”, “ba”, “pa”, dentre outros.

A média do índice de articulação (IA) obtida na

sala de aula S224 via TAR, com todos os voluntários, sendo quatro em cada posição de receptor, foi de 96,1%. Em contrapartida, a média de IA obtida com o TASS na mesma sala de aula, foi de 98,3%. Esse resultado representa um erro médio absoluto de 2,5%. A Tabela 3 demonstra os dados obtidos nos dois testes, em cada posição de receptor e a média total entre os testes.

Tabela 3: Índice de articulação nos TAR e TASS por receptor – Sala S224

Receptor	TAR	TASS	Erro Médio Absoluto (%)
	IA (%)	IA (%)	
1	95,8	99,0	3,3
2	95,3	99,3	4,0
3	97,8	99,5	1,8
4	96,0	98,3	2,8
5	95,8	98,3	2,5
6	96,0	95,8	0,8
Média	96,1	98,3	2,5

Já para a sala de aula S251, o IA médio da sala no TAR foi de 94,8% e, para o TASS, 96,4%, o que representa um erro médio absoluto de 3,6%. Os resultados discriminados para cada posição de receptor podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4: Índice de articulação nos TAR e TASS por receptor – Sala S251

Receptor	TAR	TASS	Erro Médio Absoluto (%)
	IA (%)	IA (%)	
1	96,3	97,8	3,0
2	92,3	98,0	5,8
3	97,0	96,3	1,8
4	96,8	96,8	2,5
5	90,5	94,5	5,8
6	96,3	94,5	3,0
Média	94,8	96,4	3,6

Verifica-se que, para as duas salas de aula, o resultado do TAR foi menor do que o resultado do TASS. Uma das justificativas plausíveis é o fato de o áudio auralizado possuir menor sensação de reverberação do que o encontrado na sala de aula real, nos testes de articulação reais, facilitando o entendimento dos monossílabos.

Além disso, não houve a inclusão do ruído residual na auralização, o que facilita a inteligibilidade do sinal auralizado, se comparado ao teste realizado na sala de aula, mesmo que, no momento dos testes, havia pouco movimento na Universidade, em contraste a dias corriqueiros. Por-

tanto, para obter uma auralização ainda mais realista e aproximar os resultados aos testes reais, recomenda-se a inclusão do ruído residual, assim como efetuado no estudo de Tenenbaum, Tamirato e Melo [22].

4. CONCLUSÕES

Salas cuja finalidade principal é a inteligibilidade da fala, assim como salas de aula, devem ser cuidadosamente pensadas e projetadas acusticamente. Neste trabalho é avaliada a inteligibilidade da fala em duas salas de aula de ensino superior. As mesas e cadeiras dos alunos são organizadas seguindo o distanciamento social imposto pela pandemia de COVID-19, a partir de protocolo da CBio-CT.

Perante ao estudo realizado e à metodologia apresentada, é possível verificar que, mesmo tendo mais de quatro décadas de diferença entre a edificação de um prédio e outro, ambas as salas de aula analisadas são bastante precárias do ponto de escuta acústico. O TR e o EDT das duas salas estão acima do recomendado para ambientes desse tipo, o que justifica os resultados do fator de clareza e definição.

A calibração do modelo computacional das salas de aula via simulação acústica, possibilitou a criação de ambientes muito similares aos reais. Com isso, é possível adaptá-los a diversas realidades, como a adequação das salas, visando a obtenção de uma inteligibilidade da fala acertada para a finalidade das salas de aula.

No tocante às palavras utilizadas nos testes de articulação, recomenda-se que sejam gravadas por oradores com sotaque da mesma região de aplicação dos testes. Isso evita possíveis confusões no entendimento das palavras, conforme encontrado nesse estudo. Os monossílabos “se”, “mi”, “ca” e “ba”, dentre outros, sofreram essa confusão devido ao sotaque carioca da oradora, pois os voluntários acrescentaram a letra “r” ao final, o que foi configurado como incorreto, pois pode alterar o sentido da palavra.

No tocante aos IAs médios obtidos por meio dos testes de articulação, que foi o objetivo principal desta pesquisa, observou-se o erro médio absoluto entre TAR e TASS de 2,5% para a Sala S224 e para a Sala S251 o erro médio absoluto de 3,6%.



Tal resultado possui similaridade a um estudo realizado [23], que visou a validação da aplicação de testes de articulação virtuais, em que o erro encontrado foi de 2,5%, com auralizações efetuadas com o mesmo *software*, porém com crianças submetidas aos testes de articulação.

A aplicação de TASS é uma metodologia com maior praticidade do que a utilização do TAR e que apresenta um erro médio absoluto menor do que 5,0%. Além disso, é extremamente útil perante a cenários pandêmicos como o vivenciado atualmente, em que o distanciamento social é primordial.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – 88887.488162/2020-00.

REFERÊNCIAS

- [1] Gonçalves, V. de S. B.; Silva, L. B. da e Coutinho, A. S. Ruído como agente comprometedor da inteligibilidade de fala dos professores. *Produção*, 19:466–476, 2009. doi: [10.1590/S0103-65132009000300005](https://doi.org/10.1590/S0103-65132009000300005).
- [2] Ibrahim, S. A. J. Room mode analysis for classrooms: A case study in the college of engineering. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 870, 2020. doi: [10.1088/1757-899X/870/1/012061](https://doi.org/10.1088/1757-899X/870/1/012061).
- [3] Long, M. *Architetural Acoustics*. Oxford, UK: Elsevier, 2006.
- [4] Medrado, L. de O. *Avaliação da inteligibilidade em salas de aula de graduação na Universidade Federal do Rio de Janeiro*. Mestrado em engenharia mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- [5] French, N. R. e Steinberg, J. C. Factors governing the intelligibility of speech sounds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 19:90–119, 1947.
- [6] Kryter, K. D. Methods for the calculation and use of the articulation index. *Journal of the Acoustical Society of America*, 34:1689–1697, 1962.
- [7] Madbouly, A. I.; Noaman, A. Y.; Ragab, A. H. M. e Khedra, A. M. Assessment model of classroom acoustics criteria for enhancing speech intelligibility and learning quality. *Applied Acoustics*, 114:147–158, 2016. doi: [10.1016/j.apacoust.2016.07.018](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.07.018).
- [8] Zannin, P. H. T.; Ferreira, A. M. C. e Sant’Anna, D. Q. de. Comparação do tempo de reverberação e índice de transmissão da fala (sti) em salas de aula construídas em décadas diferentes. *Ambiente construído*, 9: 125–139, 2009. ISSN 1678-8621.
- [9] Savioja, L. e Svensson, U. P. Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138:708–730, 2015. doi: [10.1121/1.4926438](https://doi.org/10.1121/1.4926438).
- [10] Gomes, M. H. de A. e Bertoli, S. R. Auralization for classroom acoustics. *International Congress on Sound and Vibration*, 2005.
- [11] Kleiner, M.; Dalenbäck, B. e Svensson, P. Auralization - an overview. *Journal Audio Engineering Society*, 41:861–875, 1993.
- [12] Tenenbaum, R. A.; Taminato, F. O.; Melo, V. S. G. e Torres, J. C. B. Auralization generated by modeling hrirs with artificial neural networks and its validation using articulation tests. *Applied Acoustics*, 130:260–269, 2018. doi: [10.1016/j.apacoust.2017.09.025](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.09.025).
- [13] Yang, D. e Mak, C. M. Effects of acoustical descriptors on speech intelligibility in hong kong classrooms. *Applied Acoustics*, 171, 2021. doi: [10.1016/j.apacoust.2020.107678](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107678).
- [14] Vorländer, M. *Auralization*. 1ª ed. Germany: Elsevier, 2008.
- [15] Ribeiro, R. S. *Caracterização do condicionamento acústico de uma sala de aula com o uso de painéis de madeira*. Doutorado em engenharia civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2020.
- [16] Melo, V. S. G. *Avaliação de inteligibilidade em salas de aula do Ensino Fundamental a partir de respostas impulsivas biauriculares obtidas com cabeça artificial de dimensões Infantis*. Doutorado em engenharia mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2012.
- [17] Melo, V. S. G.; Tenenbaum, R. A. e Musafir, R. Avaliação de inteligibilidade em salas de aula do ensino fundamental a partir das respostas impulsivas biauriculares obtidas com cabeça artificial infantil. *Acústica e Vibrações*, 44:51–56, 2012.
- [18] Seep, B.; Glosemeyer, R.; Hulce, E.; Linn, M. e Aytar, P. *Classroom Acoustics: A Resource for Creating Environments with Desirable Listening Conditions*. New York: Acoustical Society of America, 2000.
- [19] ANSI/ASA S12.60-2010/Part 1. *America National Standards Institute*, Melville, NY, 2010.
- [20] Marshall, L. G. Speech intelligibility prediction from calculated c_{50} values. *Journal Acoustics Society of America*, 98:2845–2847, 1995.
- [21] Brandão, Eric. *Acústica de Salas: Projeto e Modelagem*. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 2016.
- [22] Tenenbaum, R. A.; Taminato, F. O. e Melo, V. S. G. de. Validating auralizations by using articulation indexes. *International Congress on Acoustics*, 2016.
- [23] Melo, R. A. Tenenbaum e Naranjo, J. F. L. A new approach to validate computer modeling auralizations by using articulation indexes. *Acústica e Vibrações*, 46:20–27, 2014.