

SIMUAÇÃO ACÚSTICA DE UMA DAS SALAS DE AULA DAS FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ (FAACZ).

Emily Pereira da Rocha (emiyrocha@gmail.com)

Aluna de graduação do curso de Engenharia Mecânica da FAACZ.

Wagnner Pereira da Silva (wagnnerpds@gmail.com)

Aluno de graduação do curso de Engenharia Mecânica da FAACZ.

Harerton Oliveira Dourado (harerton@fsjb.edu.br)

Professor do curso de Engenharia Mecânica

RESUMO

Este estudo apresenta uma simulação acústica da Sala 16 (Bloco A) da FAACZ, utilizando o software i-Simpa. A pesquisa avalia as condições acústicas subótimas da sala, caracterizadas por alto tempo de reverberação. O trabalho analisa parâmetros como RT60, C50 e D50, comparando os resultados aos padrões DIN-18041. A simulação utiliza 200.000 partículas em 6 segundos, considerando dimensões da sala de 8,6 m × 6,8 m × 2,8 m. Os resultados demonstram que tratamento acústico melhora significativamente esses parâmetros, beneficiando o ensino-aprendizagem. O estudo destaca como a simulação computacional representa método custo-efetivo para investigar melhorias acústicas sem necessidade de materiais físicos, contribuindo para ambientes educacionais otimizados.

PALAVRAS-CHAVE: acústica, sala de aula, tempo de reverberação.

1 – INTRODUÇÃO

As condições acústicas de salas de aula são parte fundamental na busca por melhorar o processo de ensino e aprendizagem. Sabe-se que condições acústicas inadequadas impactam negativamente o desempenho acadêmico de alunos ao afetar a concentração e compreensão (DOCKREILL; SHIELD, 2006). Nesse sentido alunos e professores são afetados pela exposição a ambientes com valores elevados do tempo de reverberação (DOCKREILL; SHIELD, 2006; POLEWCZYK; JAROSZ, 2020; PRODI; VISENTIN, 2015; SHIELD *et al.*, 2015). Além disso, más condições acústicas afetam todos os estudantes, mas impactam especialmente aqueles com dificuldades de comunicação ou sensibilidades auditivas, que demandam condições acústicas mais adequadas (GREENLAND; JAMES; HARVIE-CLARK, 2023). Dessa forma, a realização de tratamento acústico em salas de aula pode trazer um potencial ganho de qualidade no processo de ensino e aprendizagem.

A acústica de diferentes salas de aula da FAACZ tem sido objeto de pesquisas anteriores (CRUZ; TEIXEIRA; DOURADO, 2016; SILVA; DOURADO, 2024). Mais especificamente no trabalho realizado em 2024, foi constatado que as condições acústicas das salas de aula do Bloco A estão aquém do recomendado para ambientes de aprendizagem. Esse achado motivou a investigação da possibilidade de melhoria da qualidade acústica da referida sala através da instalação de elementos absorvedores. Dessa forma, o presente trabalho objetiva empregar a simulação computacional para estudar o efeito do emprego de tratamento acústico em uma sala de aula do Bloco A das Faculdades Integradas de Aracruz (FAACZ) nos parâmetros acústicos tempo de reverberação, clareza e definição.

2 – REFERENCIAL TEÓRICO

A acústica de ambientes fechados estuda o comportamento do som em espaços confinados — salas de aula, auditórios e escritórios. Ela analisa como as ondas sonoras interagem com superfícies e objetos, determinando a qualidade da audição e a inteligibilidade da fala nesses ambientes (EVEREST; POHLMANN, 2021; VALLE, 2007). A caracterização acústica de um espaço envolve medir parâmetros fundamentais como tempo de reverberação, clareza e definição sonora. Esses dados revelam como o som se comporta no

ambiente e seu impacto direto nas atividades ali desenvolvidas, influenciando a inteligibilidade da fala, o conforto acústico e a compreensão geral do espaço. Parâmetros acústicos importantes incluem o tempo de reverberação (RT60), a clareza de fala (C50) e a definição (D50).

2.1 – TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O RT60 representa um dos parâmetros mais importantes na acústica de ambientes fechados. Definido como o tempo necessário para que a pressão sonora decaia 60 dB após a interrupção da fonte (EVEREST; POHLMANN, 2021), o RT60 é obtido em medições de campo através do cálculo do decaimento sonoro em períodos iniciais — geralmente 20 ms ou 30 ms. Sua determinação é influenciada por três fatores principais: o volume da sala, a área das superfícies e os materiais utilizados. A importância desse parâmetro reside em seu impacto direto na inteligibilidade da fala e no conforto acústico. Reverberações prolongadas provocam sobreposição silábica e dificultam a compreensão, enquanto reverberações muito curtas comprometem a naturalidade da percepção sonora, o RT60 é obtido em medições de campo através do decaimento sonoro em períodos iniciais — geralmente 20 ms ou 30 ms. Sua determinação é influenciada por três fatores principais: o volume da sala, a área das superfícies e os materiais utilizados. A importância desse parâmetro reside em seu impacto direto na inteligibilidade da fala e no conforto acústico. Reverberações prolongadas provocam sobreposição silábica e dificultam a compreensão, enquanto reverberações muito curtas comprometem a naturalidade da percepção sonora (EVEREST; POHLMANN, 2021).

2.2 – CLAREZA E DEFINIÇÃO

C50 e D50 constituem parâmetros acústicos fundamentais para avaliar a relação entre energia sonora inicial e tardia em ambientes fechados. O C50, expresso em decibéis, é definido como a razão logarítmica entre a energia sonora que chega nos primeiros 50 ms (som direto e reflexões iniciais) e a energia que chega após esse período (som reverberante tardio) (CHRISTENSEN; KOUTSOURIS; RINDEL, 2013). O D50, expresso em porcentagem, representa a razão linear entre a energia sonora da janela temporal inicial de 50 ms e a energia sonora total do ambiente (BISTAFA; BRADLEY, 2000). Esses parâmetros são particularmente relevantes para a inteligibilidade da fala em salas de aula, sendo que valores mais elevados indicam melhor separação entre componentes sonoros diretos e reverberantes, favorecendo substancialmente a compreensão da comunicação verbal (ANSAY; ZANNIN, 2016; EVEREST; POHLMANN, 2021).

2.3 - RECOMENDAÇÕES PARA ACÚSTICA DE SALAS DE AULA

Diferentemente de outros países, o Brasil não possui normas estabelecidas para padrões acústicos em ambientes educacionais. Estudam-se atualmente as possibilidades de adotar a norma alemã DIN-18041 (NAKAZATO et al., 2019) , que para salas de aula estabelece critérios específicos: $RT60\ (s) = 0,32 \log V - 0.17$ (onde V é o volume (m^3) da sala) e $C50 \geq 0\ dB$.

2.4 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ACÚSTICA DE AMBIENTES

A simulação numérica da acústica de ambientes é essencial para prever o comportamento do som em salas e ambientes complexos. O campo evoluiu das teorias clássicas de reverberação — como as fórmulas de Sabine e Eyring — para métodos computacionais avançados. A acústica geométrica, através de modelos de fonte imagem e ray tracing, é eficaz para reflexões iniciais em espaços grandes (DE SENA et al., 2015; KIRSCH et al., 2023; NOWOŚWIAT; OLECHOWSKA, 2022), enquanto equações de difusão e modelos estocásticos generalizam a teoria clássica para ambientes complexos ou acoplados (BILLON et al., 2006; VALEAU; PICAUT; HODGSON, 2006).

Os métodos baseados em partículas, particularmente a Hidrodinâmica de Partículas Suavizadas (SPH), simulam a propagação do som rastreando partículas sonoras, oferecendo flexibilidade para geometrias irregulares e condições de contorno complexas (HANYU, 2023, 2025; ZHANG et al., 2016). Entre os métodos

de rastreamento de partículas, destaca-se o SPPS (Sound Particle Propagation System), um código numérico baseado no conceito de partículas sonoras que implementa tanto abordagens energética quanto probabilística. O método SPPS funciona rastreando partículas carregadas de energia que se propagam através de um domínio 3D, interagindo com objetos conforme colidem (PICAUT; FORTIN, 2012b). Alternativamente, métodos baseados em ondas — como Elementos Finitos (FEM), Elementos de Contorno (BEM) e Elementos Espectrais (SEM) — resolvem diretamente a equação da onda, capturando efeitos de difração e interferência, sendo especialmente precisos em baixas frequências (LI et al., 2019; PIND et al., 2019; VORLÄNDER, 2013; WANG; COSNEFROY; HORNIKX, 2021).

Abordagens contemporâneas combinam múltiplas metodologias ou utilizam aprendizado de máquina para estimar parâmetros acústicos (FOY; DELEFORGE; DI CARLO, 2021; NOWOŚWIAT; OLECHOWSKA, 2022; RAGHUVANSHI et al., 2010). A escolha do método depende do equilíbrio entre eficiência computacional e precisão física: métodos clássicos são rápidos mas limitados, enquanto métodos baseados em partículas e ondas são precisos, mas computacionalmente intensivos (BILBAO; ALARY, 2024; TUDOCE; YAMADA; LEWENSTEIN, 2025).

3 – METODOLOGIA

A acústica da sala de aula foi simulada utilizando o software i-Simpa (PICAUT; FORTIN, 2012a), versão 1.3.4, um simulador acústico de código aberto que implementa o método SPPS (PICAUT; FORTIN, 2012b). Este método foi selecionado por sua capacidade de lidar com geometrias complexas e condições de contorno variadas, características comuns em ambientes educacionais. No SPPS, cada partícula segue uma trajetória retilínea entre passos de tempo até colidir com uma superfície, onde pode ser absorvida, refletida espelhada ou difusamente, espalhada por objetos inseridos no domínio, transmitida ou refratada, dependendo das propriedades dos materiais. O código SPPS oferece tratamento sofisticado de fenômenos acústicos incluindo absorção atmosférica (com métodos energético e probabilístico), espalhamento por objetos inseridos (utilizando distribuições de probabilidade baseadas no caminho livre médio), refração (considerando perfis de velocidade logarítmicos), e reflexão com especificação de coeficientes de espalhamento que variam entre reflexão espelhada e difusa de Lambert.

A interface gráfica I-Simpa facilita a aplicação do SPPS para geometrias complexas e o pós-processamento de resultados, incluindo cálculo automático de parâmetros de acústica de salas. Os parâmetros acústicos foram calculados a partir das simulações, incluindo o tempo de reverberação (RT60), a clareza (C50) e a definição (D50). Esta abordagem computacional possibilita a análise detalhada do comportamento acústico sem necessidade de medições in loco, facilitando a otimização do design acústico da sala antes de sua implementação prática.

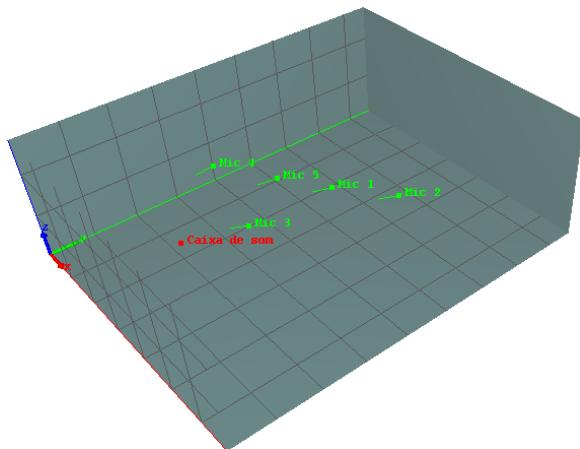
3.1 – SALA ESTUDADA

A sala estudada foi a sala de n. 16 do bloco A da FAACZ. Esta sala possui 8,6 m x 6,8 m x 2,8 m (comprimento, largura e altura), correspondente a um volume de 163,7 m³. Para as medições, a porta e a janela permaneceram fechadas.

3.2 – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A modelagem e a simulação computacional foi realizada no software i-Simpa, respeitando as dimensões da sala física (Figura 1). A fonte sonora virtual — simulada como uma fonte omnidirecional com espectro sonoro na faixa de 20 Hz a 20 kHz, bem como a posição dos receptores pontuais refletiram os posicionamentos da caixa de som e das posições do microfone empregadas por Silva e Dourado (2024), indicadas na Tabela 1.

Figura 1: Representação virtual da sala no software i-Simpa.



A simulação da dispersão acústica empregou o método SPPS, utilizando os parâmetros padrão do software; O número de partículas emitidas pela fonte foi 200 000. O passo de tempo empregado foi de 0,001 s, com tempo total de simulação de 6 s.

Tabela 1: posições do microfone (em metros)

POSIÇÃO	x (m)	y (m)	z (m)
1	3,47	4,85	1,23
2	4,61	5,69	1,23
3	3,39	2,88	1,23
4	1,16	3,45	1,23
5	2,45	4,20	1,23
Fonte sonora	3,26	1,51	1,46

Foram dois os cenários simulados: sala sem tratamento (todas as superfícies com 5% de absorção) e sala com tratamento, com o teto totalmente revestido com painéis de lã de vidro (80% de absorção), parede do fundo totalmente revestida com espuma acústica (60% de absorção) e paredes laterais e parede do quadro com o equivalente à metade da área revestida com a mesma espuma acústica utilizada na parede do fundo.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do tempo de reverberação estão mostrados na Figura 2, onde é possível observar que, na sala sem tratamento, nas posições de receptores simuladas, o tempo variou entre cerca de 4 e 1 s, entretanto, permaneceu acima de 2 s nas frequências abaixo de 4000 Hz e acima de 1 s nas frequências abaixo de 8000 Hz, o que pode afetar a inteligibilidade na faixa de frequência correspondente à voz humana (100 Hz a 5 kHz). Já na sala tratada os resultados mostraram o tempo de reverberação sempre abaixo de 0,45 s. Em ambos os casos simulados, não houve variação entre os resultados obtidos nas diferentes posições simuladas. É importante ressaltar que a norma DIN-18041 aponta que o tempo de reverberação ideal para uma sala com o $163,7 \text{ m}^3$ seria 0,54 s. Sabe-se que tempos de reverberação mais curtos (tipicamente abaixo de 0,6–0,8 segundos) melhoram a inteligibilidade da fala e o desempenho cognitivo, especialmente em tarefas que envolvem memória de trabalho, percepção de fala e compreensão (BRINK et al., 2023; MINELLI et al., 2023; PARK; HAAN, 2021; VALENTE et al., 2012).

Os resultados para C50 são mostrados na Figura 3 e os resultados para D50, na Figura 4. Para a sala sem tratamento acústico, os valores obtidos para C50 estiveram em torno de -5 dB, inferiores, portanto, à recomendação da norma DIN-18041 ($C50 \geq 0 \text{ dB}$). Em concordância com esses resultados, D50 registrou, na faixa do espectro da voz humana, valores inferiores a 40%. O cenário muda quando o ambiente recebe tratamento, com os valores de C50 variando entre cerca de 10 dB e 15 dB na faixa de espectro da voz humana. É importante ressaltar que um incremento de 6 dB corresponde ao dobro da intensidade, de forma que os valores de C50 para a sala tratada foram 4 vezes melhores do que os da sala sem tratamento, em concordância com o incremento de cerca de 70 pontos percentuais nos valores de D50. Estudos apontam

que valores de C50 acima de 2 dB, bem como D50 acima de 86% em salas de aula melhoram a inteligibilidade de fala e o desempenho em leitura, fala e aprendizado (ABRAHAM; RAVISHANKAR, 2021; MINELLI *et al.*, 2023; PUGLISI *et al.*, 2018; YANG; MAK, 2021). Yong-Ji Choi (2020) é ainda mais rigoroso, ao recomendar, para salas de aula universitárias, um valor de C50 de 7,3 dB ou mais.

Figura 2: Tempo de reverberação da sala com e sem tratamento acústico.

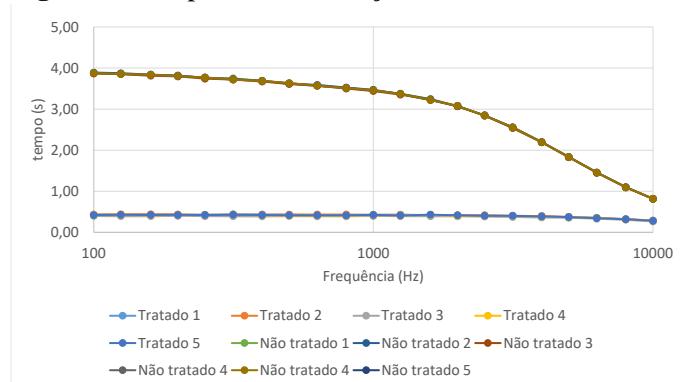


Figura 3: Valores de C50 da sala com e sem tratamento acústico.

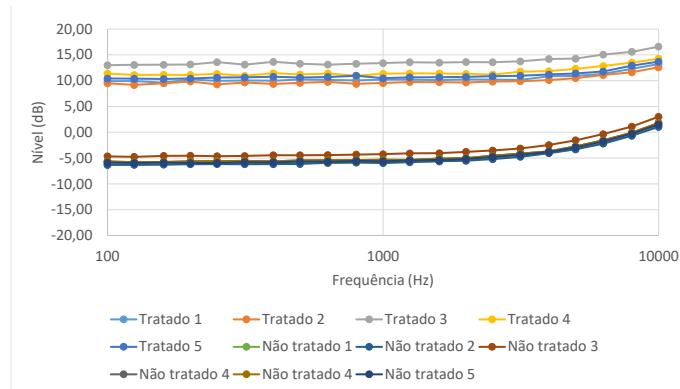
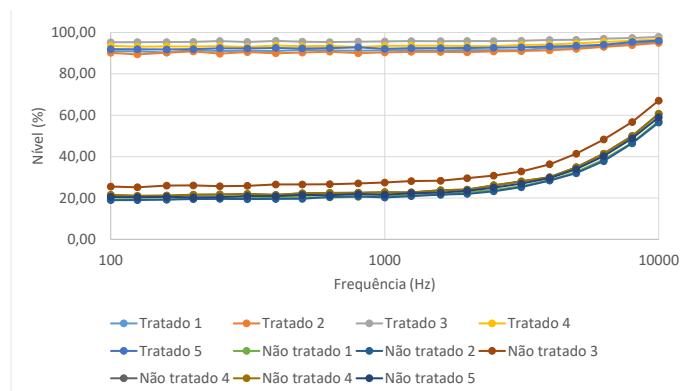


Figura 4: Valores de D50 da sala com e sem tratamento acústico.



O efeito de melhores condições acústicas em salas de aula pode ser sentido na própria FAACZ, onde as salas de aula do 3º andar do Bloco B possuem paredes construídas com gesso acartonado e revestimento do teto com lã de vidro. Medições acústicas em uma dessas salas apontaram tempo de reverberação inferiores a 1,2 s, com C50 superior a 0 dB e D50 maior que 50% para frequências acima de 500 Hz (CRUZ, TEIXEIRA, DOURADO, 2016). É importante ressaltar que condições acústicas adequadas beneficiam não somente os alunos, mas também reduzem a agressividade e a fadiga do professor (POLEWCZYK; JAROSZ, 2020).

É importante ressaltar que os resultados obtidos na simulação da sala sem tratamento mostraram resultados piores que os que foram medidos na sala (maiores valores de RT60, de 2,2 s; C50 variando entre -5 dB a 6,5 dB, com valores inferiores a 0 dB nas frequências inferiores a 1,5 kHz e D50 inferiores a 74% na região entre 100 Hz a 5 kHz). Esse fato se deve ao fato de que a sala virtual utilizada na simulação não levou em conta as perdas por transmissão através das paredes, janelas e porta presentes na sala física. Apesar dessa limitação, os resultados da simulação computacional mantêm relevância ao evidenciar os benefícios do tratamento acústico, mesmo na ausência de perdas por transmissão.

A simulação acústica da sala de aula realizada no presente trabalho confirmou que as condições acústicas estão aquém do recomendado para salas de aula. Os resultados mostraram que a utilização de matérias de revestimento com propriedades absorтивas pode melhorar consideravelmente o ambiente da sala trazendo benefícios tanto para alunos, como para professores, o que poderá impactar positivamente os resultados acadêmicos da Instituição.

5 – REFERÊNCIAS

- ABRAHAM, A. K.; RAVISHANKAR, M. S. A case study of acoustic intervention in classrooms. *Building Acoustics*, v. 28, n. 4, p. 293–308, 1 dez. 2021. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1351010X20975765>>. Acesso em: 6 nov. 2025.
- ANSAY, S.; ZANNIN, P. H. T. Using the Parameters of Definition, D50, and Reverberation Time, RT, to Investigate the Acoustic Quality of Classrooms. *Canadian Acoustics*, v. 44, n. 4, p. 6–11, 3 dez. 2016. Disponível em: <<https://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/2653>>. Acesso em: 30 out. 2024.
- BILBAO, S.; ALARY, B. Directional reverberation time and the image source method for rectangular parallelepipedal rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 155, n. 2, p. 1343–1352, 1 fev. 2024. Disponível em: <asa.jasa.acousticalsociety.org/article/155/2/1343/3265400/Directional-reverberation-time-and-the-image>. Acesso em: 8 nov. 2025.
- BILLON, A. *et al.* On the use of a diffusion model for acoustically coupled rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 120, n. 4, p. 2043–2054, 1 out. 2006. Disponível em: <asa.jasa.acousticalsociety.org/article/120/4/2043/982725/On-the-use-of-a-diffusion-model-for-acoustically>. Acesso em: 8 nov. 2025.
- BISTAFA, S. R.; BRADLEY, J. S. Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 107, n. 2, p. 861–875, 1 fev. 2000. Disponível em: <asa.jasa.acousticalsociety.org/article/107/2/861/555456/Reverberation-time-and-maximum-background-noise>. Acesso em: 30 out. 2024.
- BRINK, H. W. *et al.* Positive effects of indoor environmental conditions on students and their performance in higher education classrooms: A between-groups experiment. *Science of The Total Environment*, v. 869, p. 161813, 15 abr. 2023. Acesso em: 6 nov. 2025.
- CHRISTENSEN, C. L.; KOUTSOURIS, G.; RINDEL, J. H. The ISO 3382 parameters: Can we simulate them? Can we measure them? *Akustika*, v. 20, n. 1, p. 35–49, 2013.
- CRUZ, C. W. N.; TEIXEIRA, R. S.; DOURADO, H. O. Avaliação acústica de uma sala de aula do curso de Engenharia de Produção na FAACZ – Faculdades Integradas de Aracruz. 2016, Aracruz: [s.n.], 2016. p. 1–8. Disponível em: <https://faacz.com.br/portal/conteudo/iniciacao_cientifica/programa_de_iniciacao_cientifica/2016/anais/avaliacao_acustica_de_uma_sala_de_aula_do_curso_de_engenharia_de_producao_na_faacz.pdf>.

DE SENA, E. *et al.* Efficient Synthesis of Room Acoustics via Scattering Delay Networks. *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, v. 23, n. 9, p. 1478–1492, 1 set. 2015. Acesso em: 8 nov. 2025.

DOCKREILL, J. E.; SHIELD, B. M. Acoustical barriers in classrooms: The impact of noise on performance in the classroom. *British Educational Research Journal*, v. 32, n. 3, p. 509–525, 1 jun. 2006. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1080/01411920600635494>>. Acesso em: 31 out. 2024.

EVEREST, F. A.; POHLMANN, K. C. *Master Handbook of Acoustics*. 7. ed. [S.l.]: McGraw Hill, 2021. Disponível em: <<https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260473599>>.

FOY, C.; DELEFORGE, A.; DI CARLO, D. Mean absorption estimation from room impulse responses using virtually supervised learning. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 150, n. 2, p. 1286–1299, 1 ago. 2021. Disponível em: <asa.jasa/article/150/2/1286/615382/Mean-absorption-estimation-from-room-impulse>. Acesso em: 8 nov. 2025.

GREENLAND, E.; JAMES, A.; HARVIE-CLARK, J. INCLUSIVE ACOUSTIC DESIGN FOR MAIN-STREAM SCHOOLS: AN EVIDENCE BASED APPROACH. 20 out. 2023, [S.l.]: Institute of Acoustics, 20 out. 2023. Disponível em: <<https://www.ioa.org.uk/catalogue/paper/inclusive-acoustic-design-main-stream-schools-evidence-based-approach>>. Acesso em: 8 nov. 2025.

HANYU, T. Reconstruction of the reverberation theory in a diffuse sound field by using reflection orders. *Acoustical Science and Technology*, v. 46, n. 5, p. 509–520, 1 set. 2025. Acesso em: 8 nov. 2025.

HANYU, T. Revision of Sabine's reverberation theory by following a different approach of Eyring's theory. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 154, n. 4_supplement, p. A312–A312, 1 out. 2023. Disponível em: <asa.jasa/article/154/4_supplement/A312/2924681/Revision-of-Sabine-s-reverberation-theory-by>. Acesso em: 8 nov. 2025.

KIRSCH, C. *et al.* computationally-efficient simulation of late reverberation for inhomogeneous boundary conditions and coupled rooms. *Journal of the audio engineering society*, v. 71, n. 4, p. 186–201, 2023.

LI, C. *et al.* A fast multi-layer boundary element method for direct numerical simulation of sound propagation in shallow water environments. *Journal of Computational Physics*, v. 392, p. 694–712, 1 set. 2019. Acesso em: 8 nov. 2025.

MINELLI, G. *et al.* Objective Assessment of Binaural Benefit from Acoustical Treatment in Real Primary School Classrooms. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2023, Vol. 20, Page 5848, v. 20, n. 10, p. 5848, 17 maio 2023. Disponível em: <www.mdpi.com/1660-4601/20/10/5848/htm>. Acesso em: 6 nov. 2025.

NAKAZATO, M. *et al.* The applicability of DIN 18041 in Brazilian offices. 16 jun. 2019, Madrid: [s.n.], 16 jun. 2019.

NOWOŚWIAT, A.; OLECHOWSKA, M. Experimental Validation of the Model of Reverberation Time Prediction in a Room. *Buildings* 2022, Vol. 12, Page 347, v. 12, n. 3, p. 347, 13 mar. 2022. Disponível em: <www.mdpi.com/2075-5309/12/3/347/htm>. Acesso em: 8 nov. 2025.

PARK, C. J.; HAAN, C. H. Initial Study on the Reverberation Time Standard for the Korean Middle and High School Classrooms Using Speech Intelligibility Tests. *Buildings* 2021, Vol. 11, Page 354, v. 11, n. 8, p. 354, 15 ago. 2021. Disponível em: <www.mdpi.com/2075-5309/11/8/354/htm>. Acesso em: 6 nov. 2025.

PICAUT, J.; FORTIN, N. I-Simpa, a graphical user interface devoted to host 3D sound propagation numerical codes. abr. 2012a, Nantes, France: [s.n.], abr. 2012. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00810893>>.

PICAUT, J.; FORTIN, N. SPPS, a particle-tracing numerical code for indoor and outdoor sound propagation prediction. *Proceedings of the Acoustics 2012 Nantes Conference, 11th Congrès Français d'Acoustique, 2012 IOA annual meeting*, n. April, p. 1417–1422, 23 abr. 2012b. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00810894>>. Acesso em: 5 out. 2019.

PIND, F. et al. Time domain room acoustic simulations using the spectral element method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 145, n. 6, p. 3299–3310, 1 jun. 2019. Disponível em: <asa.jasa/article/145/6/3299/939446/Time-domain-room-acoustic-simulations-using-the>. Acesso em: 8 nov. 2025.

POLEWCZYK, I.; JAROSZ, M. Teachers' and students' assessment of the influence of school rooms acoustic treatment on their performance and wellbeing. *Archives of Acoustics*, v. 45, n. 3, p. 401–417, 2020. Acesso em: 19 jun. 2024.

PRODI, N.; VISENTIN, C. Listening efficiency during lessons under various types of noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 138, n. 4, p. 2438–2448, 1 out. 2015. Disponível em: <asa.jasa/article/138/4/2438/900226/Listening-efficiency-during-lessons-under-various>. Acesso em: 31 out. 2024.

PUGLISI, G. E. et al. Influence of classroom acoustics on the reading speed: A case study on Italian second-graders. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 144, n. 2, p. EL144–EL149, 1 ago. 2018. Disponível em: <asa.jasa/article/144/2/EL144/950908/Influence-of-classroom-acoustics-on-the-reading>. Acesso em: 6 nov. 2025.

RAGHUVANSHI, N. et al. Precomputed wave simulation for real-time sound propagation of dynamic sources in complex scenes. 26 jul. 2010, [S.l.]: Association for Computing Machinery (ACM), 26 jul. 2010. p. 1–11. Disponível em: <<https://dl.acm.org/doi/10.1145/1833349.1778805>>. Acesso em: 8 nov. 2025.

SHIELD, B. et al. A survey of acoustic conditions and noise levels in secondary school classrooms in England. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 137, n. 1, p. 177–188, 1 jan. 2015. Disponível em: <asa.jasa/article/137/1/177/910591/A-survey-of-acoustic-conditions-and-noise-levels>. Acesso em: 31 out. 2024.

SILVA, W. P. DA; DOURADO, H. O. AVALIAÇÃO ACÚSTICA DE UMA DAS SALAS DE AULA DAS FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ (FAACZ). 2024, Aracruz: [s.n.], 2024. p. 1–6. Disponível em: <<https://faacz.com.br/portal/wp-content/uploads/2024/12/AVALIACAO-ACUSTICA-DE-UMA-DAS-SALAS-DE-AULA-DAS-FACULDADES-INTEGRADAS-DE-ARACRUZ-FAACZ-.pdf>>.

TUDOCE, J.; YAMADA, R.; LEWENSTEIN, M. Exploring the intersection of sound reverberation and quantum interference behavior. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 157, n. 4_Supplement, p. A293–A293, 1 abr. 2025. Disponível em: <asa.jasa/article/157/4_Supplement/A293/3353844/Exploring-the-intersection-of-sound-reverberation>. Acesso em: 8 nov. 2025.

VALEAU, V.; PICAUT, J.; HODGSON, M. On the use of a diffusion equation for room-acoustic prediction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 119, n. 3, p. 1504–1513, 1 mar. 2006. Disponível em: <asa.jasa/article/119/3/1504/849036/On-the-use-of-a-diffusion-equation-for-room>. Acesso em: 8 nov. 2025.

VALENTE, D. L. *et al.* Experimental investigation of the effects of the acoustical conditions in a simulated classroom on speech recognition and learning in children. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 131, n. 1, p. 232–246, 1 jan. 2012. Disponível em: <[/asa/jasa/article/131/1/232/823357](https://asa.jasa.acousticalsociety.org/article/131/1/232/823357)>. Acesso em: 6 nov. 2025.

VALLE, S. DO. *Manual Prático de Acústica*. 3. ed. Rio de Janeiro: Música & Tecnologia, 2007.

VORLÄNDER, M. Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 133, n. 3, p. 1203–1213, 1 mar. 2013. Disponível em: <[/asa/jasa/article/133/3/1203/912590](https://asa.jasa.acousticalsociety.org/article/133/3/1203/912590)>. Acesso em: 8 nov. 2025.

WANG, H.; COSNEFROY, M.; HORNIKX, M. An arbitrary high-order discontinuous Galerkin method with local time-stepping for linear acoustic wave propagation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 149, n. 1, p. 569–580, 1 jan. 2021. Disponível em: <[/asa/jasa/article/149/1/569/610300](https://asa.jasa.acousticalsociety.org/article/149/1/569/610300)>. Acesso em: 8 nov. 2025.

YANG, D.; MAK, C. M. Effects of acoustical descriptors on speech intelligibility in Hong Kong classrooms. *Applied Acoustics*, v. 171, p. 107678, 1 jan. 2021. Acesso em: 6 nov. 2025.

YONG-JI CHOI. Measurements and Evaluations of Predictors for Speech Intelligibility Using Speech and Noise Levels Measured During Lectures. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, v. 14, n. 1, p. 91–100, 28 fev. 2020. Disponível em: <www.jkiaebs.org/articles/xml/zkE1/>. Acesso em: 19 jun. 2024.

ZHANG, Y. O. *et al.* Efficient SPH simulation of time-domain acoustic wave propagation. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, v. 62, p. 112–122, 1 jan. 2016. Acesso em: 8 nov. 2025.