



OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS ACÚSTICOS EM SALAS MULTIFUNCIONAIS: DIAGNÓSTICO E PROPOSTAS DE MELHORIA

Bernardo Aguiar de Souza Penha¹, Ricardo Humberto de Oliveira Filho²

RESUMO: Este estudo avaliou a eficácia de um projeto de tratamento acústico em uma sala multiuso de 197 lugares através de métodos analíticos e simulação computacional. Estimaram-se parâmetros objetivos como TR_{60} , D_{50} , T_C e $\%AL_{cons}$ com base nas propriedades físicas do recinto, enquanto a modelagem tridimensional e o método do traçado de raios permitiram analisar a distribuição espacial da energia sonora. Os resultados demonstraram melhorias substanciais após a intervenção: o TR_{60} médio (Sabine) reduziu de 2,231 s para 0,914 s, alinhando-se às recomendações da NBR 12179. O estudo concluiu que a combinação estratégica de materiais absorvedores e refletores otimizou a clareza e a inteligibilidade da fala no ambiente.

Palavras-chave: Acústica de Salas; Simulação Computacional; Inteligibilidade da Fala.

INTRODUÇÃO

A qualidade acústica em ambientes como auditórios é definida pela interação das ondas sonoras com as superfícies do recinto, onde o equilíbrio entre reflexão e absorção molda o conforto da experiência auditiva (Kuttruff; Vorländer, 2024; Valle, 2009). Para garantir o desempenho adequado, a engenharia acústica utiliza métricas objetivas parametrizadas por normas internacionais e nacionais, como a ISO 3382-1 (International Organization for Standardization, 2009) e a ABNT NBR 12179 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992). Parâmetros como Tempo de Reverberação (TR_{60}), Tempo Central (T_C), Definição (D_{50}) e Perda de Articulação de Consoantes ($\%AL_{cons}$) são fundamentais para quantificar a clareza e a inteligibilidade da fala.

Em salas multiuso, o equilíbrio entre esses indicadores é complexo, exigindo um projeto que harmonize a vivacidade musical com a nitidez da palavra falada. Nesse cenário, a simulação computacional baseada em acústica geométrica, utilizando métodos como o de traçado de raios e o das fontes virtuais, consolidou-se como uma ferramenta essencial para a análise preditiva e a otimização de tratamentos acústicos antes da implementação física (Rindel, 2001).

Este estudo apresenta a avaliação da eficácia de um projeto de condicionamento acústico para uma sala de 197 lugares, comparando, por meio de simulação numérica, o desempenho do ambiente antes e depois da intervenção. O objetivo é determinar o impacto das soluções propostas, que incluem o uso estratégico de materiais fonoabsorventes e refletores, além de adequações geométricas, sobre os parâmetros de qualidade sonora, verificando sua conformidade com as recomendações normativas vigentes.

METODOLOGIA

A avaliação da qualidade acústica da sala, nas condições pré e pós-tratamento, envolveu a estimativa de parâmetros objetivos em comparação com as recomendações da literatura e normas técnicas. A análise foi estruturada a partir da modelagem tridimensional e simulação numérica do campo sonoro para avaliar a propagação e a homogeneidade acústica.

Caracterização do Espaço e Proposta de Adequação

O auditório possui capacidade para 197 pessoas sentadas, com um volume definido por um vão de 31,60 m entre as paredes de fundo e palco, largura de 11,10 m e pé-direito variável

¹ Universidade Estadual de Campinas, Doutorado em Música

² Universidade Federal de Uberlândia, Professor da Faculdade de Engenharia Mecânica

entre 3,09 m e 4,81 m. Inicialmente, o ambiente era composto por superfícies predominantemente reflexivas como laje de concreto, alvenaria pintada e madeira. A adequação proposta visou o controle de reflexões tardias e a otimização da primeira reflexão sonora (Valle, 2009). Próximo ao palco, foram instalados painéis refletores NEXACUSTIC (Sonex, 2026) lisos com inclinação de 1° nas paredes laterais e gesso acartonado inclinado no teto para direcionamento da energia. No fundo da plateia e teto posterior, aplicaram-se painéis fonoabsorventes perfurados NEXACUSTIC 16 (Sonex, 2026) e RIGITONE (Rigitone, 2026), visando eliminar ecos e uniformizar o campo, como ilustrado na Figura 1. A Tabela 1 apresenta todos os materiais e seus respectivos coeficientes de absorção sonora.

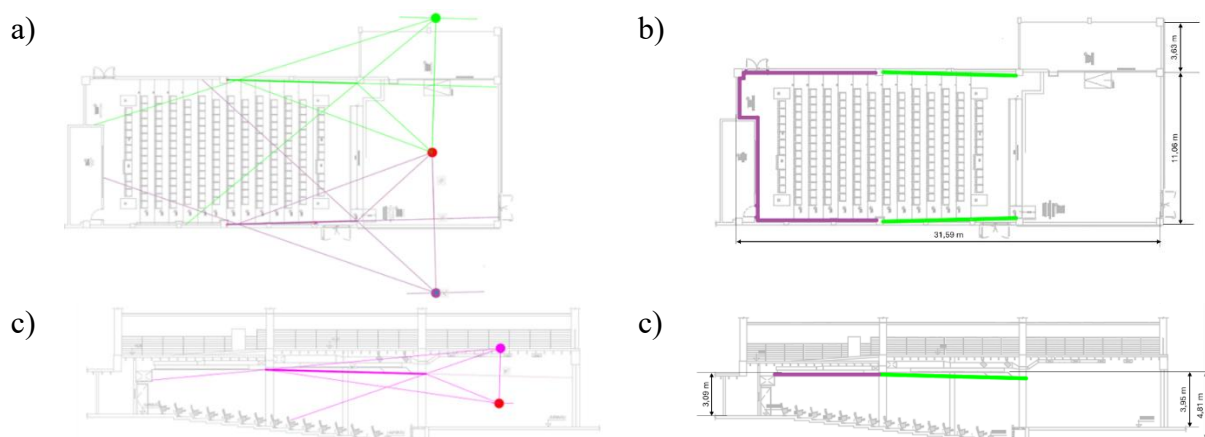


Figura 1: a) Posicionamento dos painéis refletores nas paredes laterais; b) Distribuição dos painéis refletores (verde) e absorventes (roxo) nas paredes; c) posicionamento dos painéis refletores no teto; d) Distribuição dos painéis refletores (verde) e absorventes (roxo) no teto.

Tabela 1: Áreas e coeficiente de absorção sonora dos materiais após tratamento acústico.

Material	Área (S) [m²]	Coeficiente de absorção sonora (α)					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Ar ¹	-	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,006
Poltronas (quantidade) ¹	197	0,080	0,160	0,220	0,230	0,240	0,240
Alvenaria pintada ¹	118,95	0,031	0,031	0,042	0,042	0,042	0,042
Madeira ¹	125,66	0,117	0,117	0,129	0,129	0,106	0,106
Porta de madeira ¹	14,56	0,240	0,190	0,140	0,080	0,120	0,100
Concreto ¹	32,95	0,010	0,031	0,052	0,021	0,020	0,021
Painel Nexacustic Liso ²	84,89	0,180	0,060	0,060	0,060	0,100	0,140
Painel Nexacustic 16 ²	92,77	0,280	0,960	0,990	0,940	0,770	0,650
Vidro laminado ¹	2,38	0,020	0,040	0,060	0,080	0,100	0,080
Laje de concreto ¹	153,31	0,010	0,010	0,010	0,020	0,020	0,020
Gesso acartonado ¹	130,33	0,100	0,080	0,050	0,030	0,030	0,030
Rigitone ³	102,63	0,600	0,850	0,800	0,650	0,450	0,300
Carpete de nylon ¹	221,29	0,050	0,100	0,100	0,200	0,300	0,400

Fontes: ¹ Bistafa, 2018. ² Sonex, 2026. ³ Rigitone, 2026.

Acústica Geométrica e Estimativa de Parâmetros

A propagação sonora foi modelada via acústica geométrica, utilizando o Método das Fontes Virtuais para o posicionamento dos refletores, e o Método do Traçado de Raios para a construção da resposta impulsiva da sala (Kuttruff; Vorländer, 2024; Rindel, 2001). Para a

simulação, que utilizou um *software* baseado em acústica previsional, a fonte sonora foi configurada com nível de potência sonora e diretividade específica por bandas de oitava, conforme detalhado nas Tabelas Tabela 2 e Tabela 3, com o intuito de obter mapas de pressão sonora (Kuttruff; Vorländer, 2024) em ambas as condições.

Tabela 2: Valores utilizados para o nível de potência sonora em bandas de 1/1 oitava.

Frequência [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Nível de potência sonora [dB(A)]	60	70	75	80	75	70	60	55

Tabela 3: Diretividade da fonte sonora.

Diretividade Horizontal	0° a 120°	120° a 240°	240° a 360°
Diretividade Vertical	-85° a 90°	-85° a 90°	-85° a 90°
Atenuação [dB(A)]	-11	0	-11

Embora os métodos de Eyring-Norris e Millington-Sette tenham sido calculados para fins de comparação, os parâmetros acústicos foram analisados primordialmente pelo método de Sabine, por ser a base de cálculo preconizada pela norma ABNT NBR 12179 para garantir a difusão sonora necessária em salas multiuso. O Tempo de Reverberação (TR_{60}) foi estimado pela Equação (1), apresentada a seguir, conforme consolidado por (Valle, 2009).

$$TR_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{(\sum S_i \cdot \alpha_i) + (4 \cdot m \cdot V)} \quad (1)$$

onde V é o volume total da sala [m^3], S_i é a área da i -ésima superfície [m^2], α_i é o i -ésimo coeficiente de absorção sonora e m é o coeficiente de absorção do ar.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A avaliação da qualidade acústica foi realizada comparando-se os cenários pré e pós-intervenção através de simulação computacional e previsão analítica.

Análise da Distribuição da Energia Sonora

As isocurvas de pressão sonora, mostradas na Figura 2, revelaram uma distribuição controlada do Nível de Pressão Sonora (NPS) após a implementação do tratamento, com uma reorganização da energia e melhoria na direcionalidade das reflexões em áreas distantes à fonte. Observou-se um decaimento nos níveis em certas regiões, consequência direta da introdução de materiais fonoabsorventes e da absorção parcial dos painéis refletores.

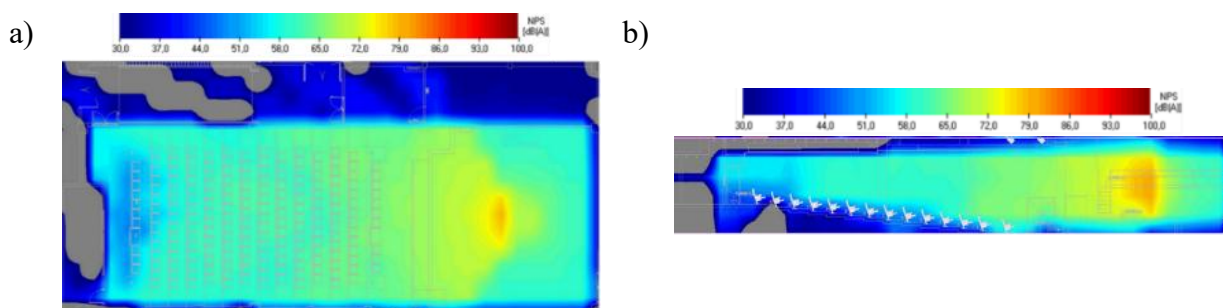


Figura 2: Isocurvas de pressão sonora simuladas para o auditório com o tratamento acústico. (a) Vista superior; (b) Vista lateral.

Comportamento do Tempo de Reverberação (TR_{60})

Houve uma redução significativa no TR_{60} em todas as faixas de frequência analisadas. Com a implementação das soluções acústicas, o TR_{60} médio obtido pelo método de Sabine foi reduzido de 2,231 s para 0,914 s. Este resultado demonstra uma convergência satisfatória para a média ótima de 0,865 s recomendada pela NBR 12179 para o volume e uso específico do recinto, como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Tempo de reverberação teórico estimado e ótimo por banda de frequência.

Tempo de reverberação teórico – Sabine [segundos]							
Frequência	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Médio
TR (sem tratamento)	4,036	2,747	2,301	1,748	1,424	1,130	2,231
TR (com tratamento)	1,389	0,859	0,833	0,813	0,822	0,770	0,914
Tempo de reverberação ótimo para o ambiente (ABNT NBR 12179) [segundos]							
Frequência	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Médio
TR	1,200	0,944	0,800	0,768	0,768	0,720	0,865

Parâmetros de Clareza e Inteligibilidade

Os demais parâmetros acústicos fundamentados nos valores de TR_{60} de Sabine, mostrados na Tabela 5, evidenciaram melhorias substanciais na qualidade sonora.

Tabela 5: Comparação do Tempo Central, da Definição, da Distância Crítica, da Distância Limite e da Perda de Articulação da Fala com valores ótimos.

Tempo Central – TC [segundos]							
Frequência	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Médio
Sem tratamento	0,29	0,20	0,17	0,13	0,10	0,08	0,16
Com tratamento	0,10	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07
Ótimo	0,09	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06
Definição - D50 [adimensional]							
Frequência	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Médio
Sem tratamento	0,16	0,22	0,26	0,33	0,39	0,46	0,27
Com tratamento	0,40	0,56	0,57	0,58	0,57	0,60	0,53
Ótimo	0,44	0,52	0,58	0,60	0,60	0,62	0,55
Distância Crítica [metros]							
Frequência	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Médio
Sem tratamento	1,52	1,84	2,01	2,31	2,56	2,87	2,04
Com tratamento	2,57	3,27	3,32	3,36	3,35	3,46	3,17
Ótimo	2,78	3,13	3,40	3,47	3,47	3,59	3,27
Distância Limite [metros]							
Frequência	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Médio
Sem tratamento	4,80	5,82	6,36	7,30	8,08	9,07	6,46
Com tratamento	8,13	10,34	10,50	10,63	10,57	10,92	10,02
Ótimo	8,78	9,90	10,75	10,97	10,97	11,33	10,34
Perda de Articulação da Fala [%]							
Frequência	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Médio
Sem tratamento	447,56	207,27	145,51	83,98	55,73	35,11	136,77
Com tratamento	53,75	20,55	19,32	18,40	18,80	16,52	23,28
Ótimo	39,82	24,64	17,70	16,31	16,31	14,34	20,71



O Tempo Central médio reduziu para 0,07 s (valor ótimo: 0,06 s), enquanto a Definição média aumentou para 0,53 (valor ótimo: 0,55), indicando uma maior proporção de energia útil nos primeiros 50 ms e, conseqüentemente, maior clareza.

A Perda de Articulação de Consoantes média sofreu uma redução expressiva para 23,28% (valor ótimo: 20,71%), o que sugere que a compreensão da fala foi significativamente facilitada.

Adicionalmente, o aumento da Distância Crítica média para 3,17 m (valor ótimo: 3,27 m) e da Distância Limite média para 10,02 m (valor ótimo: 10,34 m) refletem uma melhor cobertura e predominância do som direto no ambiente.

A estratégia de combinar painéis fonoabsorventes na parte posterior com refletores próximos ao palco demonstrou-se acertada para controlar reflexões tardias e uniformizar o campo sonoro útil.

CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou que a intervenção acústica proposta tem o potencial de otimizar significativamente a qualidade sonora da sala multiuso.

Os resultados simulados indicaram uma melhora substancial em parâmetros fundamentais, como a adequação do TR_{60} às normas técnicas e a otimização dos indicadores de clareza e inteligibilidade (Definição, Tempo Central e Perda de Articulação de Consoantes).

O aumento da Distância Crítica e da Distância Limite reforça que o tratamento alinhou o desempenho do auditório com as recomendações de literatura, validando a simulação computacional como uma ferramenta eficaz para o *design* e a tomada de decisão em projetos de condicionamento acústico.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12179: Tratamento acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro, 30 abr. 1992.

BISTAFA, Sylvio R. Acústica aplicada ao controle do ruído. 3. ed.: Blucher, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3382: Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces. Geneva, 2009.

KUTTRUFF, Heinrich; VORLÄNDER, Michael. Room Acoustics. 7. ed. Boca Raton: CRC Press, 2024.

RIGITONE. Product data sheets. , [S.d.]. Disponível em: <<https://www.rigitone.com/downloads/datasheets-products>>. Acesso em: 09 abr. 2026

RINDEL, Jens. The Use of Computer Modeling in Room Acoustics. Journal of Vibroengineering, v. 3, 12 fev. 2001.

SONEX. Nexacoustic Data Sheets. , [S.d.]. Disponível em: <<https://sonex.com.br/category-products/nexacoustic/>>. Acesso em: 09 abr. 2026

VALLE, Sólton do. Manual prático de acústica. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: MUSICA & TECNOLOGIA, 2009.