

## CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE SALA DE AULA POR MEIO DA RESPOSTA IMPULSIVA

BRUNO DOS SANTOS RODRIGUES<sup>1</sup>, MARLON CAIRES PAMPONET<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Graduado em Engenharia Elétrica, Professor Substituto, Curso de Engenharia Elétrica - UFOB, Bom Jesus da Lapa -BA, brunoeng1305@hotmail.com;

<sup>2</sup> Mestre em Ciências Ambientais, Engenheiro Eletricista, Professor da FAINOR, Vitória da Conquista - BA, marlon.pamponet@fainor.com.br

Apresentado no  
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC  
04 a 06 de outubro de 2022

**RESUMO:** O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema de medição da resposta impulsiva para caracterizar acusticamente uma sala de aula. Faz parte do escopo deste trabalho efetuar o tratamento dos dados obtidos pela utilização do programa *MATLAB*, calcular os parâmetros que caracterizam a acústica da sala e comparar os resultados dos parâmetros após uma intervenção acústica na sala. O método escolhido para análise da resposta impulsiva foi a varredura exponencial de senos (VES). Após uma intervenção acústica na sala, foram realizadas novas medições para fins de comparação e validação do método. A partir do desenvolvimento da pesquisa, foi possível quantificar os parâmetros objetivos propostos e validar a metodologia de implementação do sistema de medição, bem como discutir e comparar os dados antes e depois da intervenção acústica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Acústica de Salas, Parâmetros Acústicos, Resposta Impulsiva, Varredura Exponencial de Senos.

### CLASSROOM ACOUSTIC CHARACTERIZATION THROUGH IMPULSIVE RESPONSE

**ABSTRACT:** The present work aims to develop an impulse response measurement system to acoustically characterize a classroom. It is part of the scope of this work to perform the treatment of the data obtained by using the Matlab program, calculate the parameters that characterize the acoustics of the room and compare the results of the parameters after an acoustic intervention in the room. The method chosen for the analysis of the impulsive response was the exponential sweep of sines (VES). After an acoustic intervention in the room, new measurements were taken for the purpose of comparison and validation of the method. From the development of the research, it was possible to quantify the proposed objective parameters and validate the methodology for implementing the measurement system, as well as discuss and compare the data before and after the acoustic intervention.

**KEYWORDS:** Acoustic of Rooms, Acoustic Parameters, Exponential Sine Sweep, Impulsive Response.

### INTRODUÇÃO

No ambiente educacional, dois dos principais instrumentos de comunicação são a fala e a audição e, pelo fato de uma educação de alta qualidade ser essencial para qualquer universidade, os diferentes fatores que influenciam na fala e audição podem reduzir a eficiência da aprendizagem do aluno, principalmente daqueles que têm problemas de audição e ou estão estudando outra língua (GEORGE & YOUSSEF, 2012).

Considerando-se a importância da acústica de sala para palavra, é necessário o desenvolvimento de métodos que façam a análise do comportamento acústico desses recintos, visando o melhoramento da comunicação entre as pessoas.

Nesse contexto, o principal objetivo de simular ou medir a acústica de um ambiente é prever como este ambiente se comportará acusticamente (Torres, 2008). Com a análise da Resposta Impulsiva (RI), é possível apresentar soluções para melhoramento acústico de ambientes como teatros, auditórios, salas de aula, igrejas, estúdios de TV, rádio e gravação, salas de cinema, entre outros ambientes fechados.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa trata-se de um estudo de caso e tem como característica a aplicação de análise de sinais de áudio. Para a implementação do sistema de medição de resposta impulsiva, é necessário gerar um sinal senoidal a partir de um micro computador, por meio de um software de reprodução de áudio. O método escolhido para análise da resposta impulsiva foi a varredura exponencial de senos (VES), que tem demonstrado os melhores resultados, conforme o trabalho apresentado por Farina (2000).

Nesse método, o sinal passa pela interface de áudio e, posteriormente, é amplificado e emitido por um autofalante. Em seguida, um microfone capta o sinal no ambiente e o sinal é processado pela interface e armazenado no microcomputador. Após a aquisição do sinal, será calculada a média do sinal no domínio do tempo e da frequência.

Em seguida, após o processamento do sinal através do programa *MATLAB* para obtenção da RI, são aplicados filtros em bandas de oitavas para o cálculo dos parâmetros acústicos objetivos da sala por faixas de frequência.

As medições foram feitas conforme a norma ABNT NBR ISO 3382. A sala determinada para as medições foi a sala 23 do primeiro módulo da instituição de ensino Faculdade Independente do Nordeste - FAINOR, na cidade de Vitória da Conquista – Bahia.

Para a fonte sonora, foram utilizados dois monitores de referência com potência sonora de 64 W e ambos foram posicionados formando um ângulo de 180° um com o outro. Com o objetivo de tornar a propagação da fonte sonora mais próxima da omnidirecional, foi estabelecida uma segunda posição de fonte rotacionada 90° em relação a primeira posição. A altura da fonte sonora e do microfone em relação ao solo foi de 1,5m, como estabelece a norma.

O sinal para a excitação sonora da sala foi parametrizado com a variação exponencial de frequência de 20 Hz até 20 kHz, dentro do intervalo de tempo de 20 segundos.

De posse do sinal obtido através da média das gravações de cada ponto da sala, é aplicada a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transformer* – FFT) para gerar o espectro no domínio da frequência. Em seguida, o sinal é convoluído com um filtro inverso para obter a média do sinal da sala corrigida. Para encontrar a RI, é feita a Transformada Rápida Inversa de Fourier (*Inverse Fast Fourier Transformer* - IFFT) do sinal.

Após esse tratamento do sinal, é aplicado o banco de filtros para geração da RI separada por bandas de frequência e, em seguida, aplicada a Integração de Schroeder (IS) para encontrar as respectivas curvas de cada banda de frequência determinada, pois a partir da IS, é possível calcular os parâmetros acústicos de forma que o nível do ruído não interfira na energia do sinal e, consequentemente, não altere esses parâmetros de modo a inviabilizar a medição.

Paralelamente, outro método de caracterização acústica foi utilizado, com a finalidade de validar o sistema de medição VAS proposto: o método de Sabine (2008), o qual apresenta a relação empírica entre Tempo de Reverberação (TR), volume e absorção. O TR é o mais conhecido entre os parâmetros acústicos objetivos e o mais usado entre os estudiosos da Acústica Arquitetônica. Por esse motivo, para fins de comparação, foi aplicada a equação de Sabine segundo geometria da sala, como define a norma NBR 12179 (1992), que versa sobre tratamento acústico em recintos fechados.

O desenvolvimento do tratamento acústico buscou cumprir as determinações para o condicionamento acústico do recinto e do cálculo do tempo de reverberação.

Inicialmente, foi feito o estudo geométrico-acústico da sala, que reúne informações das áreas de todas as superfícies presentes na sala e o coeficiente de absorção de cada área composta pelos diversos tipos de materiais presentes no recinto. Chegou-se à conclusão de que seriam necessários 56,54 m<sup>2</sup> painéis de lã de vidro para que a sala obtivesse TR = 0,58 segundos na banda de 500 Hz. O cálculo não leva em consideração a quantidade de pessoas que podem estar dentro da sala, e esse fator é muito importante para diminuir o tempo de reverberação, visto que o coeficiente de absorção de uma pessoa é elevado se comparado com os materiais presentes numa sala de aula.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

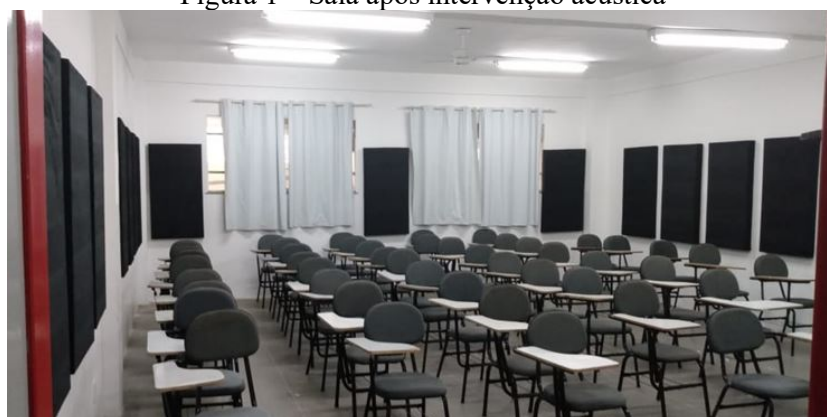
Através da Tabela 1 é possível observar os valores de C50 e C80 (clareza objetiva), D50 (definição sonora), Ts (tempo central), o EDT (tempo de decaimento inicial) e T30 e T60 (tempos de reverberação). Uma vez que o sistema da sala foi modificado pelo acréscimo de novos materiais absorventes (Figura 01), houve uma considerável melhora nos parâmetros acústicos do recinto (Tabela 2). Observou-se os valores dos novos parâmetros C50\_2, C80\_2, D50\_2, Ts\_2, EDT\_2, T30\_2, e T60\_2, calculados com a mesma metodologia.

Tabela 1 – Resultado dos parâmetros acústicos objetivos antes da intervenção – Medição 1

	62.3 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
C50 (dB)	-9,120	-9,282	-5,003	-10,534	-3,394	-3,323	-2,278	-0,539
C80 (dB)	-3,626	-5,732	-2,357	-0,387	-1,109	-0,341	-0,114	2,271
D50 (%)	10,909	10,552	20,021	32,038	31,397	31,751	37,177	46,898
Ts (ms)	216,38	270,35	216,04	142,55	124,69	123,76	108,53	81,29
EDT (s)	2,5714	4,4632	2,9417	2,1381	1,7842	1,8249	1,4851	1,1393
T30 (s)	2,8720	3,4228	3,4038	2,0839	1,6712	1,6165	1,4968	1,1435
T60 (s)	5,7440	6,8456	6,8076	4,1677	3,3424	3,2329	2,9935	2,2870

Fonte: autoria própria

Figura 1 – Sala após intervenção acústica



Fonte: autoria própria

Tabela 2. Resultado dos parâmetros acústicos objetivos após a intervenção acústica – Medição 2

	62.3 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
C50 2 (dB)	-8,184	-8,2342	-2,1676	-6,1334	2,4905	2,9630	3,0525	3,7799
C80 2 (dB)	-2,666	-4,645	1,187	6,091	5,784	6,483	6,348	7,717
D50 2 (%)	13,187	13,056	37,774	67,215	63,955	66,424	66,882	70,481
Ts 2 (ms)	181,60	175,26	106,09	51,72	50,92	45,85	47,68	41,26
EDT 2 (s)	1,9674	1,9812	1,6030	0,7862	0,5662	0,7120	0,6288	0,2577
T30 2 (s)	2,5458	2,0783	1,4328	0,9282	0,6535	0,6978	0,6650	0,5847
T60 2 (s)	5,0917	4,1567	2,8555	1,8564	1,3068	1,3957	1,3300	1,1694

No parâmetro Clareza Objetiva C50, foi possível observar que houve uma melhora de aproximadamente 6 dB na frequência de 2 kHz, na banda de 500 Hz a melhora foi em torno de 4 dB. Já nas baixas frequências, como em 125 Hz, o aumento da clareza foi pouco mais de 1 dB.

No caso do parâmetro C80, há uma melhora de 8 dB em relação ao nível de clareza anterior, também nas frequências médias e altas. Nas bandas baixas, como em 125 Hz, o nível de clareza não ultrapassa os 2 dB.

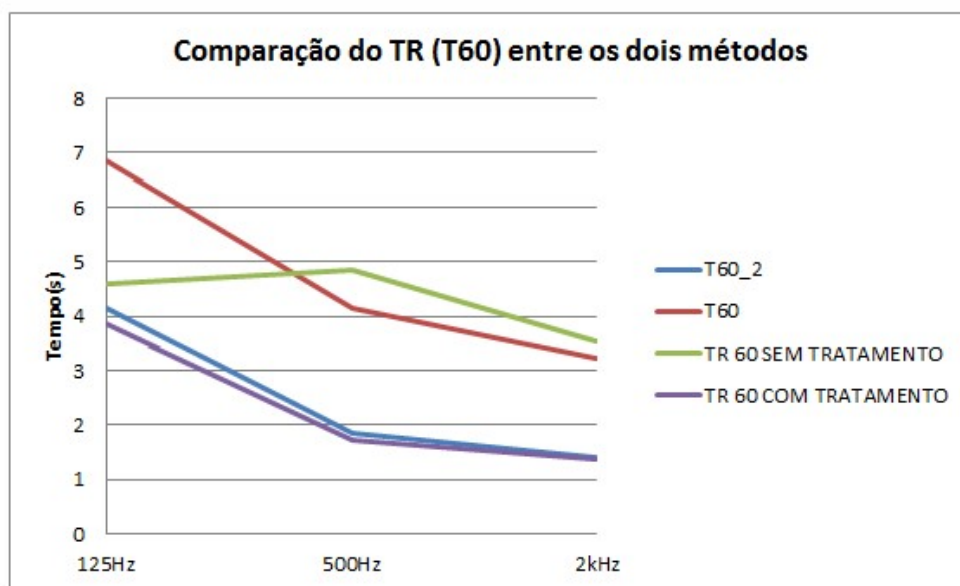
No parâmetro D50, observou-se o mesmo comportamento de baixo desempenho no melhoramento na banda de 125 Hz. É provável que esse fato esteja associado à escolha do material para o tratamento acústico. A lã de vidro, que por ser um material fibroso e não vibrante, possui maior coeficiente de absorção nas frequências médias e altas. Outro fato que pode contribuir é a resposta não linear do alto-falante, que em baixas frequências pode não responder linearmente.

A comparação entre o tempo central, antes e depois da intervenção, mostra uma diminuição significativa e proporcional a 100 ms, com exceção das frequências extremas, nas quais o Ts diminuiu em aproximadamente 40ms.

No caso do parâmetro EDT, é notável uma maior diminuição do tempo na banda de 125 Hz, ou seja, 2,5 ms menor após o tratamento da sala. Nos gráficos dos parâmetros T30 e T60, respectivamente, é observável o mesmo comportamento entre as curvas, pois o método de cálculo do T60 foi o método da extrapolação do valor de T30.

Na figura 2, observa-se o tempo de reverberação calculado por métodos diferentes, antes e depois da intervenção acústica na sala. Esse gráfico representa uma discrepância entre os valores de TR na banda de 125 Hz. Os demais valores apresentam correlação entre si e demonstram a eficácia da aplicação do método. Outro fator que chamou a atenção no gráfico da mesma tabela é a proximidade dos valores aferidos no tempo de reverberação T60 após efetuada a colocação dos painéis absorvedores acústicos.

Figura 2 – Comparação do T60 nos dois métodos diferentes (VAS e Equação de Sabine) antes e depois da intervenção acústica



Fonte: autoria própria

## CONCLUSÕES

Foram cumpridos todos os objetivos propostos nesse estudo de caso, principalmente em desenvolver um sistema de medição com os materiais disponíveis. Foi cumprido o desafio de efetuar o tratamento dos sinais no MATLAB, programa de extrema relevância na Engenharia Elétrica, bem como a validação do método VES comparando o sistema antes e depois da intervenção acústica na sala.

Com a análise dos resultados para os parâmetros abordados, constatou-se que as salas que possuem a mesma geometria, dentro da Faculdade Independente do Nordeste, estão abaixo da qualidade acústica mínima sugerida pela normatização, surge aí a necessidade de pensar em uma forma de melhorar a inteligibilidade de todas as salas, para que alunos e professores possam desfrutar de um ambiente acusticamente tratado.

## AGRADECIMENTOS

Agradecer à FAINOR por proporcionar toda estrutura necessária para a realização da pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- ABNT NBR ISO 3382-1:2017. **Acústica — Medição de parâmetros de acústica de salas**. Parte 2: Tempo de reverberação em salas comuns.
- Farina, Angelo. **Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion With a Swept – Sine Technique**. In: Journal of the Audio Engineering Society (abstracts), Vol.48, pp.350. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/277293870\\_Simultaneous\\_measurement\\_of\\_impulse\\_response\\_and\\_distortion\\_with\\_a\\_sweptsine\\_technique\\_Audio\\_Engineering\\_Society\\_Convention\\_108\\_Audio\\_Engineering\\_Society](https://www.researchgate.net/publication/277293870_Simultaneous_measurement_of_impulse_response_and_distortion_with_a_sweptsine_technique_Audio_Engineering_Society_Convention_108_Audio_Engineering_Society)>. Acesso em: 05 dez. 2019.
- George M, Youssef M. **Acoustical Quality Assessment of the Classroom Environment**; 2012.
- NBR 12179. **Tratamento acústico em recintos fechados**, 1992.
- Sabine, Wallace Clement Ware (1868-1919), físico americano, **Biográfico Enciclopédia de Cientistas**, 3rd Edição, p.667, EUA, 2008.
- Torres, Mario Henrique C. **Simulação acústica no ambiente AcMus**. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/45/45134/tde09092009103134/publico/torres2008saa.pdf>