

ANÁLISE DOS MODOS ACÚSTICOS E DAS ONDAS ESTACIONÁRIAS EM SALAS DE PEQUENAS DIMENSÕES APLICADAS A ESTÚDIOS DE GRAVAÇÃO: IMPACTOS NA GEOMETRIA ARQUITETÔNICA

SILVA, Paulo Gomes da

Trabalho de conclusão Pós-Graduação em

Engenharia e arquitetura acústica – Instituto NAVIGARE

19 de janeiro de 2026-Goiânia GO.

RESUMO

Este trabalho investiga a influência dos modos acústicos e das ondas estacionárias na geometria de salas pequenas destinadas a estúdios de gravação. Parte-se do princípio de que a distribuição modal afeta diretamente a qualidade sonora e deve ser considerada desde a fase de concepção do projeto. O estudo avalia a adequação dimensional de um estúdio de pequeno porte e propõe ajustes geométricos visando uma resposta acústica mais equilibrada. Trata-se de uma pesquisa baseada em estudo de caso com simulações modais segundo o critério de Bonello. Os resultados mostram que pequenas variações nas proporções da sala produzem efeitos relevantes na distribuição dos modos, impactando o comportamento das ondas estacionárias. Conclui-se que a aplicação de critérios modais no projeto arquitetônico é fundamental para melhorar o desempenho acústico e a qualidade sonora de estúdios de pequeno porte.

Palavras-chave: Modos acústicos. Ondas estacionárias. Critério de Bonello.

Estúdio gravação. Geometria arquitetônica.

ABSTRACT

This study investigates the influence of acoustic modes and standing waves on the geometry of small rooms intended for recording studios. It is based on the premise that modal distribution directly affects sound quality and should be considered from the early stages of the design process. The study evaluates the dimensional adequacy of a small-scale studio and proposes geometric adjustments aimed at achieving a more balanced acoustic response. This research is based on a case study using modal simulations according to the Bonello criterion. The results show that small variations in room proportions produce significant effects on modal distribution, impacting the behavior of standing waves. It is concluded that the application of modal criteria in architectural design is essential to improve the acoustic performance and sound quality of small recording studios.

Keywords: Acoustic modes; Standing waves; Bonello criterion; Recording studio; Architectural geometry.

1 INTRODUÇÃO

A qualidade acústica de estúdios de gravação em salas de pequenas dimensões está diretamente relacionada ao controle dos modos acústicos e das ondas estacionárias, que afetam de forma significativa a resposta sonora do ambiente. A geometria da sala exerce influência decisiva sobre a distribuição modal, podendo gerar irregularidades espectrais, especialmente nas baixas frequências.

Dessa forma, decisões geométricas tomadas ainda na fase de projeto arquitetônico impactam diretamente o desempenho acústico final. Métodos como o critério de Bonello permitem avaliar previamente a regularidade modal e orientar o dimensionamento de salas destinadas à gravação sonora.

Neste contexto, o presente artigo analisa a influência dos modos acústicos na definição da geometria arquitetônica de um estúdio de pequeno porte, demonstrando a importância da integração entre arquitetura e acústica para a obtenção de ambientes com melhor desempenho e qualidade sonora.

2 ONDAS ESTACIONÁRIA E MODOS

2.1 Acústica de Salas e Modos Acústicos

A acústica de salas estuda o comportamento do som em ambientes fechados, considerando fenômenos como reflexão, absorção, difusão e interferência. Em salas de pequenas dimensões, a resposta sonora é fortemente influenciada pelos modos acústicos, que correspondem às frequências naturais de ressonância do recinto. Esses modos são determinados pelas dimensões geométricas da sala e pelas condições de contorno impostas por suas superfícies.

Os modos podem ser classificados em axiais, tangenciais e oblíquos, conforme o número de superfícies envolvidas no percurso da onda sonora. Os modos axiais, que envolvem duas superfícies paralelas, são os mais energéticos e, portanto, os que mais afetam a resposta nas baixas frequências. A concentração ou sobreposição excessiva desses modos em determinadas bandas pode gerar irregularidades espectrais perceptíveis, como reforços e cancelamentos sonoros (VALLE, 2009, p.145).

2.2 Ondas Estacionárias em Salas Pequenas

Valle (2009) considera que as ondas estacionárias surgem da interferência entre ondas incidentes e refletidas, quando estas se propagam em sentidos opostos com a mesma frequência e comprimento de onda. Em salas pequenas, esse fenômeno é particularmente relevante nas baixas frequências, onde o comprimento de onda é comparável às dimensões do recinto.

Nessas condições, formam-se regiões de máxima pressão sonora (ventres) e mínima pressão (nós), distribuídas de forma fixa no espaço. A posição do ouvinte e das fontes sonoras em relação a esses pontos influencia

significativamente a percepção do som, podendo resultar em respostas muito diferentes dentro de um mesmo ambiente. Por isso, o controle das ondas estacionárias é essencial para garantir uniformidade e neutralidade sonora em estúdios de gravação.

2.3 Influência da Geometria na Distribuição Modal

A geometria da sala exerce papel central na definição da distribuição modal. Proporções inadequadas entre comprimento, largura e altura tendem a gerar coincidências modais, ou seja, múltiplos modos ocorrendo na mesma ou em faixas muito próximas de frequência. Esse acúmulo provoca picos na resposta e dificulta o controle acústico posterior por meio de tratamentos passivos.

FAZZIO (2010) relata que as relações geométricas ideais para salas pequenas, buscando uma distribuição mais regular dos modos ao longo do espectro. O objetivo é evitar concentrações excessivas em bandas específicas, principalmente nas baixas frequências, promovendo uma resposta mais uniforme e previsível. Dessa forma, o dimensionamento da sala deve ser entendido como uma estratégia preventiva de controle acústico.

2.4 Critério de Bonello e Regularidade Modal

Para Leo L. Beranek (2012)O critério de Bonello é um método gráfico utilizado para avaliar a distribuição dos modos acústicos por bandas de frequência. Segundo esse critério, a quantidade de modos por banda deve crescer de forma progressiva com o aumento da frequência, sem quedas ou estagnações significativas entre bandas consecutivas. Uma distribuição que atenda a esse princípio é considerada modalmente regular.

A aplicação do critério permite comparar diferentes proporções geométricas e verificar qual delas apresenta comportamento modal mais equilibrado. Trata-se de uma ferramenta prática para a fase de projeto, especialmente útil em salas de pequeno porte, onde o espaçamento entre modos é grande e os efeitos das ondas estacionárias são mais pronunciados.

2.5 Arquitetura e Acústica: Integração no Processo de Projeto

A integração entre arquitetura e acústica desde as etapas iniciais do projeto é fundamental para o desempenho final dos estúdios de gravação. Decisões

relativas à geometria, volumetria e proporções do espaço devem considerar não apenas aspectos funcionais e estéticos, mas também o comportamento físico do som.

Ao incorporar critérios modais no processo de concepção arquitetônica, é possível reduzir a necessidade de soluções corretivas posteriores e alcançar maior eficiência técnica e econômica. Assim, o projeto acústico deixa de ser apenas um complemento e passa a ser parte estruturante da arquitetura do ambiente.

3 METODOLOGIA

3.1 A metodologia adotada neste trabalho teve como ponto de partida a geometria arquitetônica do estúdio hipotético, cujas dimensões iniciais foram utilizadas como base para a avaliação do comportamento acústico do ambiente. A análise foi realizada por meio de simulações computacionais desenvolvidas em planilha eletrônica (Microsoft Excel) disponibilizada pela editora Música e Tecnologia de autoria de Sólon do Valle, na qual foram implementadas as equações de cálculo dos modos próprios da sala.

O objetivo principal da simulação foi investigar o impacto das dimensões geométricas na distribuição modal do estúdio, buscando identificar configurações dimensionais que proporcionassem uma distribuição mais homogênea das frequências modais, especialmente na região de baixas frequências, onde os efeitos das ondas estacionárias são mais críticos.

Para cada conjunto de dimensões — tanto o modelo inicial quanto as variações geométricas propostas — foram calculadas as frequências dos modos axiais, tangenciais e oblíquos até uma faixa limite pré-definida. Em seguida, os resultados foram organizados em bandas de frequência e avaliados segundo os critérios de Bonello, amplamente utilizados na análise modal de salas de pequenas dimensões.

3.2 Os critérios de Bonello aplicados foram:

Crescimento modal com a frequência

O número de modos por banda deve aumentar progressivamente com a frequência. Na pior hipótese, admite-se que esse número se mantenha constante, porém nunca deve diminuir à medida que a frequência aumenta.

Coincidência de modos

Caso existam dois modos coincidentes em uma mesma banda, devem existir pelo menos três modos não coincidentes adicionais na mesma banda para que a situação seja considerada aceitável.

Três ou mais coincidências

A ocorrência de três modos coincidentes em uma mesma banda é sempre considerada inaceitável, pois implica forte coloração sonora e irregularidade na resposta em frequência.

A partir da aplicação desses critérios, foram propostas modificações dimensionais na sala com o objetivo de melhorar o espaçamento modal, reduzir coincidências e favorecer uma resposta mais equilibrada do ambiente. Os resultados das simulações orientaram a escolha da geometria mais adequada do ponto de vista acústico, servindo como base para as etapas seguintes de projeto e tratamento do estúdio.

Tabela1: Dimensões das salas

	GEOMETRIA INICIAL	GEOMETRIA FINAL
COMPRIMENTO	4 metros	6 metros
LARGURA	3 metros	5 metros
ALTURA	2,9 metros	4 metros

Fonte: Autor,2026

3.3 Geometria inicial

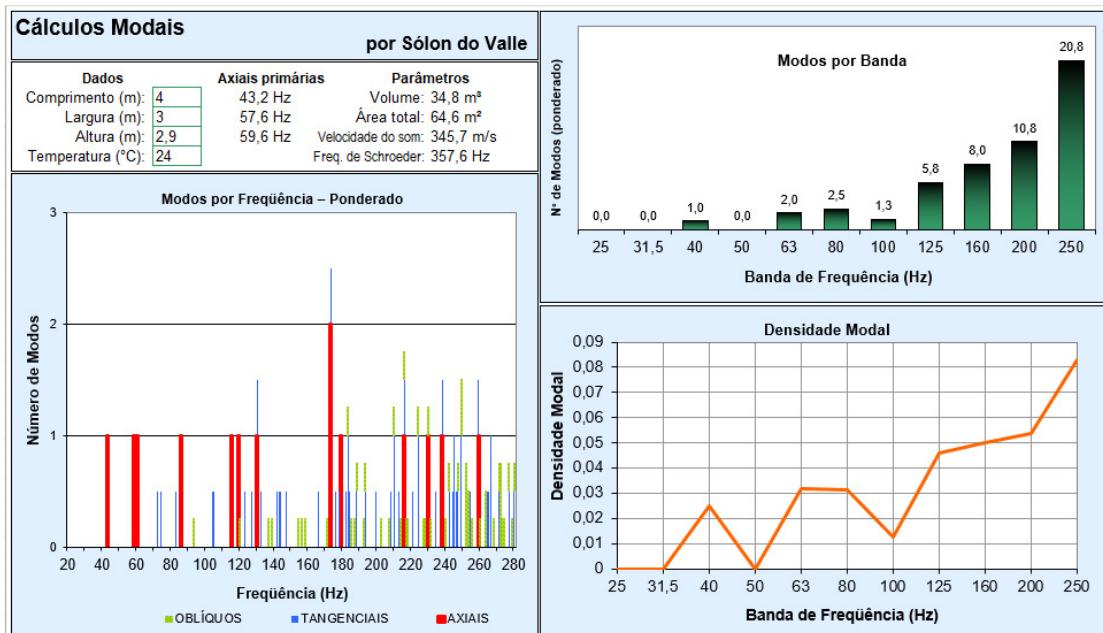


Figura 1: Resultados obtidos com uso planilha de autoria Sólón do Valle.

3.4 Geometria final como proposta

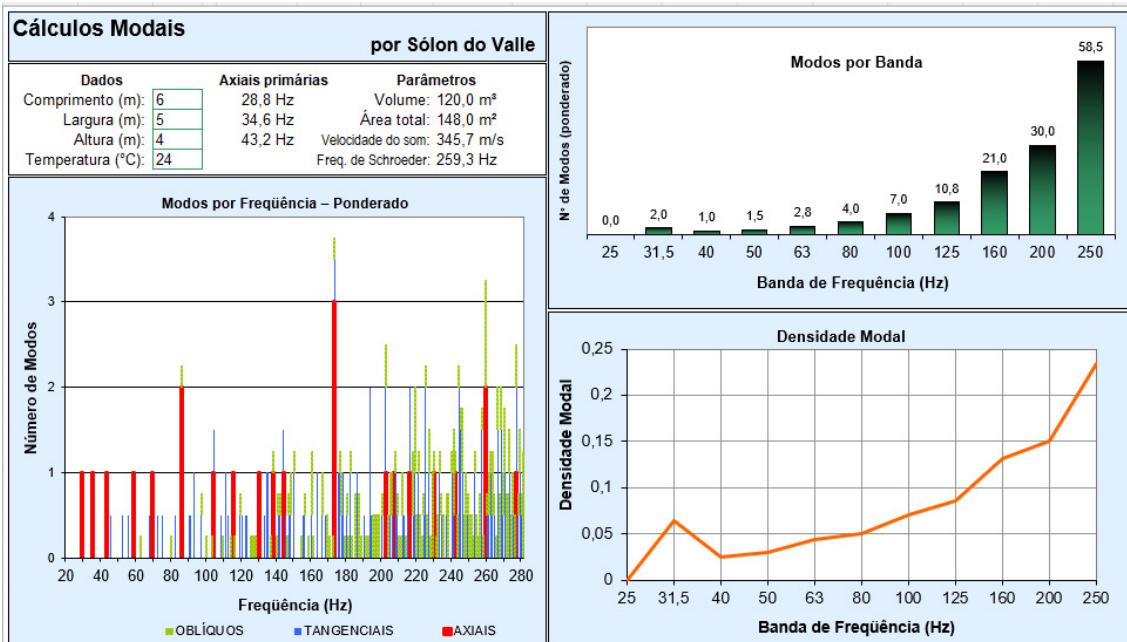


Figura 2: Resultados obtidos com uso planilha de autoria Sólón do Valle.

4 RESULTADOS E DISCUSÕES

A análise modal realizada a partir da geometria inicial do estúdio ($4,0\text{ m} \times 3,0\text{ m} \times 2,9\text{ m}$) evidenciou uma distribuição irregular dos modos acústicos, especialmente na faixa de baixas frequências. Os cálculos mostraram a presença de coincidências modais em determinadas bandas, bem como variações abruptas no número de modos por banda, contrariando o primeiro critério de Bonello, que exige crescimento progressivo com a frequência.

Observou-se que, na geometria inicial, alguns eixos apresentavam frequências modais muito próximas entre si, o que resulta em reforços excessivos e cancelamentos localizados no campo sonoro. Essa condição é típica de salas pequenas com proporções pouco favoráveis, nas quais a resposta em frequência se torna irregular e a percepção sonora depende fortemente da posição do ouvinte e das fontes.

A aplicação do critério de Bonello revelou, portanto, que a geometria inicial do estúdio não atendia de forma satisfatória aos requisitos de regularidade modal, apresentando bandas com estagnação ou até redução no número de modos, além de coincidências críticas.

Com base nesses resultados, foram propostas alterações dimensionais, resultando na geometria final de $6,0\text{ m} \times 5,0\text{ m} \times 4,0\text{ m}$. Essa nova configuração proporcionou uma redistribuição mais equilibrada dos modos acústicos ao longo do espectro. As simulações mostraram um crescimento mais regular do número de modos por banda, com redução significativa de coincidências e melhor espaçamento modal.

Na geometria final, o comportamento modal passou a atender de forma mais consistente aos critérios de Bonello, indicando uma resposta acústica mais previsível e homogênea. A maior volumetria também contribuiu para aumentar a densidade modal nas baixas frequências, reduzindo a percepção de picos e vales extremos.

Os resultados confirmam que pequenas alterações nas proporções geométricas da sala podem gerar impactos relevantes no comportamento

acústico, especialmente no controle das ondas estacionárias. Isso reforça a importância de considerar a acústica ainda na fase de concepção arquitetônica, evitando que problemas estruturais sejam corrigidos apenas com tratamento passivo posterior.

Assim, a geometria final proposta demonstra-se mais adequada para um estúdio de gravação, tanto do ponto de vista técnico quanto funcional, favorecendo uma resposta sonora mais equilibrada e condições mais consistentes para gravação e monitoração.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou que a distribuição dos modos acústicos e o comportamento das ondas estacionárias em salas de pequenas dimensões exercem influência direta sobre a qualidade sonora de estúdios de gravação. A partir da análise de um estúdio hipotético, verificou-se que a geometria arquitetônica é um fator determinante para o desempenho acústico do ambiente.

A aplicação do critério de Bonello mostrou-se uma ferramenta eficaz para avaliar a regularidade modal e orientar decisões de projeto. Os resultados evidenciaram que a geometria inicial apresentava inadequações significativas, com coincidências modais e irregularidades na distribuição de frequências. Por outro lado, a geometria final proposta apresentou comportamento modal mais equilibrado, atendendo de forma mais consistente aos critérios de regularidade.

Conclui-se que a integração entre arquitetura e acústica desde as etapas iniciais do projeto é fundamental para a obtenção de estúdios com melhor desempenho sonoro. A adoção de critérios modais no dimensionamento geométrico reduz a necessidade de soluções corretivas posteriores e contribui para ambientes mais eficientes, previsíveis e tecnicamente adequados.

Portanto, o estudo reforça que o projeto de estúdios de gravação deve considerar não apenas aspectos estéticos e funcionais, mas também os fundamentos físicos do som, utilizando ferramentas analíticas que permitam antecipar problemas e otimizar a qualidade acústica do espaço.

REFERÊNCIAS

BRANDÃO, Eric. **Acústica de Salas projeto e modelagem.** São Paulo, 2016

FAZZIO, Daniel Mancini. **Comportamento das baixas frequências em salas para uso musical:** acústica das edificações. São Paulo: Blucher, 2010.

MARROS, F. **Caracterização Acústica de Salas para Prática e Ensino Musical.** Santa Maria, 2011.Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 2011.
VALLE, Sólon do. **Manual prático de Acústica.** 3^a Edição. Rio de Janeiro: Música & Tecnologia, 2009.