

CONEM2026-0987

SÍNTESE ACÚSTICA DE CAMPOS DE PRESSÃO PARIETAL INDUZIDOS POR CAMADA LIMITE TURBULENTA

Clinton André Merlo, clintonmerlo@unifei.edu.br¹

Otávio Lage Dias, d2023011241@unifei.edu.br¹

Vinicius Gonçalves Pereira, d2022002883@unifei.edu.br¹

Rogério Fernandes Brito, rogbrito@unifei.edu.br¹

Carlos Henrique de Oliveira, carlos.henrique@unifei.edu.br¹

Paulo Mohallem Guimarães, pauloguimaraes@unifei.edu.br¹

Ricardo Luiz Perez Teixeira, ricardo.luiz@unifei.edu.br¹

Fábio Santos Nascimento, fabiosn@unifei.edu.br¹

Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva, metrevel@unifei.edu.br²

Júlio César Costa Campos, juliomcampos20@gmail.com³

Henrique Marcio Pereira Rosa, henrique.rosa@ufv.br³

Antônio Marcos de Oliveira Siqueira, antonio.siqueira@ufv.br³

¹Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Rua Irmã Ivone Drumond, 200, Itabira, MG, 35903-087, Brasil

²Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Av. BPS, 1303, Itajubá, MG, 37500-903, Brasil

³Universidade Federal de Viçosa (UFV), Av. Peter Henry Rolfs, s/n, Viçosa, MG, 36570-900, Brasil

Resumo: O estudo da interação entre escoamentos turbulentos e superfícies rígidas é central em aeroacústica, com impacto em aplicações aeroespaciais, automotivas e vibroacústicas. Os campos de pressão parietal gerados por camadas limite turbulentas (TBL) são estocásticos, de banda larga e com coerência espacial finita, atuando como mecanismo de excitação de painéis. Reproduzir tais campos em ambiente controlado é fundamental para avaliar a transparência acústica de painéis, desenvolver estratégias de isolamento e controle de ruído e validar modelos preditivos. Uma abordagem para essa reprodução é a síntese acústica de campos de pressão parietal por meio de arranjos de fontes controladas, nos quais sinais de ruído não correlacionados são processados por filtros modeladores projetados para gerar uma matriz de densidade espectral cruzada (CSD) que replica as propriedades estatísticas do campo alvo. Neste trabalho, o campo alvo é descrito pela combinação do modelo de Corcos, responsável pela coerência espacial da TBL, com o espectro semi-empírico de Efimtsov, que fornece a densidade espectral de potência (PSD). Nessa formulação, “síntese” significa reproduzir, no plano de observação, as estatísticas de segunda ordem associadas ao modelo Corcos-Efimtsov, sem reconstruir a física hidrodinâmica do escoamento. Investiga-se a síntese de campos de pressão parietal representativos de TBL empregando um arranjo de fontes acústicas posicionado diante de um painel rígido instrumentado com múltiplos microfones. A radiação acústica é simulada pelo Método dos Elementos Finitos no COMSOL Multiphysics®, utilizado na modelagem da geometria, das condições de contorno e na obtenção dos valores complexos de pressão sonora e da componente normal da velocidade de partícula nos pontos de medição. Pelo princípio da superposição, constroem-se as matrizes de pressão e velocidade de partícula associadas ao arranjo de fontes, a partir das quais se determina a matriz de transferência acústica e se extraem os Modos de Radiação Acústica (ARMs), definidos como autovetores da matriz que relaciona as velocidades das fontes à potência sonora radiada. Os ARMs são usados na regularização do problema inverso, restringindo o espaço de solução aos modos mais eficientes, reduzindo o esforço das fontes e melhorando a estabilidade numérica. A qualidade da síntese é avaliada por métricas que quantificam a fidelidade espectral, a preservação da coerência espacial e a velocidade média das fontes. Resultados numéricos indicam que o arranjo estudado é capaz de reproduzir, com concordância estatística, campos de pressão parietal compatíveis com o modelo Corcos-Efimtsov em faixas de frequência para aplicações vibroacústicas em painéis planos.

Palavras-chave: camada limite turbulenta, campos de pressão parietal, síntese acústica, filtros modeladores, modos de radiação acústica

1. INTRODUÇÃO

Este estudo investiga a viabilidade de sintetizar campos de pressão acústica aleatória, característicos de uma camada

limite turbulenta (TBL, *Turbulent Boundary Layer*), por meio de um arranjo plano de fontes acústicas simuladas numericamente no COMSOL *Multiphysics*®. Uma das principais aplicações dessa metodologia é a avaliação da transparência acústica de painéis submetidos a campos de pressão parietal estocásticos multidimensionais, como os produzidos pela TBL.

A síntese experimental ou numérica de campos acústicos com arranjos de fontes controladas é uma técnica amplamente consolidada na literatura, conforme demonstram Elliott et al. (2005), Bravo e Maury (2006), Maury e Bravo (2006), Merlo (2023) e Merlo et al. (2025). Nessa abordagem, sinais de excitação são gerados a partir de ruídos brancos não correlacionados e filtrados por filtros modeladores projetados para reproduzir a densidade espectral cruzada (CSD, *Cross Spectral Density*) característica da TBL.

A coerência espacial da pressão parietal induzida por TBL é descrita pelo modelo de Corcos (1964), enquanto a densidade espectral de potência (PSD, *Power Spectral Density*) é fornecida pelo modelo semi-empírico de Efimtsov (1982). A combinação Corcos–Efimtsov fornece, assim, uma base para representar as estatísticas de segunda ordem (PSD e CSD) do campo alvo. Devido à natureza estocástica do modelo de excitação, apenas propriedades estatísticas podem ser reconhecidas e analisadas.

A radiação acústica é simulada por um arranjo de fontes modeladas via Método dos Elementos Finitos no COMSOL, o que permite representar a geometria do sistema, as condições de contorno e a matriz de transferência acústica utilizada na síntese.

A formulação leva a um problema inverso, cuja solução pelo Método dos Mínimos Quadrados (MQ) pode ser mal condicionada, gerando amplitudes de fonte fisicamente inviáveis. Para mitigar esse problema, emprega-se regularização por Modos de Radiação Acústica (ARMs, *Acoustic Radiation Modes*), conforme Pasqual *et al.* (2010) e Merlo (2019). Os ARMs, definidos como autovetores da matriz que relaciona velocidades volumétricas das fontes e potência irradiada, formam uma base ortogonal de máxima eficiência de radiação; ao restringir a síntese aos modos mais eficientes, reduz-se o esforço das fontes e melhora-se a estabilidade numérica, com possível perda parcial de fidelidade em altas frequências.

A avaliação dos resultados é realizada por meio de métricas de controle que quantificam a fidelidade estatística do campo sintetizado em relação ao campo alvo gerado pela TBL. A análise conjunta dessas métricas permite equilibrar fidelidade estatística e viabilidade prática, com vistas a aplicações futuras com fontes reais.

2. METODOLOGIA

A abordagem segue a técnica de filtros modeladores (*shaping filters*), modelagem acústica numérica via FEM no COMSOL e regularização por Modos de Radiação Acústica (ARMs) para sintetizar, de forma estatística, campos de pressão parietal induzidos por camada limite turbulenta sobre painéis rígidos.

2.1 Campo Alvo e Filtros Modeladores

O objetivo da síntese é garantir que o campo sintetizado preserve as propriedades estatísticas do campo alvo, em particular sua matriz de densidade espectral cruzada $\mathbf{S}_{ww}$, obtida a partir do modelo clássico de Corcos

$$S_{ww}(\omega) = S_0(\omega) e^{-|r_x|/L_x(\omega)} e^{-|r_y|/L_y(\omega)} e^{-j\omega r_y/U_c} \quad (1)$$

onde $S_0(\omega)$ é a densidade espectral de potência, $L_x(\omega) = \alpha_x U_c/\omega$ e $L_y(\omega) = \alpha_y U_c/\omega$ são os comprimentos de correlação nas direções transversal e longitudinal, $|r_x|$ e $|r_y|$ são as separações espaciais, $\alpha_x = 1,2$ e $\alpha_y = 8$ são constantes empíricas para a camada limite turbulenta e $U_c = 0,7U_\infty$ é a velocidade de convecção da turbulência.

O espectro do campo de pressão alvo é descrito por $\mathbf{w} = \mathbf{D}\mathbf{x}$, em que $\mathbf{x}$ representa os sinais de referência de ruído branco não correlacionados, filtrados por uma matriz de moldagem $\mathbf{D}$. A matriz $\mathbf{D}$ é obtida a partir da decomposição espectral de $\mathbf{S}_{ww}$, isto é, $\mathbf{D} = \mathbf{Q}\mathbf{\Lambda}^{1/2}$ onde $\mathbf{Q}$ contém os autovetores e $\mathbf{\Lambda}$ os autovalores. Assim,

$$\mathbf{S}_{ww} = \mathbf{D}\mathbf{D}^H \quad (2)$$

2.2 Modelo Acústico e obtenção dos ARMs

A síntese é realizada por meio de um modelo acústico construído no COMSOL para um arranjo planar com $n = 25$ fontes igualmente espaçadas em um painel rígido quadrado de $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$ no plano xy , conforme mostrado na Fig. 1(a). O painel rígido de teste também é quadrado, com dimensões $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$, posicionado em $z = d$. Cada fonte é modelada como um cone com velocidade normal uniforme, representando um alto-falante circular de diâmetro $0,089 \text{ m}$.

Para avaliar as matrizes do modelo, são definidos $m = 900$ pontos de medição igualmente espaçados nos planos $z = d = 0,1 \text{ m}$ e $z = \tilde{d} = 0,095 \text{ m}$, conforme mostrado na Fig. 1(b). Além disso, nas quatro superfícies laterais, aplica-se uma condição de contorno de impedância acústica $Z = \rho_0 c$ (impedância característica do ar), com $\rho_0 = 1,21 \text{ kg/m}^3$ e $c = 343 \text{ m/s}$, para introduzir algum amortecimento e reduzir o acoplamento acústico interno e picos ressonantes muito

acentuados, conforme mostrado na Fig. 1(c). Finalmente, a malha FEM empregada possui cerca de 50100 elementos tetraédricos, garantindo pelo menos cinco elementos por comprimento de onda na faixa de frequências analisadas, conforme mostrado na Fig. 1(d).

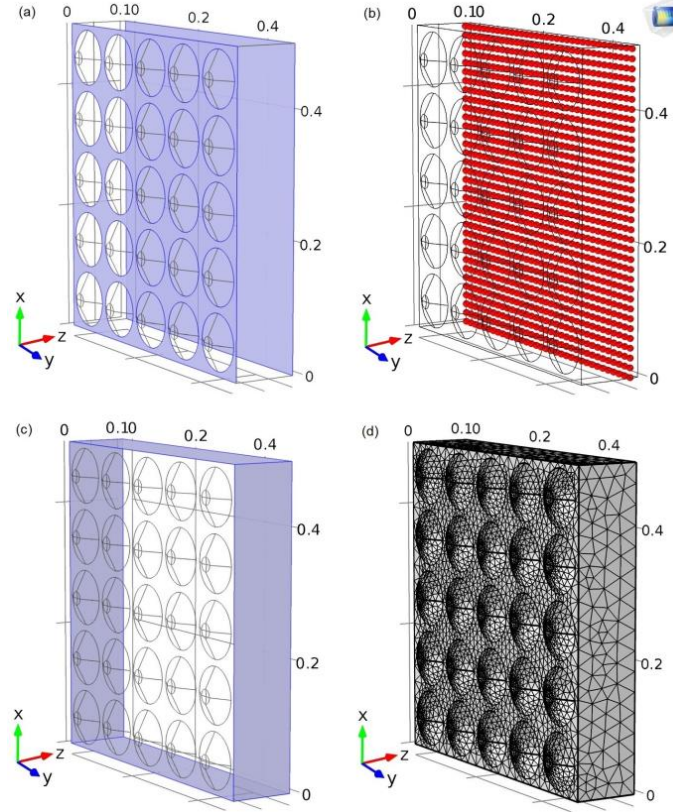


Figura 1. (a) Arranjo de fontes sonoras e painel rígido; (b) Arranjo dos pontos de medição; (c) Condição de contorno $\rho_0 c$ aplicada às superfícies que conectam os dois planos rígidos; (d) Malha do modelo acústico.

Fonte: autoria própria, 2026.

A construção das matrizes é realizada por meio do procedimento de excitação unitária fonte a fonte: para cada frequência analisada, cada fonte i é excitada individualmente com velocidade normal unitária (1 m/s), enquanto as demais permanecem desligadas. Para cada excitação, o FEM fornece a pressão acústica complexa e a componente normal da velocidade de partícula nos 900 pontos de medição. A coluna i da matriz $\mathbf{A}_z$ é formada pelas pressões medidas, enquanto a coluna i da matriz $\mathbf{B}_z$ é composta pelas velocidades de partícula correspondentes. Repetindo-se o procedimento para as 25 fontes, obtêm-se as matrizes completas de transferência de pressão e velocidade. Assim, os modelos lineares de pressão e velocidade de partícula são escritos como

$$\mathbf{A}_z \mathbf{q} = \mathbf{p}_z \quad (3)$$

$$\mathbf{B}_z \mathbf{q} = \mathbf{u}_z \quad (4)$$

onde $\mathbf{q}$ é o vetor de velocidade das fontes, $\mathbf{p}_z$ é o vetor das amplitudes do campo de pressão sonora resultante sobre a superfície de medição e $\mathbf{u}_z$ é o vetor da componente normal da velocidade de partícula nos pontos de medição. Como a velocidade normal é nula no painel rígido ($z = d$), a potência acústica é calculada em um plano próximo $z = \tilde{d} < d$. Nesse plano, adota-se uma dependência temporal harmônica $e^{j\omega t}$, a potência acústica complexa é aproximada por integração discreta na superfície de medição Ω :

$$\Pi_{\tilde{d}} \approx \frac{\Delta\Omega}{2} \mathbf{q}^H \mathbf{B}_{\tilde{d}}^H \mathbf{A}_{\tilde{d}} \mathbf{q} \quad (5)$$

e, portanto, a matriz de acoplamento de potência acústica é

$$\mathbf{W}_{\tilde{d}} = \frac{\Delta\Omega}{2} \mathbf{B}_{\tilde{d}}^H \mathbf{A}_{\tilde{d}} \quad (6)$$

Os ARMs ativos e reativos são calculados como autovetores das partes real e imaginária de $\mathbf{W}_{\tilde{d}}$, respectivamente, ordenados em função de suas eficiências (autovalores).

2.3 Síntese Estatística e Regularização por ARMs

No plano de observação $z = d$, o campo sintetizado é modelado como $\mathbf{y} = \mathbf{A}_d \mathbf{M} \mathbf{x}$, onde $\mathbf{M}$ é a matriz de filtros de controle que ajusta os sinais das fontes para aproximar $\mathbf{w}$. A densidade espectral do campo sintetizado é

$$\mathbf{S}_{yy} = \mathbf{A}_d \mathbf{M} \mathbf{M}^H \mathbf{A}_d^H \quad (7)$$

O erro entre o campo alvo e o sintetizado é definido como $\mathbf{e} = (\mathbf{D} - \mathbf{A}_d \mathbf{M}) \mathbf{x}$ e sua densidade espectral por

$$\mathbf{S}_{ee} = \mathbf{A}_d \mathbf{M} \mathbf{M}^H \mathbf{A}_d^H - \mathbf{A}_d \mathbf{M} \mathbf{D}^H - \mathbf{D} \mathbf{M}^H \mathbf{A}_d^H + \mathbf{D} \mathbf{D}^H \quad (8)$$

Minimizar o erro quadrático médio $J_e = \text{Tr}[\mathbf{S}_{ee}]$ garante que o campo sintetizado aproxime, em sentido estatístico, o campo alvo segundo o método dos mínimos quadrados. Impondo-se a condição de estacionariedade em relação à matriz de controle $\mathbf{M}$, obtém-se a solução ótima sem regularização (MQ)

$$\mathbf{M}_{ot} = (\mathbf{A}_d^H \mathbf{A}_d)^{-1} \mathbf{A}_d^H \mathbf{D} \quad (9)$$

Como o problema inverso é mal condicionado, especialmente em frequências e distâncias próximas de condições ressonantes, emprega-se regularização por ARMs. A formulação regularizada da síntese considera apenas os ARMs mais eficientes. Assim, o vetor de velocidade das fontes é decomposto como

$$\tilde{\mathbf{q}}^* = \tilde{\Psi}_{\tilde{d}} \tilde{\alpha}^* \quad (10)$$

onde $\tilde{\Psi}_{\tilde{d}}$ é a matriz modal reduzida formada pelos $\tilde{n}$ ARMs (ativos e reativos) mais eficientes, e $\tilde{\alpha}^*$ é o vetor das contribuições dos ARMs. Analogamente, a solução ótima com regularização (ARMs) é

$$\tilde{\mathbf{M}}_{ot} = (\tilde{\Psi}_{\tilde{d}}^H \mathbf{A}_d^H \mathbf{A}_d \tilde{\Psi}_{\tilde{d}})^{-1} \tilde{\Psi}_{\tilde{d}}^H \mathbf{A}_d^H \mathbf{D} \quad (11)$$

2.4 Métricas de Controle

O campo acústico sintetizado é avaliado por meio de três métricas complementares que quantificam a fidelidade espectral, a coerência espacial e a viabilidade física da reconstrução. Essas métricas são definidas e analisadas tanto para o caso sem regularização (MQ) quanto para o caso com regularização (ARMs).

2.4.1 Erro Quadrático Médio Normalizado

Quantifica a fidelidade espectral global, representando a parcela da energia total do campo alvo $\mathbf{S}_{ww}$ que está fora do espaço de síntese.

$$\hat{J}_e = \frac{\text{Tr}[(\mathbf{I} - \mathbf{A}_d \mathbf{A}_d^\dagger) \mathbf{S}_{ww}]}{\text{Tr}[\mathbf{S}_{ww}]} \quad (\text{MQ}) \quad (12)$$

$$\hat{J}_{\tilde{e}} = \frac{\text{Tr}[(\mathbf{I} - \mathbf{A}_d \tilde{\Psi}_{\tilde{d}} (\mathbf{A}_d \tilde{\Psi}_{\tilde{d}})^\dagger) \mathbf{S}_{ww}]}{\text{Tr}[\mathbf{S}_{ww}]} \quad (\text{ARMs}) \quad (13)$$

onde $\text{Tr}[\cdot]$ é a função traço, $\mathbf{A}_d^\dagger$ e $(\mathbf{A}_d \tilde{\Psi}_{\tilde{d}})^\dagger$ são as pseudo-inversas das matrizes $\mathbf{A}_d$ e $\mathbf{A}_d \tilde{\Psi}_{\tilde{d}}$, respectivamente. Critério prático: $\hat{J}_e < -10$ dB indica que menos de 10% da energia total do campo alvo está fora do espaço de síntese, o que caracteriza boa fidelidade.

2.4.2 Erro Residual

Indica o quanto da estrutura espacial do campo alvo é preservada pelo campo sintetizado, não apenas em termos de energia total (como em $\hat{J}_e$), mas também na forma como essa energia está distribuída espacialmente pelo campo.

$$\varepsilon_y = \frac{\|\mathbf{C}_{ww} - \mathbf{C}_{yy}\|_F}{\|\mathbf{C}_{ww}\|_F} \quad (\text{MQ}) \quad (14)$$

$$\varepsilon_{\tilde{y}} = \frac{\|\mathbf{C}_{ww} - \mathbf{C}_{\tilde{y}\tilde{y}}\|_F}{\|\mathbf{C}_{ww}\|_F} \quad (\text{ARMs}) \quad (15)$$

onde $\|\cdot\|_F$ é a norma de Frobenius, $\mathbf{C}_{ww}$, $\mathbf{C}_{yy}$ e $\mathbf{C}_{\tilde{y}\tilde{y}}$ são as matrizes de correlação espacial dos campos de pressão alvo e sintetizado. Critério prático: $\varepsilon_y < -1$ dB indica boa preservação da estrutura espacial.

2.4.3 Norma da Velocidade Quadrática Média

Quantifica o esforço total das fontes na reprodução do campo desejado, isto é, indica quanta energia as fontes precisam irradiar para gerar o campo de pressão alvo.

$$\|\bar{\mathbf{q}}^{*2}\| = \sqrt{\text{Tr}[\mathbf{A}_d^\dagger \mathbf{D} \mathbf{D}^H (\mathbf{A}_d^\dagger)^H]} \quad (\text{MQ}) \quad (16)$$

$$\|\bar{\tilde{\mathbf{q}}}^{*2}\| = \sqrt{\text{Tr}[\tilde{\Psi}_d (\mathbf{A}_d \tilde{\Psi}_d)^\dagger \mathbf{D} \mathbf{D}^H ((\mathbf{A}_d \tilde{\Psi}_d)^\dagger)^H \tilde{\Psi}_d^H]} \quad (\text{ARMs}) \quad (17)$$

Valores elevados sugerem risco de saturação, instabilidade ou não linearidade, além de maior sensibilidade ao ruído e ao mau condicionamento da matriz de transferência. Valores baixos — obtidos via ARMs — indicam uma síntese mais eficiente e estável, com menor esforço físico e numérico.

3. RESULTADOS NUMÉRICOS

Como a síntese é realizada em campo próximo, espera-se contribuição relevante dos modos reativos, além dos ativos. Assim, na regularização por ARMs, adotou-se $\tilde{n} = 16$, isto é, uma matriz modal reduzida $\tilde{\Psi}_d$ composta por 8 ARMs ativos e 8 ARMs reativos, selecionados dentre os 25 disponíveis em cada subespaço, ordenados por eficiência de radiação (autovalores), buscando um compromisso entre fidelidade do campo e robustez da solução.

Os principais critérios de amostragem espacial e de validade prática da síntese são avaliados para o modelo acústico implementado. O espaçamento centro a centro das fontes é $\Delta s_x = \Delta s_y = 0,5/(5 - 1) = 0,125$ m. Pelo critério acústico de lóbulos de grade, $\Delta s \leq c/(2f_{\max})$, obtém-se $f_{LG} \approx 343/(2 \times 0,125) = 1372$ Hz; portanto, na faixa investigada (até 400 Hz) o arranjo não é limitado por lóbulos de grade. Para os microfones, o passo é $\Delta x = \Delta y = 0,5/(30 - 1) = 0,01724$ m. Para verificar o *aliasing* espacial no campo TBL modelado por Corcos, adota-se o critério conservador $\Delta \leq L/2$, em que $L_x(\omega) = \alpha_x U_c / \omega$. Assim, o limite em x (*spanwise*) é estimado por $f_{\lim,x} = (0,5 \alpha_x U_c) / (2\pi \Delta x)$ com $\alpha_x = 1,2$ e $U_c = 0,7 U_\infty = 0,7 c \text{Mach}$ ($c = 343$ m/s). Substituindo, obtém-se $f_{\lim,x} \approx 930$ Hz para Mach 0,7 e 1200 Hz para Mach 0,9. Na direção y (*streamwise*), calcula-se de forma análoga com $\alpha_y = 8$ e verifica-se também o limite de Nyquist convectivo $f_{\lim,y} = U_c / (2\Delta y)$; em ambos os casos, os limites em y são superiores aos de x . Assim, a malha 30×30 é segura para a análise até 400 Hz sob o ponto de vista do *aliasing* espacial dos sensores. Por outro lado, a fidelidade da coerência transversal do campo TBL é restrita pelo critério hidrodinâmico/estatístico (2,1 fontes por comprimento de correlação transversal), $\Delta s_x \leq L_x(f)/2,1$, com $L_x(f) = \alpha_x U_c / (2\pi f)$. Para o caso mais restritivo (Mach 0,7), resulta $f_{2.1} \approx \alpha_x U_c / [2\pi \times 2,1 \times \Delta s_x] \approx 122$ Hz; para Mach 0,9 obtém-se $f_{2.1} \approx 157$ Hz. Dessa forma, espera-se boa reprodução da coerência em baixas frequências e degradação progressiva, não necessariamente falha abrupta, para frequências superiores às calculadas.

A Fig. 1 mostra o erro quadrático médio normalizado $\hat{f}_e$, que quantifica a fidelidade espectral global entre o campo sintetizado e o campo alvo. Observa-se que o método de mínimos quadrados sem regularização (MQ) tende a apresentar menores valores de $\hat{f}_e$ ao longo da banda, pois explora todos os graus de liberdade disponíveis para projetar o campo alvo no espaço de síntese. Com o aumento da frequência, $\hat{f}_e$ cresce, indicando que componentes estatísticas do campo alvo se tornam progressivamente mais difíceis de representar, em virtude do encurtamento dos comprimentos de correlação e da necessidade de estruturas espaciais mais finas. Na solução regularizada por ARMs, observa-se que $\hat{f}_{\tilde{e}} > \hat{f}_e$, sobretudo em altas frequências, refletindo a restrição do espaço de solução a um subconjunto modal. Ainda assim, o método mantém desempenho compatível com a faixa vibroacústica de interesse.

A Fig. 2 apresenta o erro residual ε_y , métrica diretamente associada à preservação das estruturas de correlação espacial e, portanto, mais sensível do que $\hat{f}_e$ a desvios de fase e de coerência convectiva. Em baixas frequências, ambos os métodos reproduzem adequadamente a coerência do campo alvo, ao passo que ε_y aumenta com a frequência, evidenciando perda

gradual na reprodução de correlações de menor escala. O MQ mantém, em geral, melhor concordância, enquanto a regularização por ARMs antecipa a degradação em frequências mais elevadas, o que é consistente com a interpretação física do truncamento modal: modos menos eficientes (frequentemente associados a padrões espaciais mais complexos) são descartados em favor de robustez numérica e viabilidade prática.

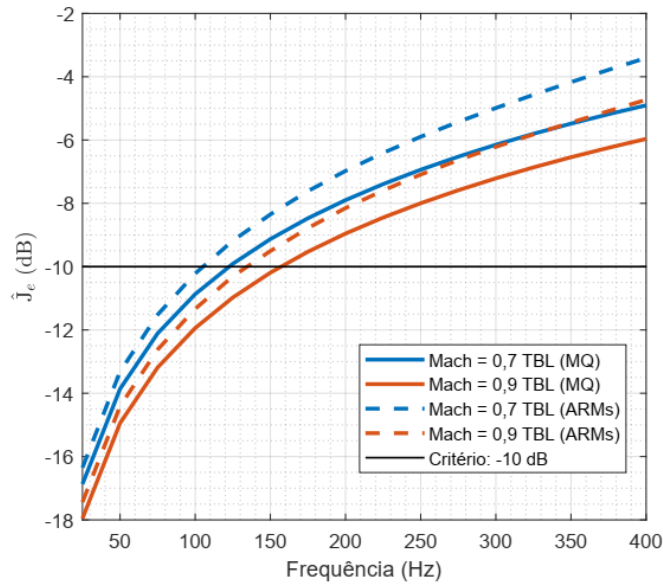


Figura 1. Erro quadrático médio em função da frequência para dois números de Mach.
Fonte: autoria própria, 2026.

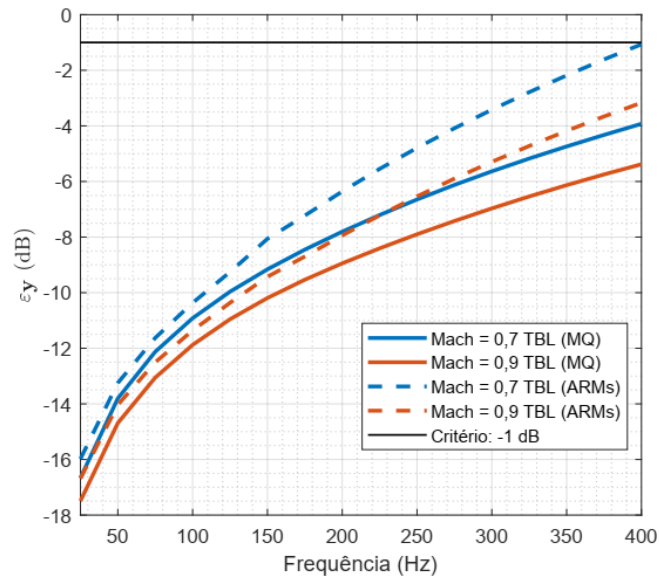


Figura 2. Erro residual em função da frequência para dois números de Mach. Fonte: autoria própria, 2026.

A Fig. 3 detalha as superfícies de correlação espacial do campo TBL para Mach 0,9 em três frequências representativas. O campo alvo apresenta padrões mais suaves em baixa frequência e maior complexidade espacial conforme a frequência aumenta, em decorrência da redução de L_x e L_y . A síntese por MQ reproduz com boa concordância a forma global e a tendência convectiva do campo teórico, especialmente nas menores frequências. A síntese por ARMs preserva a coerência dominante em baixa frequência, porém evidencia suavização e perda de detalhes espaciais à medida que a frequência aumenta, coerente com a limitação do espaço modal e com o critério $2,1/L_x$, que antecipa a redução da banda de coerência transversal reproduzível pelo arranjo 5×5 .

Por fim, a Fig. 4 apresenta a norma da velocidade quadrática média das fontes, métrica relacionada ao esforço físico/energético da síntese. Observa-se que o MQ demanda maior esforço, evidenciando a sensibilidade do problema inverso e o papel do mau condicionamento da matriz de transferência em amplificar componentes pouco eficientes. Em contrapartida, a regularização por ARMs reduz sistematicamente o esforço ao restringir a solução aos modos de radiação

mais eficientes de $\Re\{\mathbf{W}_d\}$ e $\Im\{\mathbf{W}_d\}$, produzindo respostas mais estáveis e plausíveis para implementação experimental, ainda que com alguma perda de fidelidade nas frequências mais altas.

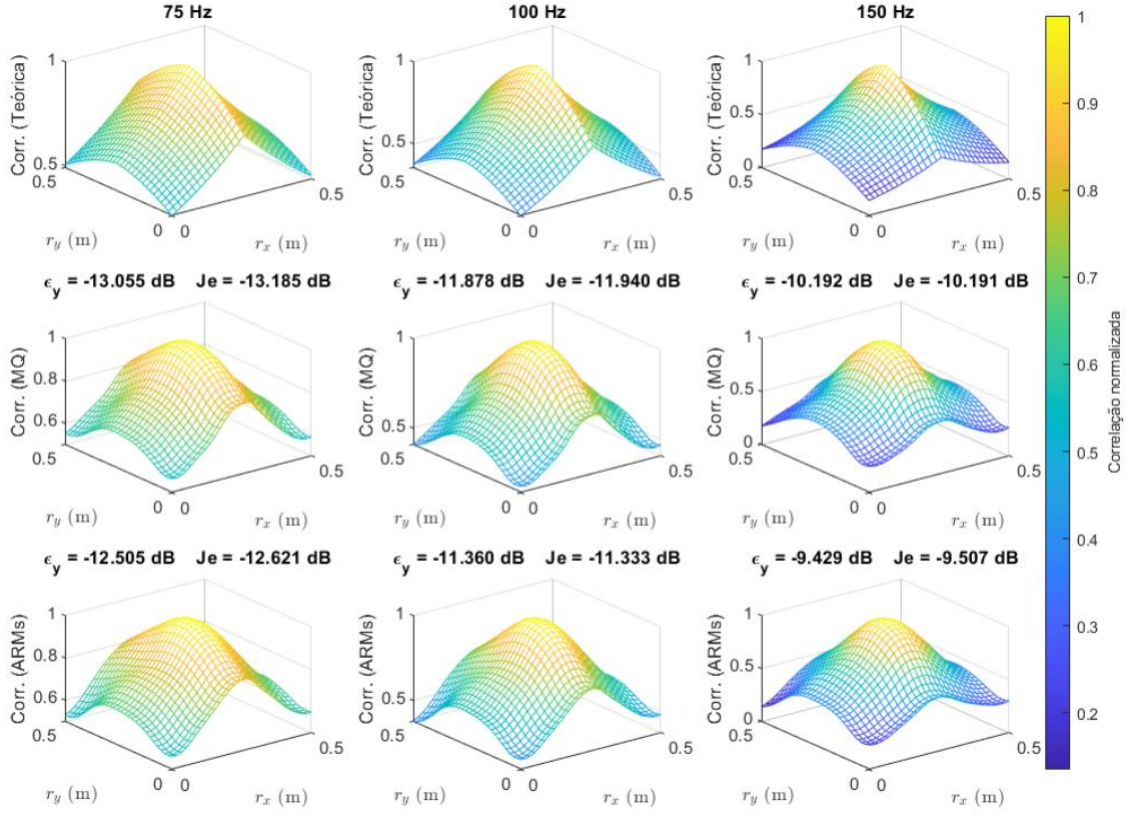


Figura 3. Estruturas de correlação espacial para a reprodução teórica do campo alvo em Mach 0,9 (topo), para o campo sintetizado sem regularização pelo método MQ (meio) e com regularização por ARMs (base).
Fonte: autoria própria, 2026.

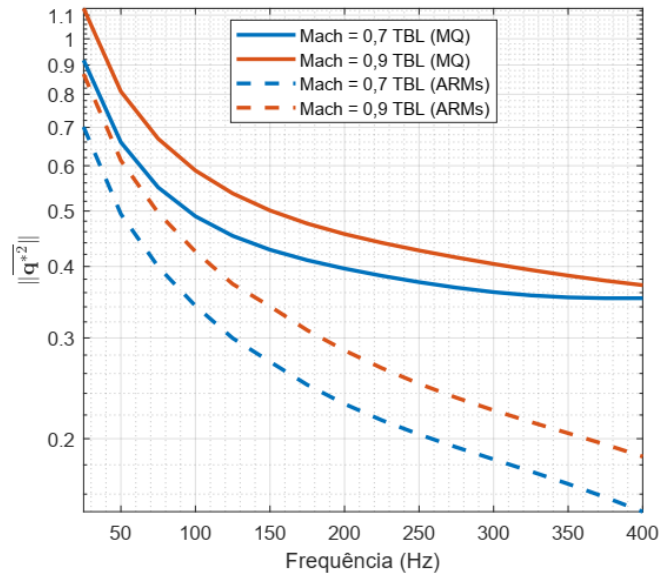


Figura 4. Norma da velocidade quadrática média em função da frequência para dois números de Mach.
Fonte: autoria própria, 2026.

Em síntese, as Fig. 1–4 mostram que o critério acústico de lóbulos de grade não é limitante na banda analisada e que a malha de medição é segura em relação ao *aliasing* espacial até 400 Hz. A principal restrição estatística decorre do encurtamento de L_x , o que justifica a degradação progressiva das métricas de coerência com o aumento da frequência e reforça a necessidade de regularização por ARMs para viabilizar soluções estáveis com menor esforço físico e numérico.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho investigou a viabilidade de sintetizar campos de pressão parietal induzidos por camada limite turbulenta sobre um painel rígido de teste, tomando como campo alvo o modelo de Corcos e empregando a técnica de filtros modeladores associada a um modelo acústico numérico via FEM. Considerou-se um arranjo planar de 25 fontes e 900 pontos de medição para construção das matrizes de transferência e, a partir da matriz de acoplamento de potência, a extração dos modos de radiação acústica. As verificações de amostragem indicam que, para a faixa analisada (até 400 Hz), o arranjo não é limitado por lóbulos de grade e a malha de medição é adequada quanto ao *aliasing* espacial; por outro lado, a reprodução da coerência transversal do campo TBL torna-se progressivamente mais restrita com o encurtamento do comprimento de correlação L_x , estabelecendo um limite prático de banda coerente associado à densidade de fontes na direção transversal.

Os resultados numéricos confirmaram o comportamento esperado das duas formulações de controle. A solução sem regularização apresentou maior fidelidade estatística, com menores valores do erro quadrático médio normalizado e melhor preservação das estruturas de coerência espacial, sobretudo em baixas frequências. Entretanto, evidenciou a sensibilidade do problema inverso e o risco de esforços elevados devido ao mau condicionamento da matriz de transferência. Em contraste, a regularização por ARMs produziu soluções mais estáveis e eficientes ao restringir a solução aos modos de radiação mais relevantes, ainda que com perda moderada de fidelidade nas frequências mais altas. Observou-se ainda que a norma da velocidade quadrática média pode ser reduzida à medida que se diminui o número de ARMs, porém essa redução é acompanhada por aumento dos erros, reforçando que a síntese sonora é governada por um compromisso inevitável entre fidelidade e viabilidade prática.

De forma geral, o principal desafio da síntese é determinar esse compromisso na forma de um conjunto adequado de restrições de projeto (por exemplo, erro máximo admissível, limite de esforço das fontes e banda de operação), definindo o subconjunto modal que melhor atende a uma aplicação típica. Como perspectivas, destacam-se: (i) investigar arranjos com maior densidade de fontes na direção transversal e/ou geometrias não uniformes para ampliar a banda coerente; (ii) estudar estratégias de seleção modal adaptativa com a frequência, balanceando erro e esforço; e (iii) avançar para validação com fontes reais e acoplamento vibroacústico do painel, visando aplicações em transparência acústica e controle de ruído.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC-UNIFEI) pela concessão da bolsa ao discente Otávio Lage Dias, vinculada ao projeto de pesquisa “PIA484-2024 — Síntese de campos de pressão estocásticos gerados pela camada limite turbulenta”, desenvolvido sob a orientação do Prof. Dr. Clinton André Merlo. Agradecem também à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), campus Itabira, pelo apoio institucional e pela disponibilização da infraestrutura necessária ao desenvolvimento desta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Bravo, T. and Maury, C., 2006. “The experimental synthesis of random pressure fields: methodology”. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 120, No. 5, pp. 2702–2711. <https://doi.org/10.1121/1.2354008>
- Corcos, G. M., 1964. “The structure of the turbulent pressure field in boundary-layer flows”. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 18, No. 3, pp. 353–378. <https://doi.org/10.1017/S002211206400026X>
- Efimtsov, B. M., 1982. “Characteristics of the field of turbulent wall pressure fluctuations at large Reynolds numbers”. *Soviet Physics Acoustics*, Vol. 28, pp. 289–292.
- Elliott, S. J., Maury, C. and Gardonio, P., 2005. “The synthesis of spatially correlated random pressure fields”. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 117, No. 3, pp. 1186–1201. <https://doi.org/10.1121/1.1850231>
- Maury, C. and Bravo, T., 2006. “The experimental synthesis of random pressure fields: practical feasibility”. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 120, No. 5, pp. 2712–2723. <https://doi.org/10.1121/1.2354005>
- Merlo, C. A., Pasqual, A. M. and Medeiros, E. B., 2019. “Sound field synthesis on flat panels using a planar source array controlled by its active and reactive radiation modes”. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 105, No. 1, pp. 139–151. <https://doi.org/10.3813/AAA.919295>
- Merlo, C. A., 2023. “Synthesis of the diffuse random pressure field using active and reactive radiation modes”. *Revista Contemporânea*, Vol. 3, No. 11, pp. 20849–20872. <https://doi.org/10.56083/RCV3N11-052>

- Merlo, C. A., Dias, O. L. and Brito, R. F., 2025. "Acoustic synthesis of random wall-pressure fields from turbulent boundary layers using monopole arrays and acoustic radiation modes". *Caderno Pedagógico*, Vol. 22, No. 13, pp. 1-21. <https://doi.org/10.54033/cadpedv22n13-024>
- Pasqual, A. M.; Arruda, J. R. F. and Herzog, P., 2010. "Application of acoustic radiation modes in the directivity control by a spherical loudspeaker array". *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 96, No. 1, pp. 32-42. <https://doi.org/10.3813/AAA.918253>

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

CONEM2026-0987

ACOUSTIC SYNTHESIS OF WALL-PRESSURE FIELDS INDUCED BY A TURBULENT BOUNDARY LAYER

Clinton André Merlo, clintonmerlo@unifei.edu.br¹
Otávio Lage Dias, d2023011241@unifei.edu.br¹
Vinicius Gonçalves Pereira, d2022002883@unifei.edu.br¹
Rogério Fernandes Brito, rogbrito@unifei.edu.br¹
Carlos Henrique de Oliveira, carlos.henrique@unifei.edu.br¹
Paulo Mohallem Guimarães, pauloguimaraes@unifei.edu.br¹
Ricardo Luiz Perez Teixeira, ricardo.luiz@unifei.edu.br¹
Fábio Santos Nascimento, fabiosn@unifei.edu.br¹
Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva, metrevel@unifei.edu.br²
Júlio César Costa Campos, juliomcampos20@gmail.com³
Henrique Marcio Pereira Rosa, henrique.rosa@ufv.br³
Antônio Marcos de Oliveira Siqueira, antonio.siqueira@ufv.br³

¹Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Rua Irmã Ivone Drumond, 200, Itabira, MG, 35903-087, Brasil

²Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Av. BPS, 1303, Itajubá, MG, 37500-903, Brasil

³Universidade Federal de Viçosa (UFV), Av. Peter Henry Rolfs, s/n, Viçosa, MG, 36570-900, Brasil

Abstract. *The study of the interaction between turbulent flows and rigid surfaces is central to aeroacoustics, with implications for aerospace, automotive, and vibroacoustic applications. Wall-pressure fields generated by turbulent boundary layers (TBLs) are stochastic, broadband, and exhibit finite spatial coherence, acting as an excitation mechanism for panels. Reproducing such fields in a controlled environment is essential for evaluating the acoustic transparency of panels, developing noise insulation and control strategies, and validating predictive models. One approach to this reproduction is the acoustic synthesis of wall-pressure fields by means of arrays of controlled sources, in which uncorrelated noise signals are processed by shaping filters designed to generate a cross-spectral density (CSD) matrix that replicates the statistical properties of the target field. In this work, the target field is described by combining the Corcos model, which accounts for the spatial coherence of the TBL, with the semi-empirical Efimtsov spectrum, which provides the power spectral density (PSD). In this formulation, "synthesis" means reproducing, at the observation plane, the second-order statistics associated with the Corcos–Efimtsov model, without reconstructing the hydrodynamic physics of the flow. The synthesis of wall-pressure fields representative of TBLs is investigated using an acoustic source array positioned in front of a rigid panel instrumented with multiple microphones. Acoustic radiation is simulated using the Finite Element Method in COMSOL Multiphysics®, which is employed to model the geometry and boundary conditions and to obtain the complex sound pressure values and the normal component of particle velocity at the measurement points. By the superposition principle, the pressure and particle-velocity matrices associated with the source array are constructed, from which the acoustic transfer matrix is determined and the Acoustic Radiation Modes (ARMs) are extracted, defined as the eigenvectors of the matrix relating source velocities to radiated sound power. The ARMs are used to regularize the inverse problem by restricting the solution space to the most efficient modes, reducing source effort and improving numerical stability. The quality of the synthesis is assessed using metrics that quantify spectral fidelity, preservation of spatial coherence, and mean source velocity. Numerical results indicate that the studied array is capable of reproducing, with statistical agreement, wall-pressure fields consistent with the Corcos–Efimtsov model over frequency ranges relevant to vibroacoustic applications involving flat panels.*

Keywords: *turbulent boundary layer, wall-pressure fields, acoustic synthesis, shaping filters, acoustic radiation modes*