



1º FÓRUM DE
ACÚSTICA
DA SOBRAC-CO
BRASÍLIA - DF

IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO PARA CONTROLE ATIVO DE RUÍDO TONAL EM DUTOS

Gabriela Cristina Cândido da Silva¹, Renato Vilela Lopes², Maria Alzira de Araújo
Nunes³, André Murilo de Almeida Pinto⁴

RESUMO: A exposição ao ruído ocupacional representa um relevante problema de saúde pública, especialmente em ambientes industriais com predominância de ruído tonal de baixa frequência. Nesse contexto, o Controle Ativo de Ruído (CAR) surge como alternativa às técnicas passivas tradicionais. Este trabalho apresenta a implementação de um controlador preditivo baseado em modelo (MPC) aplicado à atenuação de ruído tonal em dutos acústicos. A estratégia foi inicialmente validada em ambiente de simulação em tempo real e posteriormente implementada em uma bancada experimental. Resultados demonstram que o MPC atinge convergência rápida e elevada atenuação, validando a transição entre os ambientes numérico e experimental.

Palavras-chave: MPC, bancada experimental, simulação em tempo real.

INTRODUÇÃO

A exposição ao ruído ocupacional é um importante problema ambiental, com impactos relevantes à saúde pública (Zong et al., 2026), incluindo perda auditiva, zumbido e doenças cardiovasculares (Wang et al., 2026). No ambiente industrial, esse ruído é majoritariamente gerado por máquinas rotativas, produzindo excitações tonais de banda estreita (Shi et al., 2023), que apresentam alta perceptibilidade e contribuem para o desconforto acústico (Radosz, 2021). Em geral, esse som é propagado por dutos e tubulações, que podem favorecer a amplificação de determinadas frequências e ampliar a área de exposição.

Tradicionalmente, a mitigação do ruído em dutos é realizada por meio de técnicas passivas, como silenciadores e materiais absorventes (Haghighi et al, 2024). Entretanto, essas soluções apresentam desempenho limitado em baixas frequências, nas quais as dimensões físicas exigidas tornam sua aplicação frequentemente inviável (Karami et al, 2024). Nesse contexto, o controle ativo de ruído destaca-se como uma alternativa eficaz, baseado na interferência destrutiva entre ondas sonoras.

O algoritmo Filtered-x Least Mean Squares (FXLMS) consolidou-se como a abordagem predominante em aplicações de CAR devido à sua simplicidade e baixo custo computacional. Contudo, sua incapacidade de lidar explicitamente com restrições operacionais, como limites de atuadores e faixas dinâmicas, representa uma limitação importante (Guo et al, 2024). Quando essas restrições são atingidas, o desempenho do sistema pode ser significativamente comprometido.

Nesse cenário, o controle preditivo baseado em modelo surge como uma alternativa promissora, uma vez que permite a incorporação explícita de restrições diretamente na

¹ Instituto Federal de Brasília (IFB), Professora, área de Segurança do Trabalho

² Universidade de Brasília (UnB), Professora, área de Eletrônica

³ Universidade de Brasília (UnB), Professora, área de Acústica e Vibrações

⁴ Universidade Federal de Lavras (UFLA), Professor, área de Controle e Automação

formulação do problema de controle. Apesar de seu potencial, a aplicação do MPC em sistemas acústicos ainda é limitada na literatura, especialmente em configurações envolvendo dutos acústicos e ruído tonal.

Diante disso, este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação experimental de uma estratégia de controle baseada em MPC aplicada ao controle ativo de ruído em dutos acústicos, com foco na viabilidade de implementação em tempo real.

METODOLOGIA

O CAR baseia-se na geração de um sinal secundário em oposição de fase ao ruído primário, de modo a promover a interferência destrutiva entre as ondas sonoras. Em dutos, essa estratégia envolve dois caminhos acústicos principais: o caminho primário (da fonte ao sensor de erro), o caminho secundário (do atuador ao sensor de erro).

O MPC é aplicado ao CAR utilizando um modelo matemático do caminho secundário para prever a evolução futura do sistema. A cada instante de amostragem, o controlador resolve um problema de otimização que minimiza uma função custo composta pelo erro de rastreamento e pelo esforço de controle ao longo de um horizonte de predição N . Esses termos são ponderados pelas matrizes Q_y e Q_u , que permitem ajustar o compromisso entre o desempenho de atenuação do ruído e a suavidade do sinal de controle, influenciando diretamente o comportamento dinâmico do sistema.

Nesse trabalho, foi adotada a formulação clássica de MPC apresentada por Alamir (2013), na qual o ruído primário é tratado como uma referência a ser seguida ao longo do horizonte de predição. Essa abordagem reduz a dimensionalidade do problema de otimização, contribuindo diretamente para a viabilidade de implementação em tempo real. Detalhes adicionais dessa estratégia podem ser encontrados em Silva (2026).

Para a implementação do controlador, torna-se necessário obter modelos matemáticos representativos dos caminhos acústicos. A identificação dos caminhos primário e secundário foi realizada de forma offline no MATLAB, por meio de excitação com ruído branco. Modelos em espaço de estados de ordem $n=40$ foram selecionados por apresentarem o melhor compromisso entre fidelidade na representação da dinâmica e custo computacional associado.

As simulações foram realizadas no MATLAB/Simulink em modo Desktop Real-Time, com frequência de amostragem de 2,4 kHz, em um computador dedicado à execução em tempo real, equipado com processador Intel Core i7-11700 (2,50 GHz) e 16 GB de memória RAM, operando sob o sistema Windows 10 Pro. O controlador foi implementado via S-function em C, incluindo um solucionador de programação quadrática. O horizonte de predição foi definido como $N=40$, e os pesos foram ajustados via otimização por algoritmo genético.

A validação experimental foi realizada na bancada de controle ativo do LabNVH/UnB, composta por um duto de PVC de 3,50 metros, conforme apresentada na Figura 1. O aparato utiliza microfones para detecção dos sinais de erro/referência e alto-falantes como atuadores. A distância entre o microfone de referência e o alto-falante de controle é de 1,75 m.



A aquisição e geração de sinais foram realizadas por meio de uma placa de aquisição de dados National Instruments PCIe-6323, responsável pela interface entre o sistema físico e o ambiente computacional, permitindo a leitura dos sinais dos microfones e o envio do sinal de controle ao atuador. A configuração adotada garantiu execução em tempo real, assegurando a sincronização entre aquisição, processamento e atuação, requisito fundamental para o desempenho adequado do sistema de controle ativo de ruído.



Figura 1: Bancada Experimental de Controle Ativo de Ruído do LabNVH - UnB.

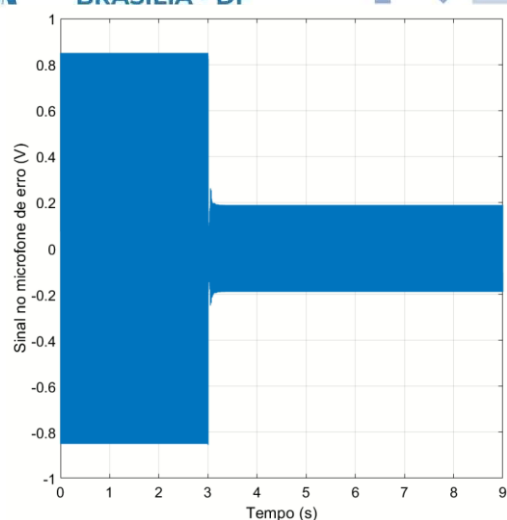
Para a implementação experimental, foi necessário reajustar os parâmetros do MPC devido às diferenças entre o modelo numérico e a dinâmica real. As matrizes de ponderação foram novamente sintonizadas por algoritmo genético diretamente na plataforma experimental, permitindo melhor adaptação às não idealidades do sistema e maior robustez em tempo real.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

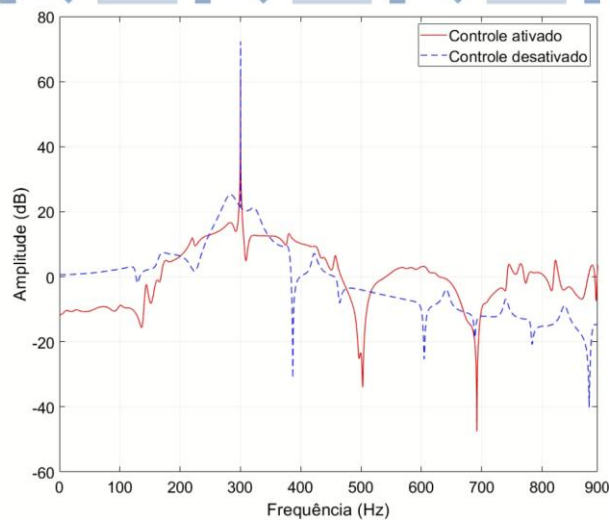
A validação da estratégia de controle proposta foi realizada por meio de excitações senoidais puras, com amplitude de 1 V, aplicadas na frequência de 300 Hz, escolhida como caso representativo do comportamento tonal do sistema. A avaliação de desempenho foi conduzida nos domínios do tempo e da frequência, utilizando como métricas o valor RMS do sinal de erro e a atenuação tonal obtida por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT).

A Figura 2 apresenta os resultados obtidos em simulação, considerando os parâmetros $Q_y = 40$ e $Q_u = 1$. O controlador MPC apresenta rápida convergência ao regime permanente, com redução eficaz do erro desde os instantes iniciais, levando o valor RMS de 0,609 para 0,145. No domínio da frequência, verifica-se atenuação significativa da componente tonal em 300 Hz, de 10,04 dB, sem geração de harmônicos indesejados, evidenciando desempenho consistente em regime permanente.

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos na bancada experimental, considerando os parâmetros ajustados para $Q_y = 100$ e $Q_u = 7,5$, os quais evidenciam comportamento consistente com a simulação. No domínio do tempo, o controlador mantém resposta rápida e estável, promovendo redução significativa do erro residual, com o valor RMS passando de 0,473 para 0,118. No domínio da frequência, observa-se atenuação expressiva da componente tonal em 300 Hz, de 10,11 dB, sem indícios de amplificação de frequências adjacentes ou geração de componentes indesejáveis.

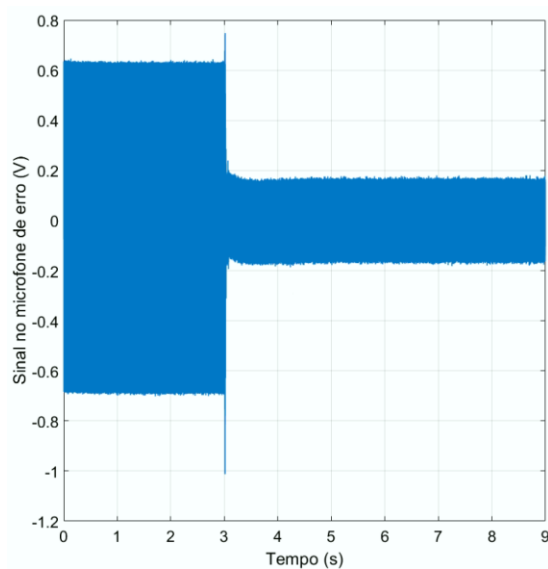


(a)

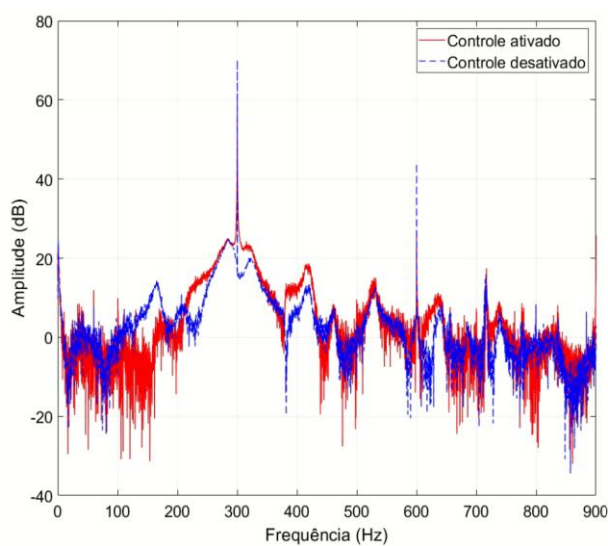


(b)

Figura 2 – Resultados da simulação numérica para excitação senoidal em 300 Hz: (a) sinal do microfone de erro no domínio do tempo; (b) espectro de frequência (FFT) com o controle desativado e ativado.



(a)



(b)

Figura 3 – Resultados experimentais para excitação senoidal em 300 Hz: (a) sinal do microfone de erro no domínio do tempo; (b) espectro de frequência (FFT) com o controle desativado e ativado.

De forma geral, os resultados demonstram forte concordância entre as implementações numérica e experimental, indicando que o modelo identificado representa adequadamente a dinâmica do sistema. A implementação em ambiente Simulink, operando em tempo real, mostrou-se uma etapa fundamental para a validação prévia da estratégia de controle, permitindo sua transição segura para a plataforma experimental. Por fim, o bom desempenho observado confirma a viabilidade do uso do MPC em aplicações de controle ativo de ruído tonal.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a implementação numérica e experimental de um controlador MPC aplicado ao controle ativo de ruído tonal em dutos acústicos. Os resultados demonstraram que a estratégia é viável para operação em tempo real, apresentando desempenho consistente tanto em simulação quanto em ambiente experimental.

Como continuidade deste estudo, pretende-se investigar a incorporação explícita de restrições na formulação do MPC, explorando seu potencial completo em aplicações práticas de controle ativo de ruído.

REFERÊNCIAS

ALAMIR, M. A. **Pragmatic story of model predictive control: self-contained algorithms and case-studies**. [S. l.]: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013.

HAGHIGHI, M.; MIRZAEI, R.; PUTRA, A. *et al.* A comprehensive review of advances and techniques in muffler acoustics and design. **International Journal of Environmental Science and Technology**, [S. l.], v. 21, p. 8695–8716, 2024.

KARAMI, F.; SHOKRI RAD, M.; KARIMIPOUR, I. Review on attenuation methods of low-frequency noise in passive silencers. **Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control**, [S. l.], v. 43, n. 4, p. 1679–1695, 2024.

RADOSZ, J. Effects of tonal noise on workers' annoyance and performance. **Noise and Health**, [S. l.], v. 23, p. 117–127, 2021.

SHI, D.; LAM, B.; GAN, W. S.; CHEER, J.; ELLIOTT, S. J. Active noise control in the new century: the role and prospect of signal processing. **Inter-Noise and Noise-Con Congress and Conference Proceedings**, [S. l.], v. 268, n. 3, p. 5141–5151, 2023.

SILVA, G. C. C.; LOPES, R. V.; NUNES, M. A. A. *et al.* Constrained model predictive control for effective tonal noise attenuation in acoustic ducts. **International Journal of Dynamics and Control**, [S. l.], v. 14, p. 81, 2026.

WANG, Y.; MA, X.; HUANG, X. *et al.* Integrating environmental factors and genetic variants in machine learning to assess occupational noise impact on health. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [S. l.], v. 311, p. 119805, 2026.

ZONG, X. *et al.* Global, regional, and national burden of DALYs attributable to occupational risks, 1990–2021: trends and projections to 2030. **Social Science & Medicine**, [S. l.], v. 389, p. 118810, 2026.