

# Fusão de Sensores em Controle Ativo de Vibrações

Mateus Marin e Eduardo L. O. Batista

**Resumo**—Neste trabalho de pesquisa, uma nova abordagem para controle ativo de vibrações é apresentada. Essa abordagem baseia-se no uso de fusão de leituras de sensores de aceleração e rotação para tornar o esquema de controle ativo mais robusto ao posicionamento de sensores. Resultados experimentais demonstram o potencial da abordagem proposta.

**Palavras-Chave**—Controle Ativo, FxNLMS, Vibrações.

**Abstract**—In this work, a new approach for active vibration control is presented. Such an approach is based on the use of sensor fusion to combine acceleration and rotation readings in order to make the active control scheme more robust with respect to sensor positioning. Experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed approach.

**Keywords**—Active Control, FxNLMS, Vibration.

## I. INTRODUÇÃO

Vibrações em estruturas ou máquinas são frequentemente indesejadas, pois podem causar danos estruturais e também trazer riscos para operadores [1]. Como resultado, técnicas de controle de vibrações são comumente requeridas em diferentes situações práticas [2]. Dentre essas técnicas, as de controle ativo têm despertado um grande interesse em função dos esforços de controle poderem ser ajustados em tempo real, o que confere grande flexibilidade ao sistema de controle [2], [3]. No entanto, tais técnicas dependem do posicionamento dos sensores responsáveis por captar as vibrações [2]. Por exemplo, um sensor posicionado próximo a um nulo de deslocamento da estrutura irá captar sinais muito fracos de aceleração [2], inviabilizando o controle das vibrações [4].

Nas últimas décadas, avanços tecnológicos em sistemas microeletromecânicos (*MEMS - Micro-Electromechanical Systems*) têm levado ao desenvolvimento de unidades de medição inercial (*IMUs - Inertial Measurement Units*) de excelente qualidade e baixo custo. Um exemplo desse tipo de dispositivo é a IMU LSM6DS3 [5]. Tal IMU é capaz de fazer não só as medidas de aceleração tradicionalmente usadas em controle de vibrações, mas também medidas de rotação (com giroscópios).

O presente trabalho de pesquisa apresenta uma nova abordagem para controle ativo de vibrações mais robusta em relação a problemas advindos do posicionamento de sensores. A ideia por trás da abordagem proposta é explorar o acelerômetro e o giroscópio da IMU simultaneamente, via fusão de sensores (*sensor fusion*) [6]. Como resultado, um esquema eficiente é obtido, no qual o posicionamento de sensores em um nulo de deslocamento tem um impacto relativamente pequeno no funcionamento do algoritmo adaptativo de controle.

## II. IMPORTÂNCIA DO POSICIONAMENTO DE SENSORES

Como mencionado anteriormente, o posicionamento de um sensor (ou mesmo de um atuador) pode ter um impacto bastante significativo no desempenho de um sistema de controle

Mateus Marin e Eduardo L. O. Batista estão vinculados ao LINSE-Laboratório de Circuitos e Processamento de Sinais do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil (e-mails: mateusmarin99@gmail.com e eduardo.batista@ufsc.br). Mateus Marin é bolsista PIBIC/BIP/UFSC.

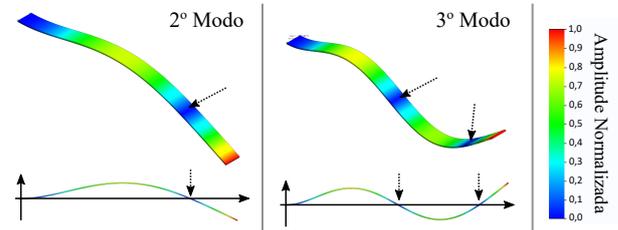


Fig. 1. Ilustração da segunda e terceira formas modais de uma viga engastada livre com nós destacados pelas setas pontilhadas.

ativo de vibrações [2]. Isso se deve ao fato que os modos de vibração de uma estrutura frequentemente possuem nós, que são regiões que apresentam deslocamento nulo mesmo o sistema estando sob um considerável nível de vibração. Para melhor entender esse aspecto, a Fig. 1 ilustra as formas modais, obtidas por simulação usando o software *SolidWorks*, para o segundo e terceiro modos de vibração de uma viga engastada livre com 61,5 cm de comprimento, 4 cm de largura e 3 mm de espessura [7]. A viga irá se movimentar de acordo com essas formas modais quando excitada por forças harmônicas próximas a 38 Hz (segunda frequência de ressonância) e 106 Hz (terceira frequência de ressonância). Nota-se, nessas formas modais, a presença de pontos de deslocamento nulo, os quais são indicados pelas setas pontilhadas na Fig. 1. Um acelerômetro colocado sobre esses pontos (ou em sua proximidade) irá produzir leituras nulas (ou muito pequenas) de aceleração. Nesse contexto, um controlador adaptativo será incapaz de realizar o controle ativo de forma adequada, uma vez que ele depende fortemente dessas leituras para realizar seu processo de aprendizado adaptativo [2].

## III. ABORDAGEM PROPOSTA

A possibilidade de utilizar medidas de rotação, proporcionada por IMUs como a LSM6DS3, abre novas perspectivas para o controle ativo de vibrações. Isso se deve ao fato que a rotação corresponde basicamente à derivada do deslocamento em função do espaço (i.e., em função da distância em relação ao engaste no caso da viga da Fig. 1). É fácil observar, a partir das formas modais apresentadas na Fig. 1, que, apesar dos nós apresentarem deslocamento nulo, a derivada espacial do deslocamento nesses pontos terá um valor bastante significativo. Em outras palavras, a rotação será bastante intensa nos nós, podendo então compensar a falta de informação de deslocamento em tais pontos. Nesse contexto, uma nova estratégia para controle ativo de vibrações é proposta no presente trabalho. Essa estratégia baseia-se no uso do acelerômetro em conjunto com o giroscópio, em um esquema de fusão de sensores, para contornar possíveis problemas de posicionamento. A proposta é usar um esquema de fusão complementar, onde as informações dos sensores são somadas após algum escalamento [6]. Assim, se o sinal do acelerômetro prevalecer, ele tenderá a ser usado para o controle, enquanto que, se o sinal do giroscópio prevalecer, ele tenderá a ser usado.

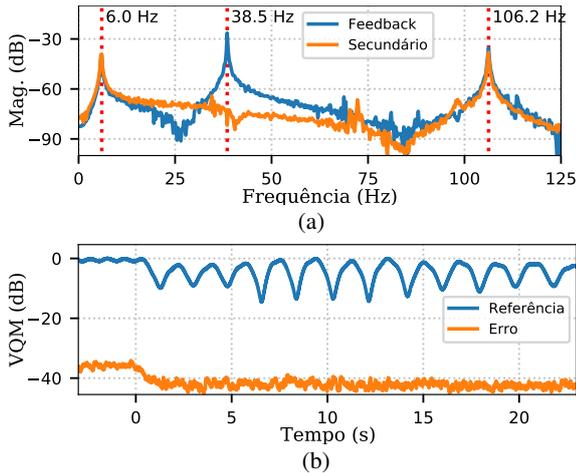


Fig. 2. Resultados obtidos usando acelerômetros: (a) caminhos secundário e de feedback; e (b) valores quadráticos médios de aceleração na posição de referência e na de erro.

#### IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção, resultados experimentais são apresentados visando demonstrar o potencial da técnica proposta. Esses resultados foram obtidos usando um sistema experimental similar ao usado em [3] e uma viga engastada livre de aço carbono com as mesmas dimensões da viga descrita na Seção II. Em tal sistema, um atuador magnético (posicionado a 20 cm do engaste) é usado para aplicar uma força de perturbação harmônica com frequência de 38 Hz, simulando um elemento externo que gera uma vibração indesejável. Um atuador similar é usado para controle (posicionado a 35 cm do engaste), o qual é controlado por um filtro adaptativo usando o algoritmo CVA-FxNLMS [3]. As IMUs de erro e referência foram posicionadas respectivamente a 40 cm e 48 cm do engaste, sendo que a IMU de erro está próxima de um ponto de nulo de deslocamento para o segundo modo (correspondente à frequência de ressonância próxima a 38,5 Hz). De maneira geral, os experimentos são iniciados aplicando a perturbação na viga, aguardando alguns segundos pela estabilização das vibrações, e então ligando o controle. Por conveniência, o instante  $t = 0$  indica o momento de acionamento do controle.

Os resultados obtidos usando somente os acelerômetros como sensores estão apresentados na Fig. 2. Na Fig. 2(a), tem-se as respostas em frequência obtidas para os caminhos de secundário (entre o atuador de controle e o sensor de erro) e de feedback (entre o atuador de controle e o sensor de referência). Esses caminhos foram obtidos em experimentos preliminares e são necessários para implementação do algoritmo adaptativo [3]. Nota-se, a partir das respostas em frequência de tais caminhos, que a modelagem do caminho secundário não identificou o pico da ressonância em 38,5 Hz, o que se deve ao posicionamento do sensor de erro perto de um nulo para o modo correspondente. As curvas de valores quadráticos médios (VQMs) da aceleração na posição de referência e de erro são apresentadas na Fig. 2(b). Dessas curvas, nota-se a ineficiência do controle ativo: apesar do sinal de erro apresentar valores muito baixos por estar em um ponto de nulo, o sinal de referência mostra como a vibração é intensa e não é reduzida significativamente pela atuação do controlador.

Os resultados experimentais obtidos usando a estratégia proposta (fusão de sensores com peso 0,5 para cada sensor)

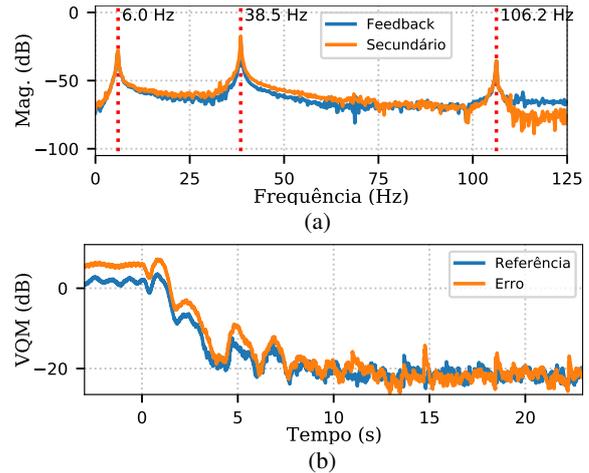


Fig. 3. Resultados obtidos usando fusão de sensores: (a) caminhos secundário e de feedback; e (b) valores quadráticos médios de aceleração na posição de referência e na de erro.

estão apresentados na Fig. 3. A partir das respostas em frequência dos caminhos secundário e de feedback mostrados na Fig. 3(a), nota-se que todos os três picos de ressonância foram identificados, em contraste com o caso usando somente acelerômetros. Além disso, a partir das curvas de valores quadráticos médios das saídas da fusão de sensores mostradas na Fig. 3(b), observa-se o excelente desempenho do algoritmo de controle, reduzindo os níveis de vibração em cerca de 20 dB em menos de 5 segundos. Esses resultados são comparáveis aos reportados em [3]. Vale ressaltar ainda que, por limitações de espaço, resultados obtidos apenas com os giroscópios não foram apresentados aqui. Esses resultados foram bastante similares aos obtidos com fusão de sensores. No entanto, o uso de fusão de sensores é mais vantajoso, pois: i) o custo computacional é praticamente o mesmo do uso apenas dos giroscópios; e ii) o sensor poderia estar colocado em um nulo de rotação (onde a derivada da curva de deslocamento é nula) e, nesse caso, o sinal do giroscópio seria praticamente nulo.

#### V. CONCLUSÕES

O presente trabalho foi dedicado ao desenvolvimento de uma nova abordagem para o controle ativo de vibrações. Nessa abordagem, fusão de sensores é utilizada para combinar leituras de aceleração e rotação de sensores de movimento. A partir dessa combinação, foi possível tornar o esquema de controle ativo adaptativo mais robusto ao posicionamento de sensores. Resultados experimentais demonstraram o potencial da abordagem proposta.

#### REFERÊNCIAS

- [1] S. S. Rao, *Vibrações Mecânicas*. Pearson Educação, 2009.
- [2] C. Hansen, S. Snyder, X. Qiu, L. Brooks, and D. Moreau, *Active Control of Noise and Vibration*, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012.
- [3] E. L. O. Batista, M. R. Barghouthi, and E. M. O. Lopes, "A novel adaptive scheme to improve the performance of feedforward active vibration control systems," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, 2021.
- [4] A. L. Soubhia and A. L. Serpa, "Discrete optimization for actuator and sensor positioning for vibration control using genetic algorithms," *Journal of Vibration and Control*, vol. 24, no. 17, pp. 4050–4064, 2018.
- [5] STMicroelectronics. (2022) iNEMO inertial sensors and modules. [Online]. Available: <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/inemotional-modules.html>
- [6] H. Mitchell, *Multi-Sensor Data Fusion*. Springer, 2007.
- [7] Dassault Systemes. (2022) SOLIDWORKS. [Online]. Available: <https://www.solidworks.com/>