

# Um Sistema Experimental de Código Aberto para Pesquisa em Controle Ativo de Vibrações

Eduardo L. O. Batista, Nicole Citadin, Mateus Marin, Maurizio R. Barghouti e Eduardo M. O. Lopes

**Resumo**—O presente trabalho é dedicado ao desenvolvimento de um sistema experimental para realização de atividades de pesquisa em controle ativo de vibrações por antecipação usando filtros adaptativos. O objetivo é obter um sistema de baixo custo e alta qualidade que possa ser reproduzido e aperfeiçoado com certa facilidade por outros pesquisadores. O desenvolvimento de tal sistema envolve escolha de componentes, projeto de placa de circuito impresso, desenvolvimento de firmware, projeto de uma estrutura experimental de referência, e também a elaboração de um software supervisor personalizado. Resultados experimentais são apresentados visando ilustrar a efetividade do sistema desenvolvido.

**Palavras-Chave**—Controle ativo de vibrações, filtragem adaptativa, FxNLMS.

**Abstract**—This work is dedicated to the development of an experimental system for research on feedforward active vibration control using adaptive filters. The goal is to obtain a low-cost yet high-quality system that can be easily reproduced and improved by other researchers. The development of such a system comprises component choice, design of a printed circuit board, firmware development, design of a reference experimental structure, and also the development of a personalized supervisory software. Experimental results are presented aiming to show the effectiveness of the developed system.

**Keywords**—Active vibration control, adaptive filtering, FxNLMS.

## I. INTRODUÇÃO

Em muitas aplicações práticas de engenharia, e especialmente nas industriais, o controle de vibrações é necessário para evitar o desgaste de estruturas ou componentes mecânicos, evitar perda de eficiência em maquinário, garantir a segurança de operadores, ou até mesmo para viabilizar processos de fabricação de precisão, como no caso dos semicondutores [1]. De maneira geral, o controle de vibrações pode ser realizado de forma passiva, tipicamente via a adição de materiais ou componentes que modifiquem parâmetros mecânicos do sistema, ou de forma ativa, i.e., a partir da aplicação de forças que produzam uma interferência destrutiva com as vibrações a serem controladas [2]. Essas duas formas de controle podem ser consideradas complementares, sendo frequentemente utilizadas em conjunto visando estabelecer esquemas híbridos de controle de vibrações [3]. O presente trabalho é dedicado à pesquisa em controle ativo de vibrações, área essa que tem atraído grande atenção nas últimas décadas [4].

De maneira geral, a realização de pesquisa experimental em controle ativo de vibrações requer o desenvolvimento de

aparatos experimentais integrando conhecimentos de diferentes áreas das engenharias elétrica e mecânica. É preciso, entre outras coisas: i) construir uma estrutura mecânica experimental; ii) realizar a aquisição de sinais de múltiplos sensores; iii) fazer a implementação de um algoritmo adaptativo de controle, no caso de controle por antecipação, o que é feito tipicamente em uma plataforma embarcada em tempo real; iv) fazer o acionamento de atuadores que possam aplicar um bom nível de esforço na estrutura experimental; e v) usar um software supervisor que permita monitorar experimentos e arquivar resultados. Algumas plataformas comerciais de hardware e software estão disponíveis para auxiliar em partes desse processo, como aquelas fornecidas pela National Instruments (software LabView [5] e plataformas de hardware como a CompactRIO [6]). Essas plataformas, apesar de suas extraordinárias qualidades, trazem algumas desvantagens e limitações, tais como custo elevado para aquisição e dificuldades para programação em baixo nível (muitas vezes necessária para implementação de algoritmos adaptativos de controle ativo). Além disso, tais plataformas costumam apresentar compatibilidade limitada com os componentes de baixo custo cada vez mais disponíveis com o crescimento da comunidade *maker* [7].

Visando contornar os problemas previamente descritos, o presente trabalho de pesquisa é dedicado ao desenvolvimento de um sistema de código aberto, com elevada qualidade e custo reduzido, para pesquisa em controle ativo de vibrações. Em função das muitas capacidades necessárias em tal aplicação, vislumbra-se o uso do sistema também para pesquisas em outras áreas envolvendo sinais de vibração, tais como o controle passivo ou híbrido, monitoramento da saúde de estruturas [8] e detecção de defeitos em máquinas rotativas [9], dentre outras. O desenvolvimento do sistema proposto envolve a definição de plataforma de hardware e sensores com custo acessível, o projeto de uma placa de circuito impresso personalizada, o desenvolvimento de um firmware próprio, além do desenvolvimento de um software supervisor. Adicionalmente, uma estrutura mecânica de referência é desenvolvida, visando facilitar a realização de ensaios de controle ativo de vibrações usando vigas engastadas livres e biengastadas. Resultados experimentais são apresentados, demonstrando a efetividade e características importantes do sistema desenvolvido.

O presente trabalho está organizado conforme descrito a seguir. Na Seção II, os requisitos gerais do sistema são expostos. A Seção III apresenta uma discussão acerca da escolha de componentes. Nas Seções IV, V, VI e VII, tem-se a descrição do desenvolvimento do sistema, envolvendo, respectivamente, placa de circuito impresso, firmware, estrutura mecânica e software personalizado. A Seção VIII traz alguns resultados experimentais obtidos com o sistema, enquanto que a Seção IX finaliza o trabalho com a apresentação das conclusões gerais.

Eduardo L. O. Batista, Nicole Citadin e Mateus Marin 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: eduardo.batista@ufsc.br, nicolecitadin0@gmail.com e mateusmarin99@gmail.com).

Maurizio R. Barghouti e Eduardo M. O. Lopes estão vinculados ao PGMec—Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil (e-mails: maurizio00999@gmail.com e eduardo\_lopes@ufpr.br).

## II. DEFINIÇÕES INICIAIS E REQUISITOS

Conforme mencionado na Introdução, o sistema desenvolvido é voltado principalmente para estudos em controle ativo de vibrações por antecipação. Nesse tipo de aplicação, um filtro adaptativo é utilizado para gerar forças de controle que interfiram destrutivamente com as vibrações presentes em uma estrutura, reduzindo assim os níveis gerais de vibração. A implementação de tal filtro tem um custo computacional relativamente alto, na ordem de milhares de operações aritméticas para cada período de amostragem dos sinais. É desejável também que tais operações aritméticas sejam feitas usando representação numérica em ponto flutuante, de forma a facilitar a implementação e garantir a precisão do algoritmo adaptativo. Além disso, de forma a permitir o trabalho com estruturas mecânicas em escala de laboratório e também com mais de um dos modos de vibração [10] dessas estruturas, a frequência de amostragem utilizada (para leitura de sensores e atualização do algoritmo adaptativo) necessita ser na ordem de centenas de Hertz. Nesse contexto, os seguintes requisitos gerais foram definidos para o sistema proposto:

- Taxa de amostragem de  $f_s = 250$  Hz (período de 4 ms);
- Capacidade de leitura de dois sensores de movimento (acelerômetros e/ou giroscópios) em tempo real;
- Capacidade de executar um algoritmo adaptativo complexo em tempo real, implicando até 10.000 operações de ponto flutuante a cada período de amostragem;
- Capacidade de aplicar, concorrentemente e em tempo real, duas forças diferentes na estrutura de interesse: i) uma força de perturbação, visando simular um fenômeno externo que gera a vibração a ser cancelada; e ii) a força de controle, obtida a partir da saída do filtro adaptativo.

Esses requisitos podem ser considerados como mínimos, sendo que expansões são desejáveis visando permitir o uso do sistema em uma gama maior de aplicações.

## III. ESCOLHA DE COMPONENTES BÁSICOS

A partir dos requisitos descritos na seção anterior, a tarefa agora é definir os componentes eletrônicos principais para construção do sistema. Assim, esta seção é dedicada à discussão das escolhas de microcontrolador, sensores e atuadores.

Para a escolha do microcontrolador, um outro aspecto mais subjetivo foi considerado além dos descritos na seção anterior: a facilidade de programação e reprogramação. Isso foi feito visando facilitar o uso e adaptação do sistema por outros pesquisadores. Nesse contexto, optou-se por usar o ESP32-WROOM-32 [11] em função da sua popularidade, baixo custo e possibilidade de programação via Arduino IDE [12]. Além disso, as características de hardware do ESP32-WROOM-32 são bastante interessantes: ele possui dois processadores internos de 32 bits (*dual core*) operando a 240 MHz, muito boa capacidade de memória (tanto *flash* quanto RAM), conectividade *wireless* (Wi-Fi e *Bluetooth*), conversores analógico-digitais de 12 bits, dois conversores digitais-analógicos de 8 bits, e diversas interfaces de comunicação (I2C, SPI, UART, dentre outras) implementadas em hardware. Em termos de desempenho em ponto flutuante, o ESP32 opera na casa dos MFLOPS (milhões de operações em ponto flutuante por

segundo) [13] e, assim, deve exceder consideravelmente as 10.000 operações por período de amostragem especificadas para o sistema proposto.

Com respeito à escolha dos sensores de movimento, ela foi bastante facilitada pela crescente disponibilidade de IMUs (*inertial measurement units*) digitais baseadas em tecnologia MEMS (*microelectromechanical systems*) [14]. Essas IMUs vêm sendo utilizadas largamente em *smartphones*, bem como em aplicações envolvendo reconhecimento de gestos, *gaming*, realidade aumentada, navegação e serviços baseados em localização [15]. Como exemplos de IMUs hoje amplamente disponíveis, podemos citar a MPU-6050 [16] e a LSM6DS3 [15], ambas compatíveis com o sistema experimental proposto. Essas IMUs possuem acelerômetros e giroscópios tridimensionais de excelente qualidade, além de comunicação via barramento I2C e/ou SPI. Também possuem taxas de amostragem que superam os 250 Hz especificados para o sistema proposto.

Outro ponto importante no projeto do sistema proposto é a escolha dos atuadores que irão gerar as forças sobre a estrutura sob ensaio/investigação (vide Seção IV). Buscando baixo custo de implementação, a opção foi usar atuadores magnéticos (os eletroímãs solenoides), o que resulta em uma restrição na estrutura sob ensaio, que precisa ser construída usando algum material ferromagnético, como o aço carbono. Para controlar a força nos atuadores, controla-se a tensão aplicada sobre eles, a qual pode variar entre 0 e 12 V. Com 0 V, nenhuma força é aplicada na viga, enquanto que para 12 V tem-se a força máxima nominal puxando a viga. É importante notar que os atuadores magnéticos utilizados não são capazes de empurrar a viga, mas apenas de puxá-la. Assim, para ensaios envolvendo aplicação de forças harmônicas (sinusoidais), a viga é flexionada até um ponto médio aplicando um nível contínuo (DC) de tensão, e então a tensão é variada de forma a obter a oscilação harmônica com a frequência desejada.

Para gerar tensões na faixa de 0 a 12 V, necessárias para controlar a força dos atuadores, os conversores digital-analógico (DACs) do ESP32 não podem ser usados diretamente, uma vez que eles não são capazes de fornecer corrente suficiente. Além disso, esses DACs possuem resolução de apenas 8 bits, o que pode limitar a qualidade do sinal gerado. Para contornar esses problemas, utilizou-se DACs MCP4725 (de 12 bits com conexão I2C) [17] em conjunto com buffers de corrente baseados em ampops LM358 e transistores TIP41C.

Um outro componente incluído ao sistema foi um conversor analógico-digital (ADC) ADS1015 [18], o qual possui 4 canais de 12 bits, faixa de leitura ajustável de  $\pm 0,256$  a  $\pm 6,144$  V, taxa de amostragem de até 3,3 kHz, e conexão I2C. A maior flexibilidade desse ADC, em comparação com o presente no ESP32, permite a medição de corrente nos atuadores (a partir de medidas de tensão sobre um resistor *shunt*) com boa resolução. A corrente nos atuadores magnéticos é uma informação importante, uma vez que permite estudar melhor as forças geradas sobre a estrutura sob ensaio.

## IV. PLACA DE AQUISIÇÃO

Definidos os componentes, como exposto acima, partiu-se para a elaboração de uma placa de circuito impresso para facilitar a montagem do sistema e conexão dos componentes.

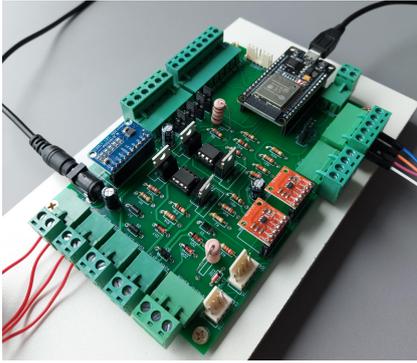


Fig. 1. Placa de aquisição personalizada.

Nesse ponto, o foco foi em facilidade de montagem e baixo custo de produção, sem no entanto comprometer a qualidade. Assim, optou-se pelo desenvolvimento de uma placa de duas camadas, sem o uso de componentes SMD (*surface mount devices*). Como consequência, os componentes SMD utilizados (ESP32, MCP4725 e ADS1115, além dos sensores) devem ser incorporados na forma de kits de desenvolvimento (com o componente soldado em uma placa base). Cabe ressaltar que tais kits são hoje facilmente encontrados em lojas especializadas voltadas para a comunidade *maker*.

De maneira geral, durante o projeto da placa, buscou-se explorar ao máximo os recursos do ESP32 que são interessantes para a aplicação em questão. Por exemplo, explorando as interfaces de comunicação implementadas em hardware no ESP32, foram definidos/disponibilizados três barramentos de comunicação na placa personalizada, a saber:

- **I2C-1:** Barramento I2C principal, utilizado para comunicação com os DACs e o ADC ADS1015, e também disponível externamente (via conectores do tipo borne e KK) para leitura de IMUs (ou outros sensores externos).
- **I2C-2:** Barramento I2C secundário, disponível externamente (via conectores do tipo borne e KK), utilizado para leitura de IMUs.
- **SPI:** Barramento disponível externamente (via conectores borne e KK), também utilizado para leituras de IMUs.

Além de tais barramentos, a placa possui ainda quatro saídas (via bornes) para conectar até 4 atuadores, sendo que todas elas são conectadas a *buffers* de corrente para fornecer corrente suficiente a atuadores. Duas dessas saídas são controladas pelos DACs MCP4725 (de 12 bits) e as outras duas pelos DACs internos do ESP32 (de 8 bits). Outro recurso interessante é a possibilidade de configuração, via *jumpers*, da leitura do ADC ADS1015 para tensão/corrente nos atuadores ou para leituras externas de tensão. Essas leituras externas podem ser utilizadas, por exemplo, para medir velocidade de rotação em máquinas rotativas a partir de tensões vindas de um tacômetro.

Na Fig. 1, uma foto da placa já montada é apresentada. Maiores detalhes sobre o projeto estão disponíveis a partir do repositório online no GitHub [19].

## V. FIRMWARE

Para o desenvolvimento do firmware, considerou-se que, para implementar controle ativo de vibrações em tempo real, o sistema precisa realizar as seguintes ações dentro de um período de amostragem: i) acionamento dos atuadores; ii)

leituras das IMUs; iii) execução de uma iteração do algoritmo adaptativo; e iv) envio de dados para o computador. As ações i) e ii) foram definidas para serem realizadas no início de cada iteração, de forma que variações na duração de iii) não afetem o momento de amostragem dos sensores ou o momento de acionamento dos atuadores. Além disso, em testes preliminares, observou-se que a ação ii) também possui uma duração relativamente longa em função da quantidade de bytes envolvida na comunicação com as IMUs. Considerando-se então a possibilidade de implementação de tarefas concorrentes nos dois processadores (*cores*) do ESP32, as seguintes tarefas foram definidas para execução concorrente:

- **Tarefa 1 (Auxiliar):** Responsável principalmente por controlar o tempo de amostragem e por toda a comunicação no barramento I2C-1 (que contém os DACs, ADC e pode conter IMUs).
- **Tarefa 2 (Principal):** Responsável pelas leituras de sensores nos barramentos I2C-2 e SPI, execução do algoritmo adaptativo de controle e envio de pacote de dados para o software supervisor.

A Fig. 2 traz um fluxograma do funcionamento das diferentes tarefas. Apesar de haver espaço para melhorar a exploração de paralelismo, testes preliminares com o sistema mostraram que a execução de uma iteração das duas tarefas termina em menos de 1 ms para condições típicas de controle ativo de vibrações usando o bem conhecido algoritmo *filtered-x normalized least-mean-squares* (FxNLMS) [20]. Esse tempo é bem menor do que os 4 ms definidos como período de amostragem desejado. Assim, tem-se uma boa margem para futuras implementações mais complexas de algoritmos adaptativos ou mesmo para aumento na taxa de amostragem.

Vale mencionar, ainda, que um segundo modo de funcionamento também está implementado no firmware: um modo de leituras de sensores, sem o controle ativo. Nesse modo, podem ser realizadas as leituras de todos os acelerômetros e giroscópios de até 3 IMUs a 250 Hz, além de um dos canais do ADC a uma taxa de 1 kHz. Nesse modo de leitura, é possível ainda acionar os atuadores com estímulos pré-definidos (sinusoidais, onda quadrada, ou ruído, sem o uso do filtro adaptativo). O código desenvolvido para o firmware está disponível no repositório do sistema no GitHub [19].

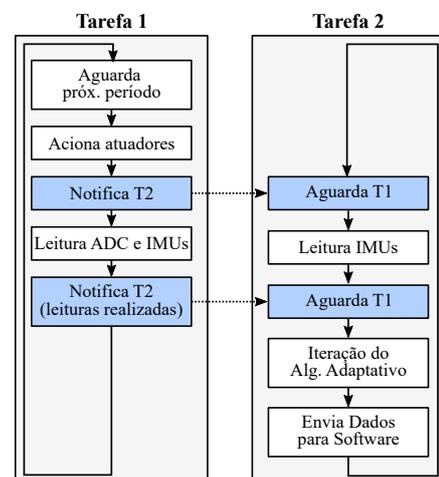


Fig. 2. Fluxograma das tarefas executadas em firmware.

## VI. ESTRUTURA EXPERIMENTAL

Como mencionado anteriormente, o sistema experimental proposto envolve o uso de atuadores magnéticos que permitem a aplicação de forças em estruturas metálicas ferromagnéticas. Considerando esse aspecto e buscando também uma boa flexibilidade para realização de diferentes tipos de experimentos, a estrutura em aço carbono ilustrada na Fig. 3 foi desenvolvida. Em tal figura, temos os seguintes elementos em destaque:

- 1) Blocos de engaste compostos por base e tampa presos por parafusos, além de calços internos para fixar a viga;
- 2) Viga experimental, a qual pode ser fixada na configuração biengastada ou engastada livre;
- 3) Atuadores magnéticos com distância para viga e posição vertical ajustáveis;
- 4) Suporte em U com rasgos oblongos laterais para fixação dos engastes, além de um rasgo oblongo traseiro para fixação e ajuste de posição dos atuadores;
- 5) Base de fixação soldada ao suporte em U.

A fixação das IMUs na viga é feita prendendo a placa da IMU a dois ímãs de neodímio por parafusos, sendo esses ímãs responsáveis pela fixação da IMU à viga. Tal esquema é ilustrado em um destaque na Fig. 3. A vantagem dessa forma de fixação é a grande flexibilidade proporcionada ao sistema, uma vez que a IMU pode ser facilmente reposicionada conforme necessário. Além disso, a partir de testes práticos, observou-se que o campo magnético dos ímãs não afeta as leituras das IMUs e também que a estrutura composta por ímãs e placa não possui frequências de ressonância na faixa de interesse de 0 a 125 Hz. O projeto completo da estrutura mecânica pode ser encontrado no repositório do sistema [19].

## VII. SOFTWARE SUPERVISÓRIO

Para realizar a supervisão do funcionamento do sistema e gravação de dados experimentais, um software personalizado foi desenvolvido em Python. A Fig. 4 apresenta uma captura da tela principal desse software. Em linhas gerais, ele possui dois modos principais de funcionamento: 1) modo de leitura de sensores; e 2) modo de controle. No Modo 1, é possível ler todos os acelerômetros e giroscópios de até 3 IMUs (a uma taxa de 250 Hz), além de fazer leituras de um canal do ADC

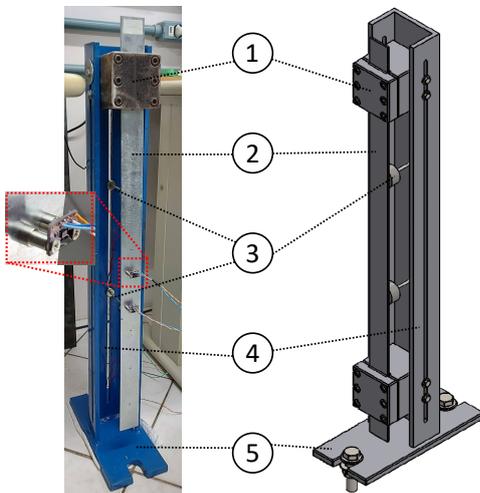


Fig. 3. Detalhamento da estrutura mecânica de referência.

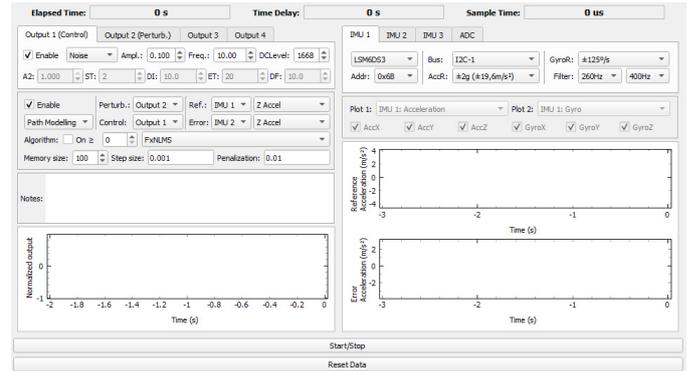


Fig. 4. Captura de tela do software supervisorio desenvolvido.

a 1 kHz, e acionamento não adaptativo dos atuadores (com estímulos pré-definidos, como harmônicos e ondas quadradas, dentre outros). Por outro lado, o Modo 2 (controle ativo) pode funcionar tanto para modelagem de caminhos (secundário e de feedback) [2], quanto para o controle adaptativo propriamente dito usando diferentes algoritmos adaptativos [4], [20].

O software supervisorio desenvolvido está disponível a partir do GitHub [19]. Outros recursos importantes de tal software são: exibição de dados com atualização a cada 1 segundo; diálogo para lidar com modelagem de caminhos; diálogo para visualização de leituras realizadas; registro em *log* de configurações e ações ao longo do experimento; e exportação de dados experimentais incluindo anotações e *log* de atividades.

## VIII. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção, resultados experimentais obtidos com o sistema desenvolvido são apresentados visando demonstrar algumas de suas características e capacidades. Tais resultados foram obtidos a partir de medições usando uma viga engastada livre de aço ASTM-A36, com comprimento de 61,9 cm, largura de 3,955 cm e espessura de 2,9 mm. Para essa viga, presa no engaste superior da estrutura de suporte, as frequências naturais esperadas para os 3 primeiros modos são 6,12; 38,38; e 107,47 Hz [21]. Além disso, o sensor de referência foi posicionado a 35,5 cm do engaste, o sensor de erro a 48 cm, o atuador de controle a 37 cm e o atuador de perturbação a 14,5 cm. A distância entre os atuadores e a viga é de 3 mm.

### A. Experimento 1: Modelagem de Caminho Secundário

O primeiro experimento é dedicado à modelagem do caminho secundário (entre o atuador de controle e o sensor de erro), uma vez que o conhecimento desse caminho é essencial para a implementação de algoritmos como o FxNLMS [2], [20]. Para fazer tal modelagem, um sinal de tensão do tipo ruído branco com distribuição uniforme foi aplicado ao atuador magnético e a aceleração captada pelo sensor de erro foi gravada. De posse desses sinais, uma modelagem adaptativa foi realizada usando o algoritmo NLMS [20]. Então, aplicando a transformada de Fourier à resposta ao impulso obtida em tal modelagem, a resposta em frequência apresentada na Fig. 5 foi obtida. Algumas características bem interessantes do sistema desenvolvido podem ser observadas a partir dessa figura: i) as frequências de ressonância observadas (frequências dos picos marcados em vermelho) são bem próximas das frequências naturais esperadas (viga fracamente amortecida); ii) os picos

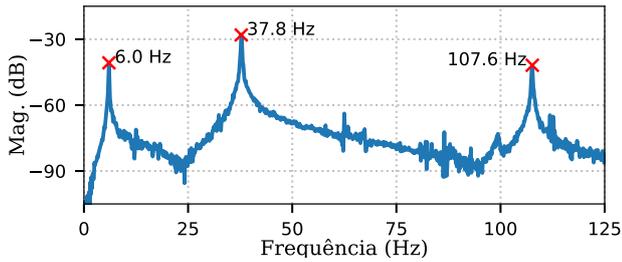


Fig. 5. Resposta em frequência obtida da modelagem do caminho secundário.

são bem proeminentes, revelando uma excelente relação sinal ruído; e iii) picos adicionais, fora das frequências esperadas, não são observados, indicando que a estrutura experimental de suporte praticamente não afeta as medidas realizadas na viga.

### B. Experimento 2: Controle Ativo

O segundo experimento envolve controle ativo de vibrações usando o algoritmo *controller-vibration-aware* FxNLMS (CVA-FxNLMS), o qual corresponde a uma variação do FxNLMS mais robusta a problemas que ocorrem no transitório de aprendizagem do controlador adaptativo [4]. Nesse contexto, considera-se uma perturbação harmônica de 38 Hz aplicada à viga, com o posicionamento de sensores e atuadores descrito no início desta seção. Tal perturbação é aplicada à viga até que a vibração se estabilize e então o controle ativo é ligado. Por conveniência, define-se como  $t = 0$  o momento em que o controle é ligado. A Fig. 6(a) apresenta os gráficos obtidos de tensão (normalizada pelo valor máximo) sobre os atuadores ao longo do tempo. Nessa figura, nota-se que, após  $t = 0$ , o sinal de controle passa por um transitório e então se estabiliza. A Fig. 6(b) apresenta um destaque dos gráficos da Fig. 6(a) perto de  $t = 15$  s, ou seja, após a convergência. Nesse destaque, observa-se uma diferença de fase e amplitude entre os sinais de perturbação e controle. A diferença de fase é típica do controle ativo (já que este é baseado na produção de interferência destrutiva), enquanto que a diferença de amplitude está mais relacionada com a posição dos atuadores na viga. A Fig. 6(c), por sua vez, apresenta a evolução do valor quadrático médio da aceleração captada pelo sensor de erro, i.e., o erro quadrático médio (EQM) obtido. Dessa curva, observa-se uma redução de mais de 10 dB no EQM após apenas 2 segundos de experimento, mostrando a efetividade do CVA-FxNLMS e também a capacidade do sistema desenvolvido em realizar experimentos como este.

## IX. CONCLUSÕES

O presente trabalho foi dedicado ao desenvolvimento de um sistema experimental para pesquisa em controle ativo de vibrações. Todas as partes do sistema desenvolvido, desde a escolha de componentes até a estrutura experimental de referência, foram pensadas considerando facilidade de construção e modificação, além de baixo custo com boa qualidade. De maneira geral, o sistema desenvolvido apresentou excelentes características, as quais foram verificadas via resultados experimentais.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES, ao CNPq e ao PIICT-UFSC pelo apoio ao presente trabalho.

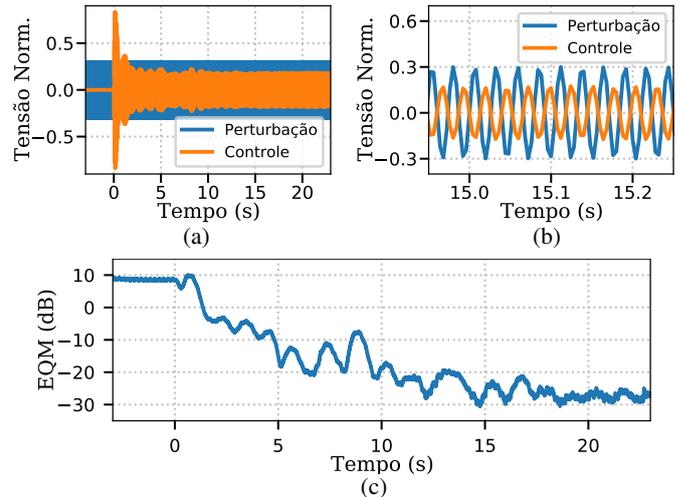


Fig. 6. Controle Ativo usando o algoritmo CVA-FxNLMS: (a) tensões nos atuadores ao longo do tempo; (b) destaque das tensões nos atuadores após convergência; (c) erro quadrático médio (EQM).

## REFERÊNCIAS

- [1] A. Preumont, *Responsive Systems for Active Vibration Control*, 1st ed. Dordrecht, Netherlands: Springer Netherlands, 2002.
- [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] M. A. Barghouthi, E. L. O. Batista, and E. M. O. Lopes, "Numerical and experimental analysis of a hybrid (passive-adaptive) vibration control system in a cantilever beam under broadband excitation," in *Vibration Engineering and Technology of Machinery: Proceedings of Vetomac XV 2019*, J. M. Balthazar, Ed. New York, NY: Springer, 2021.
- [4] 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.
- [5] National Instruments Corp. (2022) What is LabVIEW? [Online]. Available: <https://www.ni.com/en-us/shop/labview.html>.
- [6] — (2022) CompactRIO Systems. [Online]. Available: <https://www.ni.com/en-us/shop/compactrio.html>.
- [7] D. Dougherty, "The maker movement," *Innovations: Technology, Governance, Globalization*, vol. 7, no. 3, pp. 11–14, 2012.
- [8] C. R. Farrar and K. Worden, *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*, 1st ed. West Sussex, UK: Wiley, 2012.
- [9] M. A. Marins, F. M. Ribeiro, S. L. Netto, and E. A. da Silva, "Improved similarity-based modeling for the classification of rotating-machine failures," *J. Franklin Institute*, vol. 355, no. 4, pp. 1913–1930, 2018.
- [10] D. J. Ewins, *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2009.
- [11] Espressif Systems Co. "ESP32: Wi-Fi and Bluetooth mcu," 2022. [Online]. Available: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>
- [12] Arduino. (2022) Software Arduino. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/software>.
- [13] J. Ivković and J. L. Ivković, "Analysis of the performance of the new generation of 32-bit microcontrollers for IoT and big data application," in *Proc. of 7th Int. Conf. Inf. Soc. and Tech.*, Mar. 2017, pp. 330–336.
- [14] J. W. Judy, "Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications," *Smart Materials and Structures*, vol. 10, no. 6, pp. 1115–1134, Nov. 2001.
- [15] STMicroelectronics. (2022) iNEMO inertial sensors and modules. [Online]. Available: <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/inemo-inertial-modules.html>
- [16] InvenSense. "MPU-6050 six-axis (gyro + accelerometer) MEMS MotionTracking™ devices," aug. 5, 2021. [Online]. Available: <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/>
- [17] Microchip Technology Inc. (2022) MCP4725. [Online]. Available: <https://www.microchip.com/en-us/product/MCP4725>
- [18] Texas Instruments Inc. (2022) ADS1015. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/ADS1015>
- [19] E. L. O. Batista. (2022) ActVib GitHub repository. [Online]. Available: <https://github.com/eduardobatista/ActVib>
- [20] S. M. K. Kuo and D. R. Morgan, *Active Noise Control Systems*, 1st ed. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017.
- [21] S. S. Rao, *Mechanical Vibrations*, 6th ed. New York City, NY: Pearson, 2016.