

CONTROLE ATIVO DE VIBRAÇÕES POR REALIMENTAÇÃO DE ESTADOS DE UMA ESTRUTURA VERTICAL FLEXÍVEL SUJEITA A EVENTOS SÍSMICOS

Fernando Ortolano, ortolano@fem.unicamp.br¹

Helói F. G. Genari, heloi.genari@ufabc.edu.br²

Eurípedes G. O. Nóbrega, egon@fem.unicamp.br¹

¹Departamento de Mecânica Computacional, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil

²Universidade Federal do ABC, Santo André, Brasil

Resumo: Este artigo investiga experimentalmente o controle por realimentação de estados usando um observador para a atenuação de vibrações estruturais em uma estrutura vertical flexível sujeita a eventos sísmicos. O sistema experimental é construído sobre uma base móvel para simular os efeitos dos eventos sísmicos em estruturas altas contendo uma massa ativa em seu topo. Um motor de corrente contínua é utilizado para mover a base da estrutura e um outro motor similar é aplicado para deslocar a massa. O sistema de controle é projetado utilizando o modelo identificado da estrutura vertical, em que o sinal de controle deve prover uma trajetória que minimize a influência do distúrbio na vibração estrutural. Um sistema de instrumentação é desenvolvido para condicionar os sinais de vibrações, gerar as ações do controlador e acionar os motores. Os resultados experimentais e teóricos são similares, confirmando a eficácia da técnica de controle para a redução de vibrações estruturais.

Palavras-chave: controle ativo de vibração, realimentação de estados, alocação de polos, observador, massa ativa

1. INTRODUÇÃO

A crescente tendência de verticalização das cidades em conjunto com o desenvolvimento tecnológico vem estimulando a construção de edificações cada vez mais altas e mais leves. Consequentemente, essas estruturas verticais estão cada vez mais flexíveis e suscetíveis a vibrações causadas por ventos, por movimentos rítmicos de pessoas e/ou tráfego e por eventos sísmicos. Dessa forma, o interesse no controle de vibrações estruturais vem crescendo nas últimas décadas (Wang *et al.*, 1983; Abreu and Lopes Jr., 2010; Genari *et al.*, 2015, 2017a), tendo como destaque o controle ativo de vibrações devido ao desempenho melhor em relação ao controle semi-ativo e passivo (Preumont, 2011; Genari *et al.*, 2017b).

Existem diversas técnicas de controle ativo para atenuar as vibrações em estruturas verticais. Por exemplo, Yu *et al.* (2014) propuseram o uso dos controladores PD/PID sintonizados segundo a teoria de estabilidade de Lyapunov para controlar as vibrações de um protótipo de um prédio de dois andares. Kim *et al.* (2016) utilizaram um controlador LQR para mitigar os efeitos do vento sobre uma estrutura vertical alta. Du *et al.* (2004) aplicaram a técnica H_∞ para desenvolver um controlador de vibrações para um edifício com quatro graus de liberdade com incertezas paramétricas e sujeito a perturbações sísmicas. Wu *et al.* (1998) utilizaram o controle H_∞ e LQR de ordem reduzida para atenuar os efeitos dos ventos sobre um edifício. Yazici and Güçlü (2011) investigaram uma abordagem mista baseada na teoria de controle H_2 e H_∞ para reduzir as vibrações estruturais. Apesar da grande variedade de técnicas propostas na literatura, muitas investigações são feitas utilizando modelos, dificultando a análise de estabilidade e de desempenho das técnicas desenvolvidas em ambiente real. Dessa forma, o estudo de desempenho experimental de técnicas de controle torna-se importante para auxiliar o projetista na escolha da melhor técnica de controle para aplicações reais.

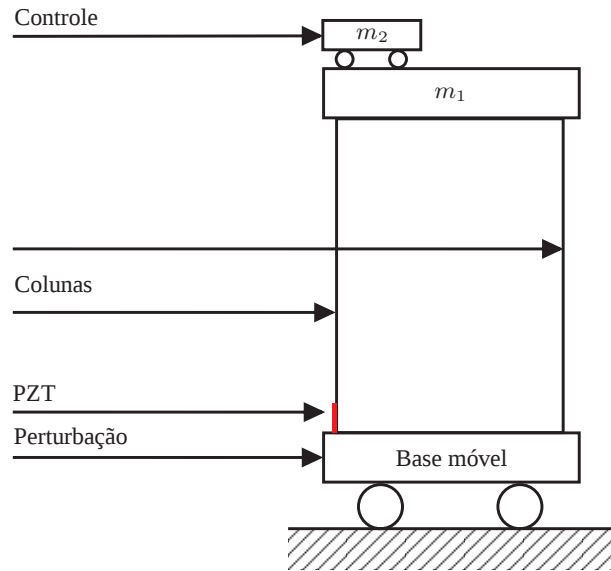
O objetivo deste trabalho é investigar o desempenho da técnica de controle por realimentação de estados em reduzir as vibrações em uma estrutura vertical real sujeita a eventos sísmicos. A estrutura foi montada sobre uma base móvel, utilizada para simular um distúrbio provocado por um evento sísmico. As oscilações laterais da estrutura são medidas por um sensor piezoelétrico colocado em uma das colunas. A redução das vibrações é obtida pelo movimento da massa ativa no topo da estrutura vertical, cuja trajetória é determinada pelo controlador. O modelo identificado da estrutura possui múltiplas entradas e uma saída e é utilizado para projetar o controlador baseado na realimentação de estados observados. O sinal gerado pelo transdutor piezoelétrico é condicionado por um sistema de instrumentação dedicado, que gerencia e controla via PWM os dois motores para gerar os efeitos de um evento sísmico e do movimento da massa ativa no topo do edifício. Essas ações são controladas utilizando duas placas FRDM-KL25Z da NXP®, que gerenciam todas as ações do sistema de controle. O sistema de controle foi experimentalmente testado, sendo os resultados simulados e experimentais similares e efetivos no controle ativo de vibrações da estrutura vertical.

2. ESTRUTURA VERTICAL E A RESPECTIVA INSTRUMENTAÇÃO

A estrutura vertical é apresentada na Fig. 1a e pode ser dividida em três partes principais: base, sistema flexível que simula as paredes de um prédio e uma massa ativa. A base possui um fuso acoplado à estrutura. Assim, os movimentos de rotação de um motor de corrente contínua são convertidos em movimentos lineares da base. Em suma, a estrutura é composta da massa m_1 sustentada por quatro colunas de alumínio anexadas à base. Um sensor piezoelétrico utilizado para medir a vibração lateral está fixado em uma das colunas. A massa ativa m_2 é movida linearmente por outro motor de corrente contínua usando um fuso. O sistema de controle foi projetado para minimizar as vibrações causadas pelo movimento da base através do sinal de controle, que é usado para criar um movimento específico para a massa m_2 , objetivando compensar a perturbação. O diagrama de blocos que descreve o experimento é mostrado na Fig. 1b.



(a) Estrutura vertical.



(b) Diagrama de Blocos.

Figura 1: Configuração do experimento.

A instrumentação do sistema de controle é ilustrada na Fig. 2, em que duas placas FRDM-KL25Z da NXP® foram utilizadas para o controle por PWM dos motores e aquisição e processamento dos sinais. A primeira FRDM-KL25Z é programada usando o MATLAB® e gerencia a atuação dos motores. A segunda placa é programada através da plataforma Arm® Mbed™ e tem a função de receber os sinais condicionados do PZT e gerar um sinal analógico de controle e do sinal de simulação do evento sísmico.

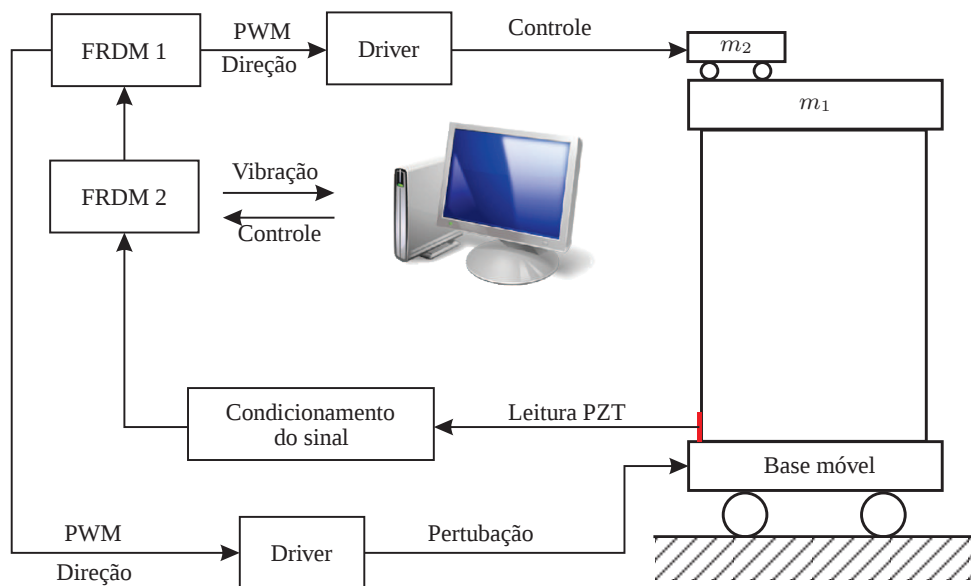


Figura 2: Instrumentação da estrutura vertical.

A placa FRDM-KL25Z adquire somente sinais analógicos positivos com excursão de 0 a 3.3V e, por isso, é necessário

condicionar o sinal de tensão do PZT antes de realizar a sua leitura. O diagrama presente na Fig. 3 ilustra como é feito o condicionamento do sinal adquirido. Inicialmente, um CI CA3240 contendo dois amplificadores operacionais é utilizado, em que o primeiro amplificador é usado para implementar um *buffer* para fornecer uma alta impedância de entrada. O segundo amplificador tem a finalidade de limitar a amplitude de pico a pico do valor de tensão lido do PZT. Em seguida, o CI AD620 é usado para fornecer o *offset* ao sinal, deixando-o somente com valores positivos. Por último, outro CI CA3240 é usado como filtro Butterworth passa-baixa de segunda ordem, objetivando eliminar ruídos fora da banda de interesse.

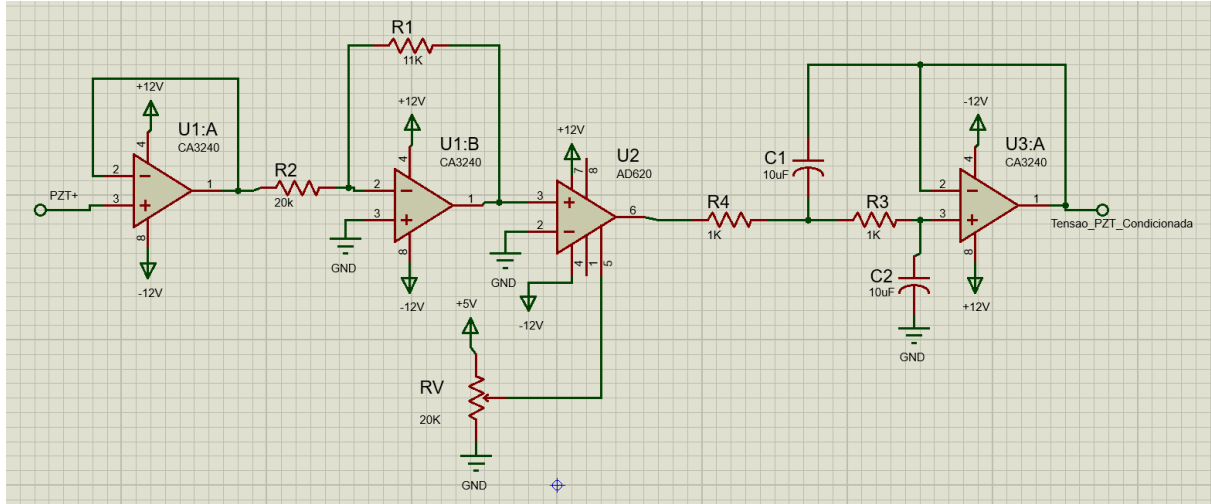


Figura 3: Condicionamento da tensão do PZT.

O acionamento dos motores, tendo o motor inferior a função de simular um evento sísmico e o motor superior a função de mover a massa para contrabalançar o efeito das vibrações, é feito usando um sinal de PWM e um sinal de direção para cada motor, responsáveis por controlar as velocidades de rotação dos motores e por fornecerem os sentidos de rotação. Esses sinais são conectados aos *drivers*, projetados utilizando circuitos tipo ponte H. Vale a pena salientar que o máximo valor de tensão aplicado a cada motor, ou seja, PWM em 100%, é o valor da fonte de alimentação de cada *driver*. Nesse experimento, esse máximo foi ajustado em 15V.

3. MODELO NO ESPAÇO DE ESTADOS DE UMA ESTRUTURA FLEXÍVEL

As estruturas flexíveis são usualmente modeladas por duas equações diferenciais matriciais, que podem ser convertidas para um modelo no espaço de estados, sendo essa representação utilizada frequentemente no projeto de sistemas de controle. A equação de movimento de uma estrutura flexível genérica pode ser descrita como

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = \mathbf{B}_w\mathbf{w}(t) + \mathbf{B}_u\mathbf{u}(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_d\mathbf{q}(t) + \mathbf{C}_v\dot{\mathbf{q}}(t), \quad (2)$$

em que $\mathbf{q}(t)$ é vetor de deslocamentos, $\mathbf{y}(t)$ representa o vetor com os sinais de saída, $\mathbf{M}$ é a matriz de massa, $\mathbf{D}$ é a matriz de amortecimento e $\mathbf{K}$ é a matriz de rigidez. As matrizes de entrada são $\mathbf{B}_w$ e $\mathbf{B}_u$, o vetor $\mathbf{w}(t)$ representa as forças de perturbação agindo na estrutura, o vetor $\mathbf{u}(t)$ representa as forças de controle e as matrizes de saída são $\mathbf{C}_d$ e $\mathbf{C}_v$. Além disso, os vetores e as matrizes são consideradas tendo dimensões apropriadas em relação ao número de entradas, de saídas e da ordem do modelo.

Para a matriz $\mathbf{M}$ não singular, a Eq. (1) e a Eq. (2) podem ser escritas como

$$\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{D}\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}\mathbf{q}(t) = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}_w\mathbf{w}(t) + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}_u\mathbf{u}(t) \quad (3)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_d\mathbf{q}(t) + \mathbf{C}_v\dot{\mathbf{q}}(t). \quad (4)$$

Definindo o vetor de estado $\mathbf{x}(t)$ como uma combinação entre o vetor de deslocamento $\mathbf{q}(t)$ e o vetor de velocidades $\dot{\mathbf{q}}(t)$, i.e.,

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1(t) \\ \mathbf{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}(t) \\ \dot{\mathbf{q}}(t) \end{bmatrix},$$

a Eq. (3) e a Eq. (4) podem ser reescritas como

$$\dot{\mathbf{x}}_1(t) = \mathbf{x}_2(t) \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_2(t) = -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}\mathbf{x}_1(t) - \mathbf{M}^{-1}\mathbf{D}\mathbf{x}_2(t) + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}_w\mathbf{w}(t) + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}_u\mathbf{u}(t) \quad (6)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_d\mathbf{x}_1(t) + \mathbf{C}_v\mathbf{x}_2(t). \quad (7)$$

O seguinte modelo no espaço de estados é obtido combinando a Eq. (5), a Eq. (6) e a Eq. (7):

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_1\mathbf{w}(t) + \mathbf{B}_2\mathbf{u}(t) \quad (8)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_2\mathbf{x}(t), \quad (9)$$

em que $\mathbf{C}_2 = [\mathbf{C}_d \ \mathbf{C}_v]$ e as matrizes $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}_1$ e $\mathbf{B}_2$ são obtidas da seguinte forma

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}_w \end{bmatrix} \text{ e } \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}_u \end{bmatrix}.$$

Vale a pena salientar que o modelo no espaço de estados representado pela Eq. (8) e pela Eq. (9) pode ser facilmente transformado para formas canônicas modais usando matrizes de transformação específicas (Gawronski, 2004).

4. PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE

A partir da identificação do modelo no espaço de estados da estrutura flexível representada na Fig. 1, é possível, através da lei de controle na forma $\mathbf{u}(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t)$, posicionar os polos do sistema de malha fechada na posição que leva ao desempenho desejado. Dessa forma, substituindo a lei de controle na Eq. (8), tem-se

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{B}_2\mathbf{K})\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_1\mathbf{w}(t),$$

em que o par $(\mathbf{A}, \mathbf{B}_2)$ é considerado completamente controlável, i.e., todos os modos podem ser controlados.

No controle por realimentação de estados é necessário que os estados estejam disponíveis. Entretanto, frequentemente não é possível medir todos os estados. Dessa forma, uma alternativa é estimar os estados a partir da saída do sistema. O observador adotado é o de Luenberger, que tem a seguinte forma:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}_2\mathbf{u}(t) + \mathbf{L}(\mathbf{y}(t) - \hat{\mathbf{y}}(t)) \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{C}_2\hat{\mathbf{x}}(t), \quad (11)$$

em que $\hat{\mathbf{x}}(t)$ e $\hat{\mathbf{y}}(t)$ são as estimativas do vetor de estados e do vetor de saída. O ganho $\mathbf{L}$ é escolhido para minimizar o erro de estimação $\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t)$. Além disso, o par $(\mathbf{A}, \mathbf{C}_2)$ é considerado completamente observável, i.e., é possível estimar todos os estados. Além disso, o princípio da separação estabelece que o projeto do controlador e do observador podem ser realizados de modo independente, ou seja, a ordem do projeto não afeta o resultado do sistema controlado com o observador (Ogata, 2009).

Substituindo a Eq. (11) na Eq. (10), tem-se

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}_2\mathbf{u}(t) + \mathbf{L}(\mathbf{y}(t) - \mathbf{C}_2\hat{\mathbf{x}}(t)) \\ &= (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C}_2)\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}_2\mathbf{u}(t) + \mathbf{L}\mathbf{y}(t). \end{aligned} \quad (12)$$

Usando a Eq. (8), a Eq. (9) e a Eq. (12), a estimação da dinâmica do erro é dada por:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}(t) &= \dot{\mathbf{x}}(t) - \dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) \\ &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_1\mathbf{w}(t) + \mathbf{B}_2\mathbf{u}(t) - (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C}_2)\hat{\mathbf{x}}(t) - \mathbf{B}_2\mathbf{u}(t) - \mathbf{L}\mathbf{y}(t) \\ &= (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C}_2)\mathbf{e}(t) + \mathbf{B}_1\mathbf{w}(t), \end{aligned}$$

em que o vetor de ganho $\mathbf{L}$ é escolhido para minimizar o erro de estimação de estados. A Figura 4 ilustra as relações entre a planta, o observador e a lei de controle.

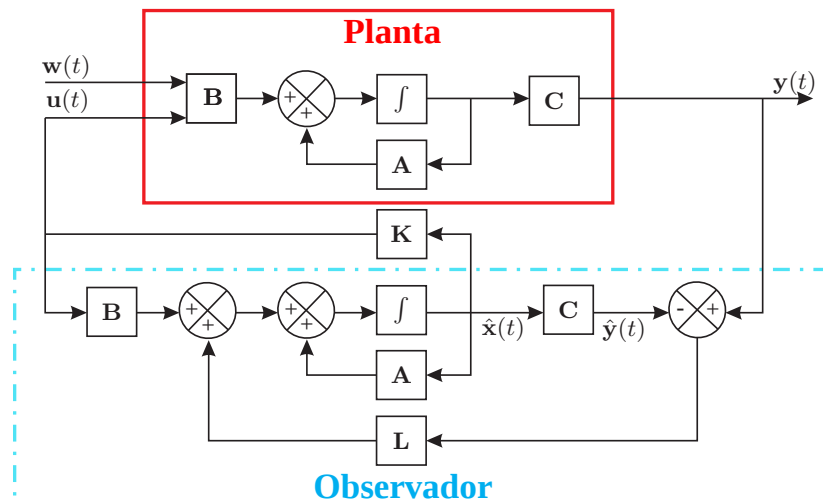


Figura 4: Controle por realimentação de estados.

5. RESULTADOS

Essa seção apresenta os resultados experimentais e de simulação do controle por realimentação de estados para a estrutura vertical mostrada na Fig. 1. Inicialmente, a estrutura flexível é identificada diretamente no espaço de estados na forma canônica modal. Em seguida, o sistema de controle é projetado e testado através de uma simulação. Por fim, o sistema de controle é aplicado para fazer o controle de vibrações na estrutura vertical flexível real.

5.1 Identificação do Sistema

A identificação é realizada para modelar a estrutura na banda de frequência entre 0 e 38 rad/s, pois a grande parte da energia dos terremotos reais está localizada nessa banda de frequência, por exemplo, o terremoto San Jose N59E, Kern County N90E e El Centro, (Spencer *et al.*, 1994; Abreu *et al.*, 2009; Abreu and Lopes Jr., 2010). Para a realização da identificação, um sinal determinístico temporal de Schroeder, com banda entre 0 e 38 rad/s, de duração de 16 segundos e amostrado a 100 Hz, é usado como entrada, sendo apresentado na Fig. 5a. O mapeamento da relação entre sinal de controle e a vibração estrutural é obtido aplicando o sinal de Schroeder como sinal de controle e definindo o sinal distúrbio como zero. A resposta estrutural temporal dessa configuração é apresentada na Fig. 5b. Similarmente, para obter a relação entre o evento sísmico e a vibração estrutural, o sinal de controle é fixado em zero e o sinal de Schroeder é aplicado como distúrbio. A Figura 5c mostra a resposta temporal dessa configuração.

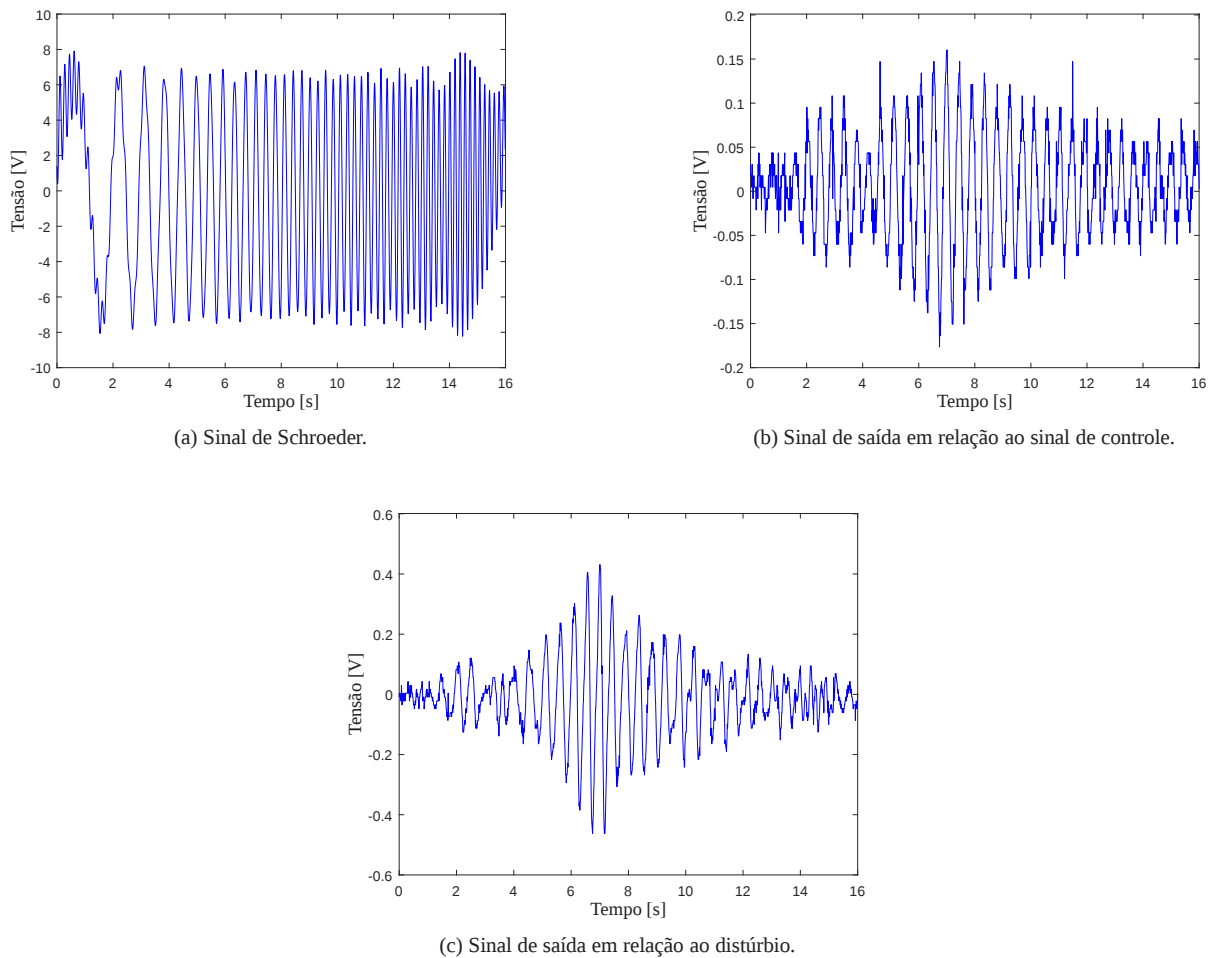


Figura 5: Sinais experimentais utilizados para a identificação da estrutura vertical.

A função de resposta em frequência (FRF) entre o sinal do PZT e o sinal de controle é definida como P_{yu} e a FRF entre o sinal do PZT e o sinal de distúrbio é definida como P_{yw} . Essas FRFs são obtidas utilizando a função *tffestimate* do MATLAB® em conjunto com os dados experimentais presentes na Fig. 5. A FRF P_{yw} é mostrada na Fig. 6a, enquanto, a FRF P_{yu} está na Fig. 6b. Com as FRFs experimentais, o modelo da estrutura é identificado diretamente no espaço de estados com ordem três, com dois estados representando o primeiro modo de vibração da estrutura e o terceiro estado descrevendo a dinâmica dos dois motores similares de corrente contínua. O modelo da estrutura vertical é apresentado no Apêndice. As FRFs experimentais P_{yu} e P_{yw} e o modelo no espaço de estados são também comparados na Fig. 6, mostrando uma boa correlação e servindo para validar o modelo.

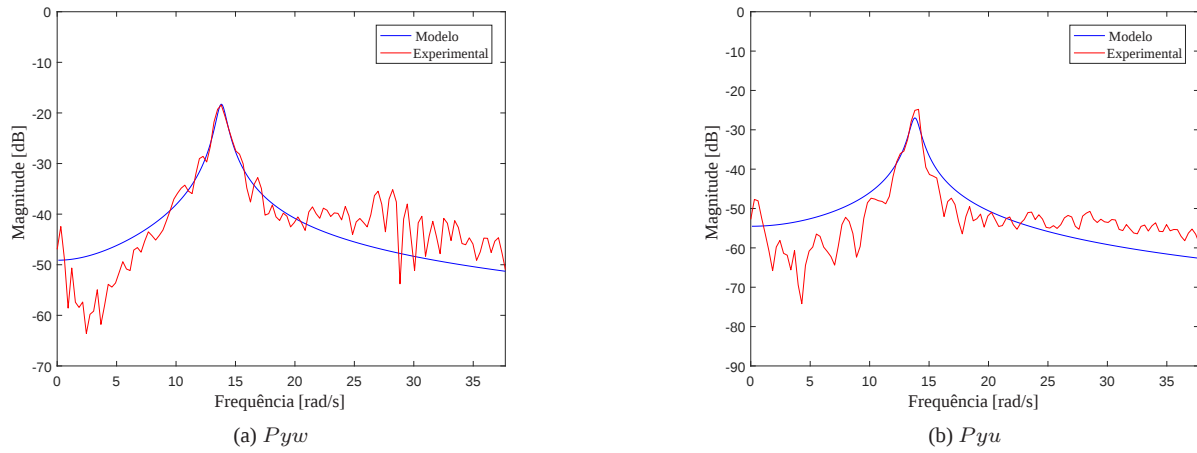
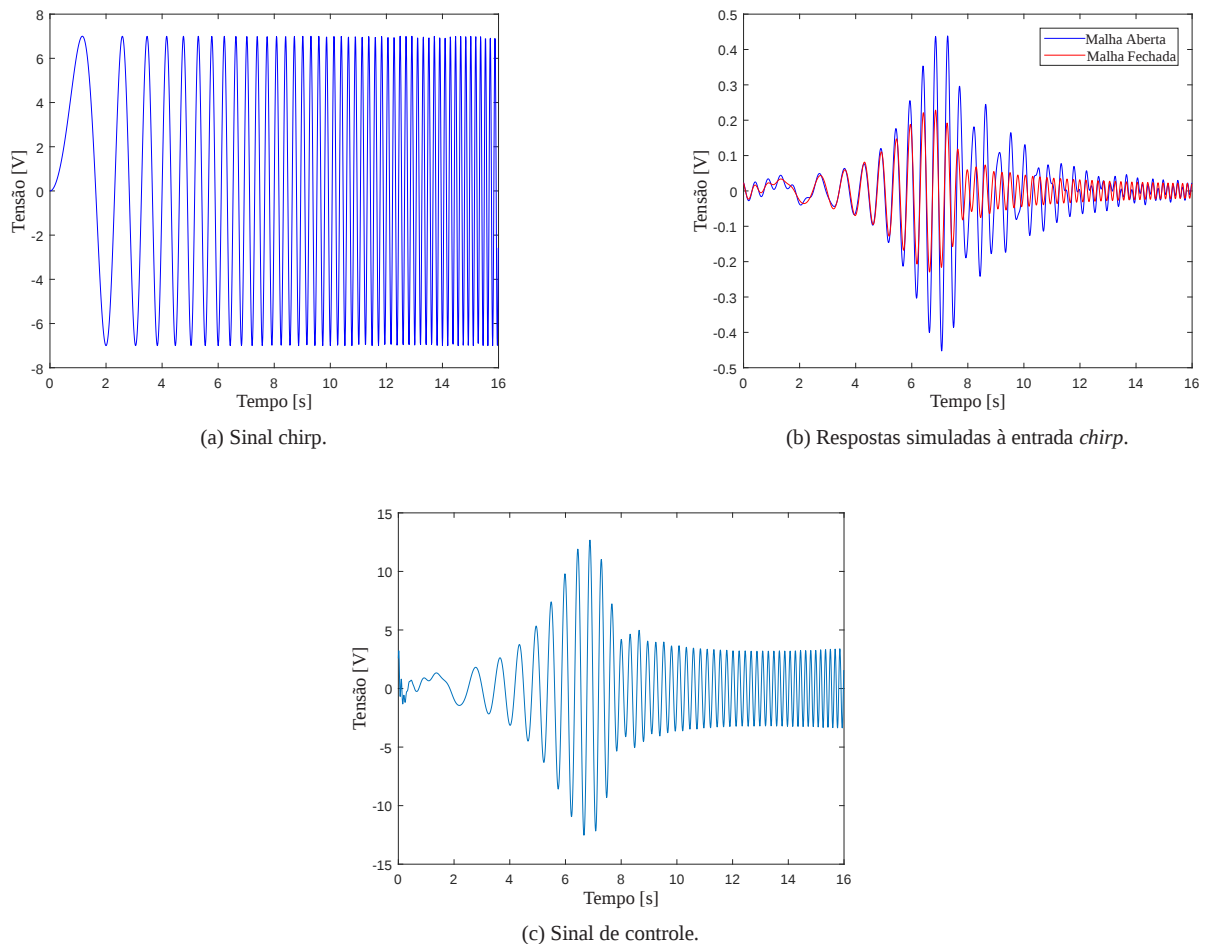


Figura 6: Comparação das respostas em frequência.

5.2 Projeto do Sistema de Controle

O sistema de controle foi projetado para minimizar as vibrações da estrutura vertical, no qual algumas interações foram necessárias para determinar o ponto ótimo para balancear os dois objetivos principais: a redução da vibração estrutural e o limite do sinal de controle de ± 15 V. Os polos de malha fechada foram alocados em $-1,5180 \pm 13,7163j$ e -18 . Os polos do observador foram alocados para serem cinco vezes mais rápidos que os polos de malha fechada. Para analisar o desempenho do sistema de controle, um sinal *chirp* com banda de frequência entre 0 e 38 rad/s, amplitude de 7 V, duração de 16 segundos e discretizado na taxa de 100 Hz é utilizado como distúrbio, sendo representado na Fig. 7a. A comparação entre a resposta estrutural simulada em malha aberta e malha fechada é mostrada na Fig. 7b e o sinal de controle é ilustrado na Fig. 7c. O controlador reduz a vibração em 48%, com o sinal de controle permanecendo dentro dos limites requeridos.

Figura 7: Sinais simulados para a entrada de distúrbio sendo um sinal *chirp*.

5.3 Resultados Experimentais

O sistema de controle é testado experimentalmente utilizando a estrutura presente na Fig. 1. A estrutura foi submetida à mesma entrada chirp de perturbação da simulação. A Figura 8 compara o sinal de saída do sistema em malha aberta com o sinal de malha fechada e, também, mostra o sinal de controle experimental. O sistema controlado tem redução da vibração de 48% em relação à malha aberta, com o sinal de controle permanecendo dentro dos limites do sistema de instrumentação. Esses resultados foram similares ao obtido com a simulação, demonstrando que o modelo foi bem identificado e que o projeto de controle ativo de vibrações de estruturas flexíveis verticais é eficaz.

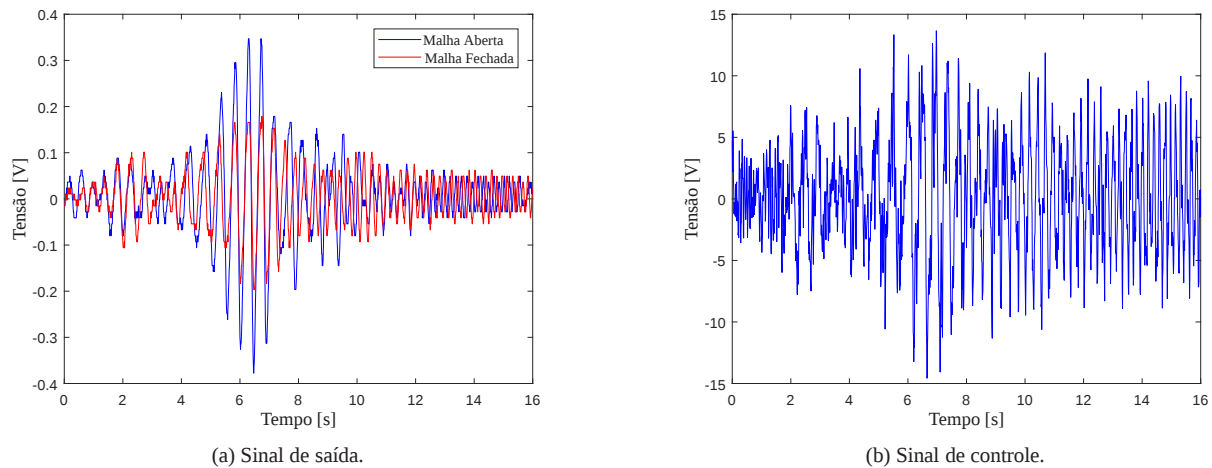


Figura 8: Resposta experimental ao distúrbio sendo o sinal chirp.

6. CONCLUSÕES

Nesse artigo, foi investigada a técnica de controle por realimentação de estados para controlar uma estrutura flexível vertical que simula uma construção alta sujeita a eventos sísmicos. Inicialmente, um sistema de instrumentação foi desenvolvido para adquirir e condicionar os sinais de vibrações estruturais e para implementar todas as ações de controle, incluindo a movimentação da base que simula os eventos sísmicos e a movimentação da massa ativa no topo da estrutura. O controlador foi projetado junto com um observador utilizando o modelo da estrutura identificado diretamente no espaço de estados e na forma canônica modal. Em seguida, o sistema de controle foi testado experimentalmente. Os resultados simulados e experimentais apresentaram uma forte correlação, demonstrando que o método de identificação foi capaz de modelar adequadamente a estrutura e que o sistema de controle projetado é capaz de reduzir significativamente as vibrações. Dessa forma, como resultado prático, a metodologia de controle investigada tem potencial de proteger estruturas flexíveis reais de intensas vibrações produzidas por eventos sísmicos.

7. APÊNDICE

Essa seção apresenta o modelo identificado da estrutura vertical, os ganhos do controlador e os ganhos do observador. O modelo a seguir foi identificado para a estrutura:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \begin{bmatrix} -0,4194 & 13,8105 & 0 \\ -13,8105 & -0,4194 & 0 \\ 0 & 0 & -18,5944 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0,0084 \\ -0,0132 \\ -0,0027 \end{bmatrix} \mathbf{w}(t) + \begin{bmatrix} 0,0214 \\ -0,0365 \\ -0,0013 \end{bmatrix} \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \begin{bmatrix} -2,0449 & 1,3583 & -5,7580 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t).\end{aligned}$$

Os ganhos abaixo foram obtidos como resultados da metodologia do projeto e adotados no experimento, respectivamente para a lei de controle e para o observador:

$$\begin{aligned}\mathbf{K} &= \begin{bmatrix} 81,3915 & -111,1505 & 201,5261 \end{bmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{L} &= \begin{bmatrix} -70,8903 \\ -530,3305 \\ -114,8214 \end{bmatrix}.\end{aligned}$$

8. REFERÊNCIAS

Abreu, G.L.C.M. and Lopes Jr., V., 2010. " H_2 optimal control for earthquake excited structures". In VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM2010. Campina Grande, Brazil.

- Abreu, G.L.C.M., Lopes Jr., V. and Brennan, M.J., 2009. "Mixed H_2/H_∞ control of a two-floors building model using the linear matrix inequality approach". In *20th International Congress of Mechanical Engineering – COBEM2009*. Gramado, Brazil.
- Du, H., Lam, J. and Sze, K.Y., 2004. "Non-fragile H_∞ vibration control for uncertain structural systems". *Journal of Sound and Vibration*, pp. 1031–1045.
- Gawronski, W., 2004. *Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures*. Springer-Verlag.
- Genari, H., Oliveira Neto, O., Nóbrega, E., Mechbal, N. and Coffignal, G., 2015. "Robust vibration control of a vertical flexible structure subject to seismic events". In *XVII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics-DINAME2015*. Natal, Brazil.
- Genari, H.F.G., Mechbal, N., Coffignal, G. and Nóbrega, E.G.O., 2017a. "A modal H_∞ -norm-based performance requirement for damage-tolerant active controller design". *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 394, pp. 15–30.
- Genari, H.F.G., Mechbal, N., Coffignal, G. and Nóbrega, E.G.O., 2017b. "A reconfigurable damage-tolerant controller based on a modal double-loop framework". *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 88, pp. 334–353.
- Kim, Y.M., You, K.P., You, J.Y., Paek, S.Y. and Nam, B.H., 2016. "LQR control of along-wind responses of a tall building using active tuned mass damper". In *2016 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM16)*. Jeju-do, Korea.
- Ogata, K., 2009. *Modern Control Engineering*. Pearson Education, 5th edition.
- Preumont, A., 2011. *Vibration Control of Active Structures: An Introduction*. Springer, 3rd edition.
- Spencer, B.F., Suhardjo, J. and Sain, M.K., 1994. "Frequency domain optimal control strategies for a seismic protection". *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 120, pp. 135 – 159.
- Wang, P., Kozin, F. and Amini, F., 1983. "Vibration control of tall buildings." *Engineering Structures*, pp. 282–288.
- Wu, J., Yang, J. and Schmitendor, W.E., 1998. "Reduced-order H_∞ and lqr control for wind-excited tall buildings". *Engineering Structures*, pp. 222–236.
- Yazici, H. and Güçlü, R., 2011. "Active vibration control of seismic excited structural system using LMI-based mixed H_2/H_∞ state feedback controller". *Turkish journal of electrical engineering & Computer sciences*, Vol. 19, No. 6, pp. 839–849.
- Yu, W., Thenozhi, S. and Li, X., 2014. "Stable active vibration control system for building structures using PD/PID control". In *19th IFAC World Congress*. Cape Town, South Africa.

9. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ACTIVE VIBRATION CONTROL USING THE STATE FEEDBACK OF A VERTICAL FLEXIBLE STRUCTURE SUBJECTED TO SEISMIC EVENTS

Fernando Ortolano, ortolano@fem.unicamp.br¹

Helói F. G. Genari, heloi.genari@ufabc.edu.br²

Eurípedes G. O. Nóbrega, egon@fem.unicamp.br¹

¹Department of Computational Mechanics, University of Campinas, Campinas, Brazil

²Federal University of ABC, Santo André, Brazil

Abstract: This paper investigates experimentally the active vibration control using the observer-based state feedback strategy in a vertical flexible structure subjected to seismic events. The experimental system is built under a mobile basis to simulate the effects of seismic events in a tall building with an active mass driver on its top. A DC motor is used to move the structure basis and another similar motor is applied to displace the mass. The control system is designed using the identified model of the vertical structure, in which the control signal must provide the trajectory that minimize the disturbance influence in the structural vibration. An instrumentation system is developed to condition the vibration signals, to generate the controller actions, and to drive the motors. The experimental and simulated results are similar, confirming the effectiveness of the control technique for structural vibration reduction.

Keywords: active vibration control, state feedback, pole placement, observer, active mass