PROJETO DE UM PROTÓTIPO DE UMA MESA SIMULADORA DE SISMOS

Larissa Lima Putton[1], Guilherme Braga do Vale[2], Murilo Limeira da Costa Neto[3], Maicon Jose Hillesheim[4], Leonardo Gabriel Lopes[5], Gabriel Vidotto Neves[6]

[1]Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Sinop, Brasil (larissa.putton@unematl.br)
[2]Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, Brasil
[3]Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Sinop, Brasil
[4]Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Sinop, Brasil
[5]Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Sinop, Brasil
[6]Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Sinop, Brasil

Resumo: No Brasil, apesar de terremotos de grande magnitude serem de ocorrência rara, estudos recentes mostraram que algumas regiões do país apresentam atividades sísmicas relevantes. Nesse contexto, a NBR 15421 estabelece procedimentos e condutas a serem utilizados nos projetos de estruturas usuais da construção civil. A atualização dessa norma em 2023 revisou o mapeamento de aceleração sísmica no país, atribuindo valores mais precisos. Essa mudança reforça a necessidade de incluir dinâmica estrutural e engenharia sísmica na formação dos engenheiros civis. Diante dessa necessidade, este projeto propõe o desenvolvimento, a construção e a validação experimental de uma mesa vibratória (shaking table) de baixo custo para ser utilizada como ferramenta de ensino. A metodologia consiste em: I) projetar e construir o simulador; II) confeccionar modelos estruturais em pequena escala para análise; e III) validar o sistema por meio de um acelerômetro, comparando os dados experimentais com previsões teóricas. Os resultados esperados incluem a disponibilização de um equipamento funcional e acessível, que permita a demonstração prática de fenômenos oscilatórios e a análise do comportamento de diferentes estruturas sob ação sísmica. Conclui-se que a proposta visa suprir uma lacuna didática, proporcionando um recurso instrumental crucial para capacitar os estudantes nas recentes exigências da normativa brasileira.

Palavras-chave: vibrações; frequência; dinâmica.

INTRODUÇÃO

O Brasil é considerado um país de baixa atividade sísmica, com pouca frequência de terremotos e de baixa magnitude. Entretanto, isso não significa que essas atividades sísmicas, mesmo que mais brandas em comparação com outras regiões, não possam gerar danos às estruturas (Nóbrega e Nóbrega, 2016). Por essa razão, as ações decorrentes de movimentações da base devem ser avaliadas no projeto estrutural, conforme as normas técnicas.

Nesse contexto, a ABNT NBR 15421 (ABNT, 2023), norma brasileira que estabelece os critérios para projetos de estruturas resistentes a sismos, define que as ações sísmicas decorrem de deslocamentos do solo capazes de gerar esforços e deformações nas estruturas. Recentemente, essa norma passou por atualização, com revisões importantes relacionadas ao mapa de perigo sísmico brasileiro e ao espectro de resposta de projeto. Essas alterações resultaram na inclusão de regiões anteriormente desconsideradas quanto aos efeitos sísmicos, além da redefinição de parâmetros utilizados na análise estrutural. Dessa forma, diferentes regiões do país passaram a exigir critérios específicos para avaliação e dimensionamento de estruturas submetidas a ações sísmicas

Ademais, o estado limite de serviço por vibrações tem se tornado especialmente importante nos últimos anos. Isto se deve ao fato de que as edificações estão se tornando cada vez mais esbeltas, flexíveis e leves além de adotarem concepções de plantas livres (open floor) (MUHAMMAD et al., 2019). Essa realidade tem sido viabilizada pelo aprimoramento dos materiais utilizados na engenharia civil. A combinação desses fatores contribui significativamente para a redução da massa e da rigidez, assim como resulta em baixos índices de amortecimento intrínseco (Pavic et al., 2001).

Nesse contexto, os terremotos, em especial, podem ser potencialmente perigosos para a integridade das edificações. Conforme Tedesco, McDougal e Ross (1999), o período natural de vibração (T) é o parâmetro determinante na magnitude dos efeitos dinâmicos de um carregamento em uma estrutura. Definido como o intervalo de tempo necessário para que a estrutura complete um ciclo de vibração livre, estabelece o critério fundamental para a caracterização do carregamento. Se o tempo de aplicação da carga for longo em comparação ao período natural da estrutura, não ocorre efeito dinâmico significativo e a carga pode ser considerada estática. Por outro lado, se o tempo de aplicação da carga for próximo ao período natural da estrutura, esta induz efeitos dinâmicos significativos. Por isso, é importante que, desde a concepção inicial de uma estrutura, sejam avaliados seu comportamento e sua resistência quanto aos efeitos dos deslocamentos sísmicos.

Diante desse cenário, o presente trabalho porpõe o desenvolvimento de uma ferramenta de ensino e aprendizagem sobre os efeitos dinâmicos provocados por movimentações de base em edificações. O estudo tem por objetivo apresentar o projeto e os testes iniciais de um protótipo da mesa simuladora de sismos de baixo custo e fácil reprodução, construído utilizando motores de passo e microcontroladores.

Nesse contexto, acelerômetros microeletromecânicos (MEMS, do inglês *Micro-Electro-Mechanical Systems*), como é o caso do MPU-6050 têm sido utilizados para análise modal de estruturas da engenharia civil há bastante tempo, devido as frequências naturais mais baixas desses elementos (LYNCH et al., 2003).

Além disso, para o desenvolvimento de sistemas embarcados, a exemplo de sensores usados em pontes, são comumente utilizadas placas de desenvolvimento de baixo custo e alta acessibilidade, dentre as quais se destacam os sistemas Arduino e ESP. Ambas as arquiteturas se consolidaram como ferramentas fundamentais em projetos de automação, IoT (Internet das Coisas), controle digital e ensino de engenharia, conforme o preconizado por Banzi e Shiloh (2014). Arduino é uma plataforma de código aberto baseada, em grande parte, no microcontrolador da família ATmega da Microchip (antiga Atmel). Ele possui arquitetura RISC de 8 bits, com frequências típicas de operação de 16 MHz, memórias Flash entre 16 kB e 256 kB, e comunicação nativa via portas digitais, analógicas, I2C, SPI e UART (MARGOLIS, 2011). Seu diferencial está na simplicidade da IDE (Integrated Development Environment), na vasta documentação e em uma biblioteca robusta que abstrai a complexidade da manipulação de registradores e periféricos, tornando-o ideal para iniciantes e projetos de médio porte (MONK, 2017).

MATERIAL E MÉTODOS

O sistema eletrônico do protótipo, foi montado utilizando-se um Arduino UNO, dois motores de passo modelo Nema: Stepping motor 42HS60-1504A05-D24, dois drivers A4988, e um MPU-6050.

Os motores de passo são responsáveis pela movimentação da mesa, esse modelo de motor apresenta característica de alto torque em baixas rotações e precisão de posicionamento. Para o acionamento, cada motor foi conectado a um driver A4988, e um potenciômetro foi utilizado para ajustar a corrente enviada para as bobinas do motor por meio do driver, o qual realiza ainda o *microstepping* (divisão de cada passo do motor em frações menores, através dos pinos MS1, MS2 e MS3), o que é essencial para suavizar o movimento da mesa em baixas frequências; a interface de controle utiliza apenas dois sinais digitais, STEP e DIR: STEP responsável por cada pulso que gera movimento e DIR responsável pela direção do movimento. A Figura 1 mostra o esquemático da conexão do driver A4988 e o motor Nema.

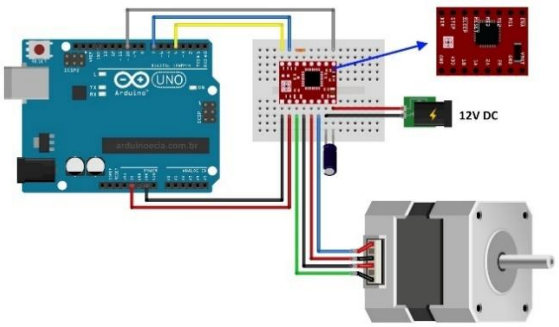

Figura 1. Esquemático de conexão entre o driver A4988, o motor de passo Nema 17 e o Arduíno.

Em relação à parte mecânica da mesa, a base da mesa é composta por uma chapa de madeira de Peltogyne spp. com espessura de 3 cm, comprimento de 110 cm e largura de 46 cm. Sobre essa base foram fixados, por meio de parafusos, mancais fabricados por impressão 3D. Nos mancais, foram alojados dois fusos trapezoidais de 8 mm de diâmetro e dois eixos-guia de 12 mm de diâmetro, conectados por componentes também impressos em 3D, os quais sustentarão, uma chapa de MDF que servirá de base para o modelo de pórtico. Os fusos trapezoidais foram acoplados aos componentes plásticos de sustentação da chapa por meio de castanhas de latão, e aos mancais das extremidades por rolamentos lineares. Já os eixos-guia foram fixados aos mesmos componentes de sustentação da chapa utilizando rolamentos lineares e encaixes nos mancais.

Para o sistema de aquisição dos dados de oscilação do sistema, foi utilizado um MPU-6050 e foi incorporado um display LCD 16x2 para permitir a leitura interativa

dos dados oriundos do sensor. A figura 2 ilustra a conexão do sensor MPU-6050 com o Arduíno.

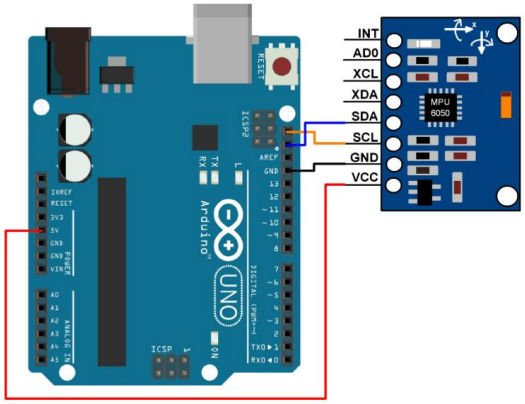

Figura 2. Esquemático de conexão do sensor MPU-6050 ao Arduíno.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O protótipo realiza movimentação somente no eixo x e os testes iniciais foram realizados em estrutura bidimensional. Para a análise inicial foi acoplado o MPU-6050 a um dos suportes da chapa de MDF, como ilustra a Figura 3.

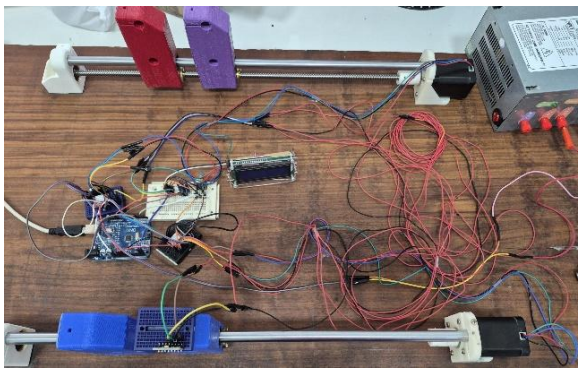

Figura 3. Montagem da estrutura mecânica e do sistema eletrônico do protótipo, com o sensor MPU-6050 acoplado a um dos suportes.

A análise da resposta dinâmica da mesa vibratória, realizada por meio do acelerômetro MPU-6050, evidenciou a presença de componentes vibratórias associadas tanto à frequência de excitação imposta pelo sistema de acionamento quanto às oscilações secundárias decorrentes da dinâmica estrutural do conjunto experimental. Durante os ensaios, a frequência alvo do sistema de acionamento permaneceu aproximadamente constante em 1,22 Hz, sem alterações no potenciômetro de controle, enquanto as frequências medidas pelo sensor variaram entre 2,92 Hz e 7,13 Hz, como mostrado na Tabela 1.

Instante de leitura	Frequência MPU (Hz)	Aceleração X (m/s²)	Frequência alvo do motor (Hz)	Frequência atual do motor (Hz)	Tensão do potenciômetro (V)
1	2,92	10,29	1,22	1,22	0,81
2	4,23	3,56	1,22	1,22	0,79–0,83
3	4,97	7,21	1,22	1,22	0,79–0,81
4	6,23	9,69	1,22	1,22	0,79–0,81
5	6,19	7,16	1,22	1,22	0,81–0,83
6	5,32	14,61	1,2	1,22	0,79–0,81
7	6,34	10,58	1,2	1,2	0,79–0,81
8	7,36	13,36	1,22	1,22	0,79–0,81
9	7,13	16,33	1,22	1,22	0,79–0,81

Tabela 1 – Resultados das medições obtidas por meio do sensor MPU-6050.

Tal comportamento está associado ao fato de que o MPU-6050 realiza medições de aceleração linear da estrutura, sendo altamente sensível a componentes vibratórias secundárias, harmônicos mecânicos, impactos decorrentes da inversão brusca do movimento dos motores de passo e vibrações estruturais locais da mesa. Dessa forma, as leituras obtidas não representam exclusivamente o movimento principal de vai e vem da estrutura, mas também as oscilações de maior frequência superpostas ao deslocamento dominante.

Observou-se ainda que o método de cálculo adotado, baseado em cruzamentos por zero do sinal de aceleração, apresentou elevada sensibilidade a ruídos e microvibrações, contribuindo para a dispersão das frequências instantâneas registradas. Apesar dessas limitações instrumentais, os resultados mostraram coerência qualitativa com o comportamento dinâmico esperado para sistemas vibratórios excitados por motores de passo, permitindo identificar tendências de resposta estrutural e evidenciando a necessidade de aplicação futura de técnicas de filtragem digital e processamento espectral para refinamento das medições experimentais.

Com o objetivo de investigar numericamente o comportamento esperado da mesa vibratória sob condições controladas, desenvolveu-se paralelamente uma modelagem computacional em Python baseada em parâmetros físicos representativos do sistema real. Diferentemente da primeira modelagem, a simulação computacional incorporou características dinâmicas mais próximas da resposta física da estrutura, incluindo limitações cinemáticas dos motores de passo, flexibilidade estrutural, amortecimento viscoso equivalente, saturação dinâmica e modelagem de resposta estrutural por meio de sistema massa-mola-amortecedor representado por função de transferência de segunda ordem. A excitação sísmica sintética foi construída a partir da combinação de múltiplas senoides moduladas entre 1 Hz e 15 Hz, posteriormente escaladas para aceleração de pico equivalente a aproximadamente 0,3 g, valor compatível com a capacidade dinâmica estimada da mesa experimental.

Os resultados computacionais (Figura 4) demonstraram significativa redução das oscilações espúrias observadas experimentalmente, apresentando comportamento mais estável e convergência gradual da frequência detectada para valores próximos da frequência dominante do sistema. Observou-se ainda que o sinal processado apresentou periodicidade visualmente mais regular, evidenciando maior eficiência das técnicas de filtragem e validação temporal implementadas.

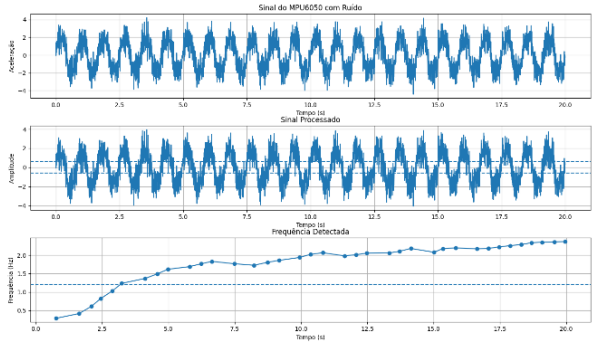

Figura 4. Resultados da simulação computacional do comportamento da mesa utilizando Python.

CONCLUSÃO

Os resultados experimentais obtidos demonstraram a viabilidade da utilização de motores de passo NEMA17 associados ao acelerômetro MPU-6050 para a análise preliminar do comportamento dinâmico de uma mesa vibratória de movimento linear alternado. Durante os ensaios, verificou-se que a frequência de excitação imposta pelo sistema de acionamento permaneceu praticamente constante, enquanto as frequências registradas pelo acelerômetro apresentaram maior variabilidade. Tal comportamento foi associado à elevada sensibilidade do sensor às componentes vibratórias secundárias presentes no sistema, incluindo harmônicos mecânicos, vibrações estruturais locais e oscilações transitórias decorrentes das inversões bruscas de movimento dos motores de passo.

Observou-se ainda que o método de aquisição e processamento empregado, baseado na análise do sinal de aceleração linear da estrutura, mostrou-se capaz de identificar tendências de resposta dinâmica do sistema, embora tenha apresentado sensibilidade significativa a ruídos e componentes vibratórias de alta frequência. Apesar das limitações verificadas, os resultados obtidos apresentaram coerência qualitativa com o comportamento esperado para sistemas submetidos à excitação mecânica periódica, evidenciando o potencial da instrumentação proposta para aplicações experimentais de baixo custo voltadas à análise de vibrações estruturais.

Por fim, conclui-se que o sistema desenvolvido constitui uma base experimental adequada para estudos futuros envolvendo aprimoramento da aquisição de sinais, implementação de técnicas de filtragem digital, análise espectral e refinamento do controle de movimento da mesa vibratória, visando aumentar a precisão das medições e a confiabilidade dos resultados experimentais.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento a todos que colaboraram para a realização dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15421: projeto de estruturas resistentes a sismos – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

NÓBREGA, P. G. B.; NÓBREGA, S. H. S. Perigo sísmico no Brasil e a responsabilidade da engenharia de estruturas. *HOLOS*, Natal, v. 4, n. 4, p. 162–175, 2016. Disponível em: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=481554867016. Acesso em: 21 ago. 2025.

MUHAMMAD, Z.; REYNOLDS, P.; AVCI, O.; HUSSEIN, M. Review of pedestrian load models for vibration serviceability assessment of floor structures. *Vibration,* v. 2, n. 1, p. 1–24, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/vibration2010001.

PAVIC, A.; REYNOLDS, P.; WALDRON, P.; BENNETT, K. J. Critical review of guidelines for checking vibration serviceability of post-tensioned concrete floors. *Cement and Concrete Composites*, v. 23, n. 1, p. 21–31, 2001. DOI: https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00069-X.

TEDESCO, J. W.; MCDOUGAL, W. G.; ROSS, C. A. *Structural dynamics: theory and applications*. Menlo Park: Addison-Wesley, 1999.

LYNCH, Jerome P.; SUNDARARAJAN, Arvind; LAW, Kincho H. et al. Field validation of a wireless structural monitoring system on the Alamosa Canyon Bridge. In: *SMART STRUCTURES AND MATERIALS 2003: SMART SYSTEMS AND NONDESTRUCTIVE EVALUATION FOR CIVIL INFRASTRUCTURES,* 2003. Proceedings [...]. Bellingham: SPIE, 2003. DOI: https://doi.org/10.1117/12.482712.

BANZI, Massimo; SHILOH, Michael. *Getting started with Arduino*. 3. ed. Sebastopol: Maker Media, 2014.

MONK, Simon. *Programming Arduino: getting started with sketches*. 2. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2017.