

Development of a Vibration Measurement System for Bridges

Ricardo Schleder Tozetto, Zacarias Chamberlain Pravia, Adriano Toazza and Francisco Dalla Rosa

Abstract—Traditionally, the bridge survey has been carried out based on visual inspections, which usually do not detect hidden structural failures. This work describes the development of a structural monitoring system to measure the bridge's dynamical behavior, to support structural verification and retro-analysis procedures. Also, the motivation for this research is the absence of cost-effective methods in Brazil to perform this structural evaluation. To define the hardware requirements, a bibliographic review about modal analysis and structural identification is carried out. Beyond the hardware project of the electronic device has considered variables associated with the operational modal analysis, and observing the steps of construction of the sensors, microcontroller, and computational communication, as well as the budget restrictions. The laboratory calibration tests were performed in order to grant the device reliability. The performance evaluation has indicated that the device is able to acquire 303 samples per second, with 16 bits precision from the three-axis, as well as to support a $\pm 8G$ range. The sensors calibration was accomplished using a shaker device and calibrated PCB accelerometer attached to a high-performance data acquisition system. The device validation was performed in a bridge located in Passo Fundo, southern Brazil, which has been detailed studied in the literature.

Index Terms—Instrumentation, Sensors, SHM, Dynamics, Accelerometer.

I. INTRODUÇÃO

Como importantes componentes da infraestrutura viária ao redor do mundo, as chamadas Obras de Arte Especiais (OAEs) são estruturas vitais para que as funções de transporte básicas em um país sejam efetuadas com sucesso. Normalmente estão localizadas em passagens de acidentes geográficos como rios, lagos, depressões ou mesmo através de outras linhas de infraestrutura. Todavia, como qualquer tipo de estrutura, estas sofrem com o estresse causado pela ação do clima e através do próprio uso [1]. Com isso, falhas como fissuras, deformações, corrosão e demais efeitos [2] surgem, os quais ameaçam o desempenho da estrutura e consequentemente, expõem a riscos os usuários de pontes, viadutos ou passarelas. Nos Estados Unidos, segundo Gangone, Whelan e Janoyan [3], cerca de 27% das pontes presentes na malha viária do país encontram-se em situação estrutural deficiente. No

Brasil, dados apresentados por Oliveira, Grecco e Bittencourt [4], indicam que de um total de 4750 OAEs investigadas em rodovias federais, cerca de 42% necessitam de algum tipo de reparo. Através desse cenário, surge a necessidade de verificação e inspeção dessas estruturas, com o intuito de permitir a manutenção preventiva e consequentemente, reduzir a probabilidade de falhas que possam resultar em vítimas fatais e perdas econômicas [5].

Atualmente, as avaliações das OAE no Brasil seguem as recomendações propostas pela norma NBR 9452:2016 [6], as quais são similares as sugestões indicadas pela norma FHWA NHI 12-049 [7]. Ambas as avaliações têm sido aplicadas com sucesso no gerenciamento de pontes a nível de rede, uma vez que demandam de corpo técnico especializado e credenciado para o levantamento das condições estruturais dos elementos dessas infraestruturas. Apesar das sugestões apresentadas pelo FHWA [7] no que diz respeito ao monitoramento avançado de pontes, no Brasil essa ainda não é uma prática comum. Todos os documentos encontrados nos materiais dos órgãos reguladores se baseiam em inspeções rotineiras, compostas principalmente pela análise visual da estrutura, e não trazem nenhum artifício tecnológico dedicado à tarefa de inspeção de OAEs. Esses procedimentos normalmente são adequados para a gestão desse tipo de infraestrutura a nível de rede, porém, não apresentam qualidade de dados compatível a nível de avaliação de projeto e pecam por não conseguirem detectar problemas estruturais causados por mudanças nas características nos materiais que compõem a estrutura ou que ficam escondidos em partes não expostas[8]. Outra maneira de avaliar estruturas já estabelecidas são os ensaios estáticos e dinâmicos. Esses procedimentos podem revelar condições importantes a qualquer metodologia de manutenção ou reparo. Todavia, caso uma avaliação incorreta seja feita, o especialista limita-se as soluções conservadoras e superdimensionadas presentes em códigos e normas para poder contar com certa confiabilidade [9].

Em outro sentido, pesquisas publicadas nos últimos anos trazem uma série de novas técnicas para a avaliação de estruturas. O uso do diagnóstico de estresse, sensores de temperatura [10] e algoritmos desenvolvidos para a análise estrutural [11] e [12] trazem uma nova perspectiva sob o campo do gerenciamento de infraestrutura e a retro-análise estrutural. Além disso, o avanço de tecnologias de armazenamento e transmissão de dados impulsiona o desenvolvimento de novos dispositivos inteligentes direcionados ao entendimento do comportamento de estruturas complexas [13]. Uma das vertentes mais proeminentes nesse campo de estudo é o uso dos dados de vibração para análise da situação da estrutura. Como sabe-se através da literatura clássica de Engenharia Estrutural,

R. S. Tozetto, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 99052-900 Brazil e-mail: ricardo-tozetto23@gmail.com

Z. C. Pravia, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 99052-900 Brazil e-mail: zacarias@upf.br

A. Toazza, Department of Electrical Engineering, University of Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 99052-900 Brazil e-mail: toazza@upf.br

F. Dalla Rosa, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 99052-900 Brazil e-mail: dallarosa@upf.br

Manuscript received XXXXX, 2020; revised XXXXX XX, XXXX.

as estruturas podem oscilar conforme excitações externas e apresentarem efeitos dinâmicos e Bachmann et al [14] sinaliza que as estruturas de pontes, viadutos e passarelas também possuem efeitos dinâmicos caso sejam excitadas através de perturbações. Essas perturbações são inseridas na estrutura devido, principalmente, a passagem de veículos e suas interações com o pavimento, ou mesmo choques acidentais. A partir daí, um novo campo de estudo abriu-se com a Análise Modal Experimental (AME) e a Análise Modal Operacional (AMO), que servem como importantes ferramentas para a análise estrutural, permitem o correto monitoramento das variáveis e abrem possibilidades de calibração de modelos numéricos [15], separando dos estímulos externos a resposta dinâmica, possibilitando que sejam avaliadas características muito importantes para a estrutura, como as frequências naturais de vibração [16], os modos de vibração e também as taxas de amortecimento do objeto estudado [17]. Dessa forma, segundo Wardlaw, Karaman e Karsilayan [18], a simples medição das respostas dinâmicas pode ter um papel decisivo para o diagnóstico de estruturas, uma vez que pode detectar diversos problemas de falhas estruturais quando comparada com testes anteriores da estrutura intacta.

Por outro lado, as OAEs estão sujeitas ao desgaste durante a sua vida útil e têm que suportar cargas cada vez maiores circulando através de suas estruturas [19] [20]. Além disso, caso o desgaste aumente, os gastos para a manutenção e recuperação podem tornar-se significativamente altos [9]. Assim, dada a importância que as estruturas de obras de arte especiais tomaram no mundo moderno, a correta conservação, manutenção ou reconstrução são tarefas importantes quando levados em consideração os riscos financeiros e vitais que colapsos ou falhas dessas estruturas podem trazer a sociedade como um todo. Entretanto, o alto custo de métodos ou equipamentos especializados para o monitoramento de integridade estrutural (MIE) e retro-análise faz com que os prejuízos mencionados multipliquem-se com o aumento da idade e do uso da infraestrutura existente. Logo, o desenvolvimento e utilização de um sistema de baixo custo projetado para esse tipo de aplicação poderia evitar perdas enormes, já que o mesmo seria capaz de fornecer subsídios para propostas de manutenção e reconstrução mais eficientes e, acima de tudo, evitar acidentes catastróficos.

Com vista a essas necessidades, propõe-se um sistema que permita avaliar quantitativamente o estado de obras de arte especiais através de parâmetros vibratórios. Como esse equipamento deve ser projetado para ser instalado em estruturas de pontes, viadutos e passarelas, tem a obrigação de possuir características de robustez e versatilidade. Dentre elas, pode-se citar a flexibilidade com relação a sua alimentação de energia elétrica, resistência a exposição aos elementos do tempo, - como chuva e poeira - facilidade de comunicação de dados - seja ela com ou sem fios - e ter a sensibilidade de medição necessária as técnicas de análise de monitoramento de integridade estrutural ou retro-análise de estruturas. Para tanto, o presente trabalho concentra-se no processo de síntese e projeto do dispositivo, assim como sua posterior validação através de testes em laboratório e ensaios de campo. Ao final são apresentados os resultados encontrados, além de

comentários com relação a continuação posterior da pesquisa.

A. Dispositivos de Monitoramento Existentes

O uso e desenvolvimento de equipamentos de monitoramento de estruturas é um assunto crescente e conta com diversos pesquisadores, inclusive para o monitoramento de estruturas não convencionais, como de equipamentos aeroespaciais [21] e de pás de turbinas eólicas [22] e [23]. As técnicas de detecção e ensaio são variadas, porém as mais utilizadas são as que adquirem informações através da vibração.

Noel et al [24] desenvolve uma revisão dos principais algoritmos de processamento utilizados na detecção de falhas e as tecnologias de transmissão de dados disponíveis, assim como sua escalabilidade. Ademais, os autores listam os tipos de sensores mais utilizados, citando os acelerômetros, *strain gages*, sensores de corrosão, *Linear Voltage Differential Transducers* (LVDTs), sensores baseados em fibra ótica e sensores baseados em RFID (*Radio Frequency Identification*) [25]. Na Fig. 1, os autores apresentam alguns métodos de detecção encontrados em sua revisão bibliográfica. Outra revisão é encontrada no trabalho de Sabato, Niezrecki e Fiortino [26]. Os autores, por sua vez, concentraram-se em analisar as diferentes tecnologias de sensores de aceleração. Além disso, estudos sobre fadiga utilizam-se de sistemas de monitoramento de integridade estrutural para propor e executar análises [2] [20].

Taxonomia	Domínio do tempo	ARMA
		Ibrahim
		Identificação de subespaços
		Matriz de covariância
	Domínio da frequência	Seleção de picos
		Identificação de modos complexos
		Polinômio de frações racionais
		Transformada de Hilbert-Huang

Fig. 1. Diferentes métodos de processamento numéricos de detecção segundo Noel et al [24]

Em Ali et al [27] encontra-se um sistema desenvolvido com nós sensores de baixa potência enviando dados a uma estação base construída com um computador de placa única (*single board computer*) e modem 3G/4G. O sinal medido pelos acelerômetros é recebido na estação base, onde é aplicado processamento digital de sinais utilizando técnicas como a FFT (*Fast Fourier Transform*) e HHT (*Hilbert Huang Transform*). Além disso, os autores procederam com um estudo de caso de aplicação em uma ponte na cidade de Karachi, no Paquistão.

Ao final do estudo, os autores indicaram bons resultados na análise, embora a frequência de amostragem atingida tenha sido na faixa das 40 amostras por segundo.

Li Zhu et al [28] propõe uma plataforma de sensoriamento de vibração chamada Xnode, baseado em uma placa com microprocessador, uma interface de rádio e um módulo com acelerômetro tri-axial. Após a construção, o conjunto é posto em teste e passa por uma bateria de ensaios de validação em laboratório e em campo. A metodologia contou com testes comparativos entre o sensor desenvolvido e acelerômetros de referência em um shaker de 6 graus de liberdade totalmente controlado.

Há também a aplicação da detecção de vibrações em estruturas expostas a abalos sísmicos, em que um sistema de medição de aceleração alimentado por baterias e com comunicação sem fio registra oscilações a partir de um valor mínimo, funcionando apenas em casos de terremotos [29]. Já Zambrano Vizueté et al [30] propõe uma rede distribuída de baixo custo, composta por *smartphones* dotados de acelerômetros para a detecção e alertas de terremotos.

Yao et al [31] traz uma técnica de detecção de vibração em estruturas que utiliza um sensor do tipo strain gage controlando diretamente um modulador de RF (Radiofrequência), fazendo com que o sinal de rádio seja alterado conforme as vibrações da estrutura. Assim, um receptor capaz de decodificar essas informações pode retornar os sinais de vibração detectados pelo sistema. Os pesquisadores utilizaram ainda a coleta de energia através de células solares, habilitando o sistema a trabalhar em locais sem a presença de redes de distribuição de energia elétrica.

O artigo de Gimmarini et al [32] traz um sistema desenvolvido com objetivo semelhante, entretanto, usa como referência de tempo um módulo GPS (*Global Positioning System*). Inclusive, como somente foram executados testes em laboratório, os pesquisadores tiveram que instalar uma antena repetidora para o sinal de GPS do exterior no interior do laboratório. Além disso, usa um acelerômetro MEMS (*Microelectromechanical systems*) analógico, com uma taxa de aquisição de 1kHz, entretanto, com um nível de ruído bem grande se comparado aos sinais medidos. Os autores não fizeram testes a campo e propuseram melhorias no Hardware.

O *paper* de Galdino e Cury [33] traz o desenvolvimento de um protótipo de monitoramento de integridade estrutural desenvolvido com Arduino e o acelerômetro MPU-6050. No entanto, no dispositivo desenvolvido não existe nenhum sistema de tempo-real para sincronismo do sistema, o que é imprescindível para a análise modal de estruturas. O autor, além disso, executou apenas testes laboratoriais.

Ribeiro e Lameiras [34], descrevem uma série de ensaios para avaliação de acelerômetros. Para isso, os autores desenvolveram um *datalogger* experimental com cartão SD (*Secure Digital*). Um ponto interessante é que os autores compararam os valores encontrados através dos acelerômetros com simulações de MEF (Método dos Elementos Finitos) e com valores encontrados com acelerômetros de referência. Todavia, o trabalho não foca em um sistema de monitoramento de integridade estrutural propriamente dito, mas sim em uma avaliação de diversos modelos de acelerômetros MEMS com

o intuito avaliar a aplicabilidade destes em um sistema desse tipo.

Recentemente, outra técnica abordada por pesquisadores é a utilização de celulares e tablets munidos de acelerômetros como em [35] e [8]. Essa abordagem prima pelo fácil acesso que esses dispositivos proporcionam a dados de vibração, além do baixo custo envolvido no ensaio.

Embora os estudos acima apresentados propõem soluções para a mensuração de vibrações com o intuito da detecção de parâmetro dinâmicos, algumas limitações ficam evidenciadas. Particularmente, os estudos acima abordados fazem uso de sistemas pouco operacionais, se fazendo assim necessário uma estrutura de suporte auxiliar seja montada em campo. Da mesma forma, apesar do uso de dispositivos móveis como *smartphones* e *tablets* apresente competitividade em termos de custo, tais dispositivos nem sempre apresentam capacidade de realizar o monitoramento destas obras de infraestrutura *in-loco* por longos períodos. Nesse sentido, o presente estudo visa contribuir com o estado da arte voltado ao monitoramento contínuo de OAEs, através do uso de *hardware* próprio e de baixo custo, além de permitir a avaliação de tais obras de infraestrutura remotamente, ao mesmo tempo que poderá fornecer subsídios para um sistema de gerenciamento de pontes.

II. PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO

A análise de estudos anteriores, como Hu [17], dos Santos [36], Brownjohn e Magalhães [37], Zhao e Zhang [1] e Yoon et al [35], realizados com dispositivos de inspeção e monitoramento mostram que há uma grande dificuldade em obter dados relacionados a medição de vibrações, que por sua vez possuem importante correlação com a resposta dinâmica da estrutura. Logo, com base nas necessidades apontadas por esses autores e ainda observando a exigência de que o equipamento tenha custo baixo, se estabelecem as condições de projeto do dispositivo conforme discutido a seguir.

Sendo assim, uma das primeiras etapas do projeto foi a escolha do sensor de aceleração. A definição do sensor de aceleração é baseada em uma série de fatores, dentre os principais podem-se citar a sensibilidade, faixa dinâmica de resposta, taxa máxima de amostragem, quantidade de eixos de medição, interface de dados e a tensão de alimentação. Por outro lado, o dispositivo desenvolvido deve ter a capacidade de enviar dados a um computador, já que as informações de vibração serão analisadas em softwares de processamento numérico. Desse modo, existem diversas maneiras de coletar informações de um sistema de processamento embarcado em um dispositivo como o que será desenvolvido. Devido às limitações de acesso que as OAEs possuem, muitas vezes localizadas em áreas rurais, o ideal é o monitoramento através da rede de internet. Quando isso for possível, pode ser feita através de um sistema de leitura de informações conectado à rede mundial de computadores, com acesso através de IP (*Internet Protocol*). Já quando não houver a disponibilidade de rede de dados, a retirada de informações deverá ser efetuada através de visita ao local. Para que a coleta seja realizada de maneira rápida e fácil, deve-se priorizar a comunicação de

dados através de RF, o qual não exige o deslocamento físico do responsável para executar o upload de dados até o local exato em que está instalado o dispositivo, que muitas vezes é de difícil acesso. Ainda, como os possíveis locais de instalação dos dispositivos estudados muitas vezes são isolados e pode não haver a disponibilidade de rede elétrica, é interessante que o dispositivo funcione sem a presença de rede de distribuição de energia elétrica. Para que isso seja possível, devem ser utilizados dois métodos principais, a utilização de baterias de alta capacidade e a utilização de baterias em conjunção com um sistema de carregamento através de energia renovável.

A. Funcionamento

O principal objetivo de funcionamento do SMV (Sistema de Monitoramento de Vibrações) é realizar as medições de vibrações através de um conjunto de acelerômetros, adequar os dados digitais e enviá-los através de uma rede de computadores ou Internet. Dessa maneira, um computador servirá como cliente dos dados do SMV, recebendo-os a todo instante, conforme as medições são feitas. A partir disso, a análise dos dados de vibração no domínio do tempo poderá ser feita em um ambiente de processamento numérico. A Fig. 2 mostra um pequeno *framework* de como funciona o processo de coleta e análise de dados para a avaliação e inspeção estrutural usando o SMV.

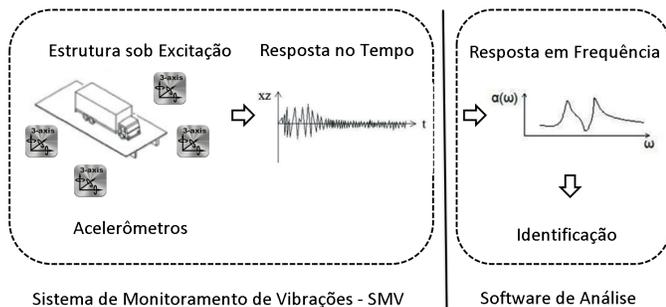


Fig. 2. Coleta e análise de dados para avaliação e inspeção usando o SMV.

B. Hardware

Com base nos requisitos de medição de vibrações, interface de dados, alimentação e funcionamento chega-se a uma proposta de hardware para o SMV. Inicialmente, há a necessidade de instalação de um ou mais acelerômetros através da estrutura, comunicando-se entre si através de uma rede TCP/IP (*Transfer Control Protocol / Internet Protocol*), exigindo que cada nó sensor possua um dispositivo de processamento e conversão entre o sinal do sensor de aceleração e a rede de comunicação digital. Além disso, a alimentação pode ser feita através de placas solares, as quais fornecem energia em corrente contínua para a alimentação dos sensores. Após a conversão, os dados seguem para um *hub* que reúne as informações da rede de sensores e envia diretamente ou mesmo através da internet para um computador cliente que recebe as informações de leitura instantaneamente. A Fig. 3 ilustra simplificada a disposição do sistema.

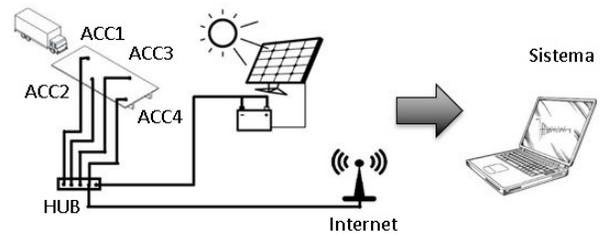


Fig. 3. Proposta de hardware para SMV.

III. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

O primeiro passo do processo de construção do protótipo foi a escolha da plataforma de processamento para os nós sensores. Normalmente, a plataforma pode ser composta por um microcontrolador ou mesmo um dispositivo mais elaborado, como um sistema embarcado rodando em um computador de baixo custo. Todavia, como um dos objetivos durante o projeto do sistema foi manter o custo baixo, escolheu-se um microcontrolador que atendesse a demanda do sistema quanto a velocidade de execução de instruções, arquitetura e processamento de variáveis, memória RAM (*Random Access Memory*), memória de programa e pinos de entrada/saída. Dentre as diversas possibilidades disponíveis, optou-se por um microcontrolador de 16 bits com arquitetura RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) da família dsPIC33F da Microchip, com ciclo de máquina de 25ns, suporte de *hardware* a comunicação serial digital I2C, 16kB de memória RAM, 128kB de memória de programa e oscilador interno.

Com relação ao sensor de aceleração, foram comparados diferentes modelos de acelerômetros disponíveis no mercado, podendo-se citar como opções a família ADXL345 da Analog Devices, a família LIS2D e LIS3D da ST Microelectronics, a série Xtrinsic MMA845xQ da Freescale Semiconductor e a família MPU-60x0 da Invensense. Optou-se pelo sensor MPU-6050. Suas principais características são a tensão de alimentação de 2,375V até 3,46V, presença de giroscópio de três eixos e sensor de temperatura integrados na mesma pastilha, fundo de escala programável de $\pm 2G / \pm 4G / \pm 8G / \pm 16G$, resolução de saída de 16 bits, interface serial digital I2C, interrupções programáveis no próprio sensor, função auto-teste e resistência a choques acidentais de até 10000G. Além disso, a taxa máxima de aquisição é de 1000 amostras por segundo e a densidade espectral de potência de ruído é de $400\mu G/\sqrt{Hz}$ na frequência de 10Hz.

Posteriormente, passou-se ao desenvolvimento do método de comunicação. Assim, entre os requisitos que foram observados durante o desenvolvimento da comunicação, destacam-se a possibilidade de acesso remoto, acesso sem fios, velocidade de comunicação e a perspectiva de comunicação direta com o computador em tempo real. Cumprindo com tais requisitos, a comunicação TCP/IP é escolhida para a transmissão de dados do SMV. Por utilizar o protocolo TCP/IP, a implementação da comunicação através de rede LAN (*Local Area Network*) ou WLAN (*Wireless Local Area Network*) possibilita ainda que o número de acelerômetros utilizados ao instrumentar uma OAE seja limitado apenas pelo valor físico máximo de

endereçamento do hub responsável pela rede e por sua disponibilidade de banda de dados para comunicação. Outro fator preponderante para escolha dessa tecnologia é a flexibilidade desse tipo de comunicação. O sistema desenvolvido permite então que os dados coletados possam ser transmitidos via internet ou mesmo através da própria rede WLAN ou LAN. A escolha desse tipo de tecnologia segue a crescente tendência de criação de dispositivos IoT (*Internet of Things*), que nada mais é que a conexão de equipamentos antes isolados da rede – como por exemplo, sensores, equipamentos, sistemas, atuadores e mesmo telefones móveis – à internet [38], sendo que isso somente é possível devido aos recentes desenvolvimentos de tecnologia de conexão a rede mais baratos [39].

IV. RESULTADOS

Para a verificação do SMV, foi feita uma série de testes de funcionamento em laboratório, simulando as condições reais de trabalho e também a campo. Assim, a calibração e o processo de validação foram realizados como é discutido a seguir.

A. Taxa de Aquisição de Amostras

Para que seja possível a execução de medições em sincronia, o dispositivo possui uma base de tempo confiável de 1Hz proveniente de um sistema de tempo-real ou RTC (*Real Time Clock*). Assim, a cada período de 1s, tem-se um sinal de onda quadrada proveniente do RTC sendo adquirido pelo microcontrolador. Assim, inicia-se o monitoramento de vibração e vão se acumulando amostras através do MPU-6050. Ao final do ciclo de 1s, um novo ciclo é iniciado. Assim foi determinada a taxa de amostragem viável do sistema em 303 amostras por segundo considerando os três eixos de medição (X, Y e Z). Ademais, cada amostra possui dados de medição com 16 bits de precisão nos três eixos de medição, com valor de fundo de escala de $\pm 8G$.

B. Teste com Mesa Vibratória (Análise Individual)

O objetivo desse teste funcional é analisar a acurácia dos valores de aceleração lidos pelo SMV, analisando as frequências captadas pelo sistema através da FFT do sinal e também as amplitudes lidas pelo sistema com relação as mostradas pelo equipamento de referência. Para isso, foi realizado um experimento com excitações determinadas e controladas através de um oscilador mecânico (*shaker*) com frequência conhecida. Os testes foram realizados em paralelo com a utilização do sistema de aquisição de dados (SAD) da National Instruments (NI) modelo CDAQ-9188XT munido com um módulo de leitura diferencial analógica de sensores NI 9234 e um acelerômetro triaxial modelo 356A01 da PCB Piezotronics. Os dados coletados pelo sistema da NI foram realizados através de um algoritmo em ambiente LabVIEW, que permitiu a visualização dos dados em tempo real e também exportar os mesmos em arquivos com formato *.CSV. Como a plataforma oscila – teoricamente - em apenas uma direção, optou-se por alinhar o SMV e o acelerômetro 356A01 na mesma direção de vibração. A Fig. 4 mostra o arranjo montado com a mesa vibratória para o ensaio.

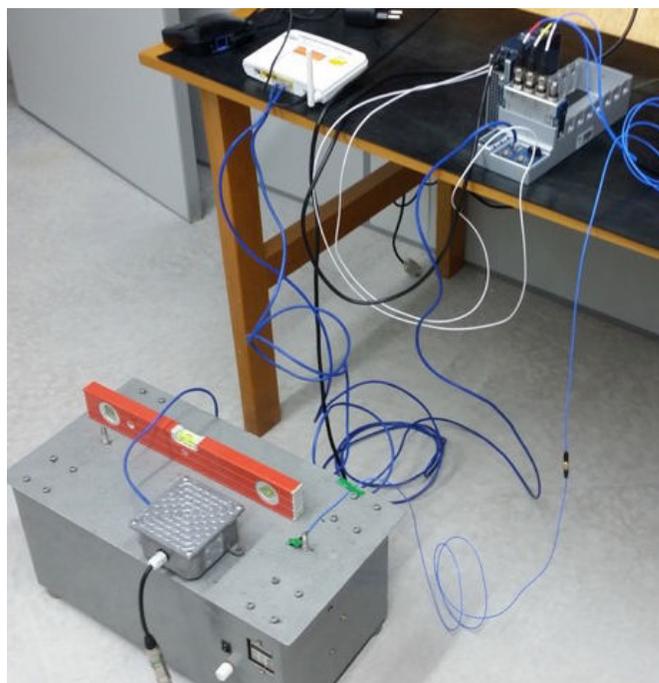


Fig. 4. Ensaio com mesa vibratória.

O procedimento baseou-se na medição da frequência ajustada no *shaker* pelo sistema SMV e o hardware de referência da NI. As frequências estabelecidas nesse estudo foram de 2,5 Hz a 15 Hz e com incrementos de 2,5 Hz, sendo cada amostra ensaiada por um período de tempo de quinze minutos com o *shaker* ajustado no seu valor de frequência. Ao final, os dados foram submetidos a análise numérica através da FFT com o intuito de verificar possíveis diferenças entre o sistema proposto nesse estudo e o sistema da NI. O gráfico da Fig. 5 mostra como os dados encontrados se correlacionam.

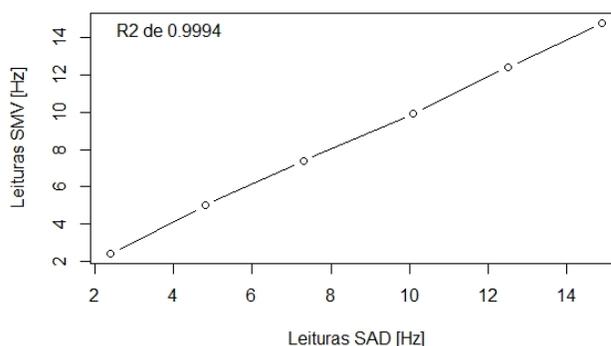


Fig. 5. Gráfico das leituras do SAD versus leituras do SMV.

C. Teste de Campo

O teste de campo foi realizado em um viaduto localizado sobre a rodovia BR-285 na cidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, Brasil ($28^{\circ}13'51,08''S$ e $52^{\circ}24'01,26''W$) e consiste em

duas vigas, cinco travessas, quatro pilares e quatro tampas. A escolha foi feita devido a estrutura já ter sido estudada por integrantes do grupo de pesquisa e já possuir dados coletados e analisados no trabalho de Pravia e Braido [8], tornando possível a comparação entre os dados encontrados com o equipamento e as informações coletadas nas pesquisas anteriores. Sua estrutura é de concreto armado, com pavimento asfáltico. As dimensões são de 22,5m de comprimento, 10,2m de largura e vão central máximo de 12,1m. Além disso, Pravia e Braido realizaram simulações numéricas utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), que identificaram três modos de vibração expostos na Tabela I.

TABELA I
FREQUÊNCIAS E FORMAS MODAIS SIMULADAS DO VIADUTO [8]

Modo de Vibração	Frequência	Forma Modal
1	11,64Hz	Torsão
2	12,03Hz	Flexão
3	13,78Hz	Torsão

A disposição dos sensores de aceleração segue a forma apresentada na Fig. 6, que foi escolhida para maximizar a leitura dos sinais de vibração provenientes da estrutura, sendo que os acelerômetros ACC2 e ACC3 foram posicionados exatamente sobre o meio do viaduto com o objetivo de captar as oscilações de maior amplitude em modos de flexão. Além disso, os acelerômetros ACC1 e ACC4 foram instalados próximo a cabeceira para a detecção de outros modos de vibração da estrutura, como os de torsão. Com relação à fixação, os elementos de medição foram fortemente fixados com parafusos, garantindo assim sua correta ancoragem junto a estrutura. A Fig. 6 mostra ainda a disposição dos acelerômetros ACC4, ACC3 e ACC1 próximos ao guarda corpo do viaduto.

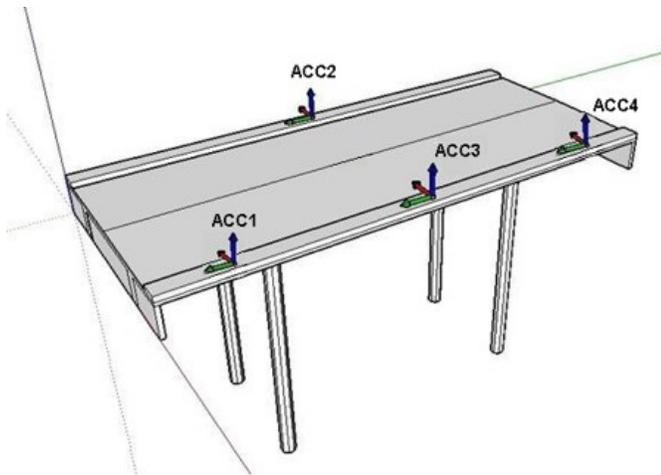


Fig. 6. Disposição dos sensores na estrutura.

Após a fixação e ligação dos sensores e o teste da rede de comunicação entre o computador cliente e os sensores, foi iniciado o período de monitoramento contínuo das respostas oscilatórias do viaduto com a frequência de amostragem de 303 amostras por segundo. O ensaio realizado teve duração

máxima de duas horas, portanto, não sendo necessária a instalação do sistema de alimentação solar, optando-se pelo emprego do conjunto de quatro baterias utilizados no teste da alimentação solar, totalizando uma capacidade de 28Ah. Além dos acelerômetros, foi utilizada uma câmera digital para a filmagem do tráfego que cruzava a rodovia, estabelecendo mais informações para a análise da estrutura.

Depois da coleta de informações procedeu-se a análise dos dados brutos obtidos pelos acelerômetros ACC2 e ACC3, uma vez que as informações dos outros sensores não poderiam ser comparadas diretamente com os resultados encontrados na trabalho de Pravia e Braido [8] devido aos mesmos trazer medições somente no centro do vão do viaduto e que caracterizaram somente o modo de flexão da estrutura. Tal análise contou com a metodologia chamada de *Random Decrement Technique* (RDT) para a extração dos dados de frequência fundamental de oscilação da estrutura. Esse método foi desenvolvido por Cole [40] enquanto analisava a resposta de estruturas aeroespaciais submetidas a cargas ambientais. A técnica é aplicada no domínio do tempo, sendo que as respostas a cargas operacionais são transformadas em funções de decremento randômico e as respostas resultantes são as vibrações livres da estrutura [41]. Assim, ao final, a aplicação do algoritmo da FFT leva a identificação das frequências naturais amortecidas da estrutura através do Método *Peak Picking*. Os procedimentos numéricos foram feitos em ambiente MATLAB.

Como resultado após a aplicação da RDT nos dados extraídos dos acelerômetros foi obtida a resposta gráfica da Fig. 7, em que pode se comparar o formato da onda claramente com uma função senoide amortecida, clássica nas respostas de oscilação amortecida transiente de estruturas [41]. Além disso, após a aplicação da RDT, ainda foi feita a extração da resposta em frequência do sinal resultante, identificando assim a frequência natural resultante da estrutura. Essa resposta pode ser vista na Fig. 8 e observa-se o valor resultante de 12,32Hz como valor dominante no gráfico de densidade espectral de potência.

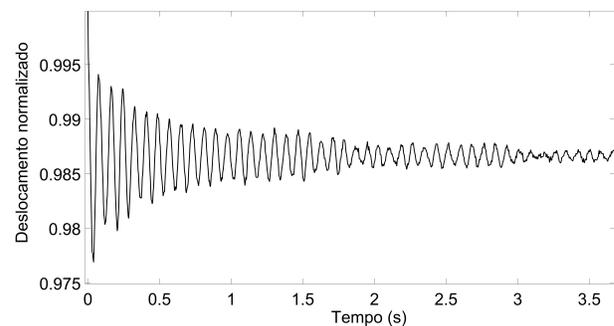


Fig. 7. Resposta do Random Decrement Technique.

Ao final, a análise dos resultados coletados foi realizada através da comparação dos dados levantados com base no estudo de Pravia e Braido [8]. Nesse estudo, os autores realizam o ensaio de medição de acelerações com a utilização de um celular, em três posições sobre o meio do vão, aproximadamente onde foram instalados os acelerômetros ACC2 e

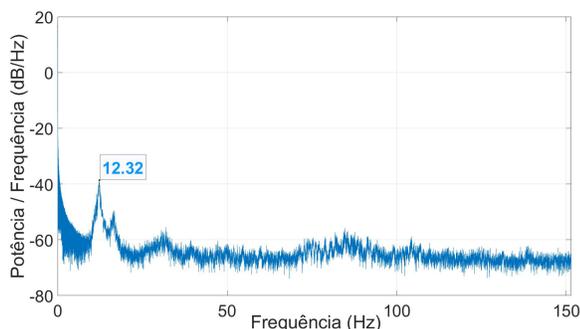


Fig. 8. Densidade espectral de potência do sinal após a RDT.

ACC3. A Tabela II mostra alguns valores encontrados durante o ensaio de Pravia e Braido [8] no Viaduto, bem como sua média.

TABELA II
FREQUÊNCIAS NATURAIS ENCONTRADAS NO ENSAIO DE PRAVIA E BRAIDO [8]

Amostra	Frequência Encontrada
Amostra 1	12,31Hz
Amostra 2	13,08Hz
Amostra 3	11,72Hz
Amostra 4	12,60Hz
Amostra 5	14,45Hz
Amostra 6	13,08Hz
Média	12,87Hz
Desvio padrão	0,85Hz

Observa-se que os resultados médios de Pravia e Braido [8] ficam muito próximos aos encontrados na análise através de RDT, respectivamente, 12,87Hz e 12,32Hz.

D. Estimativa de Custos dos Protótipos

A análise de custos foi realizada com base em consulta dos componentes disponíveis em diferentes fornecedores, totalizando 36US\$. Portanto, pode-se considerar que o equipamento desenvolvido neste estudo apresenta um custo relativamente inferior quando comparado a dispositivos já disponíveis no mercado.

V. CONCLUSÃO

O objetivo desse trabalho foi projetar, desenvolver e testar um protótipo de um sistema de monitoramento dinâmico de estruturas de baixa frequência capaz de efetuar medições contínuas de vibrações que darão suporte aos procedimentos de análise modal operacional e identificação estrutural. Os resultados alcançados durante os processos de calibração e teste, atingiram os objetivos originalmente previstos, e permitem expandir o campo de aplicações do sistema, em outros tipos de estruturas.

O desenvolvimento desse sistema é uma pequena parte do que pode ser feito com relação ao estudo de estruturas através da ajuda do campo de Instrumentação Eletrônica. O ramo de pesquisa pode ser continuado com uma avaliação mais aprofundada de diversos tipos de estruturas civis em

que o equipamento pode ser aplicado, além da continuação do estudo com o Viaduto, incluindo o uso de softwares comerciais de análise modal operacional e a instalação por um período de tempo mais alongado. Sob o ponto de vista do sistema, melhoramentos com o método de alimentação - explorando o campo de *Energy Harvesting* - e de comunicação - com a utilização de tecnologias de LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) - podem ser efetuados. Além disso, a pesquisa acerca de novas tecnologias de sensores e mesmo a utilização de sistemas embarcados ou *smart devices* nunca pode ser descartada. Finalmente, sugere-se ainda a instalação de longo prazo em mais estruturas - inclusive naquelas que já apresentem problemas estruturais - para que se colem mais subsídios para a aprovação do sistema desenvolvido nesse estudo, levando a que o mesmo possa ser utilizado a longo prazo como ferramenta de Gerenciamento de Infraestrutura em pontes, viadutos e passarelas, fornecendo dados de utilização e condição estrutural, tanto em nível de projeto como em nível de rede.

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) apoio financeiro concedido através do Edital Universal/2016 (Processo 427757/2016-9).

REFERÊNCIAS

- [1] J. Zhao and L. Zhang, "Structural damage identification based on the modal data change," *International Journal of Engineering and Manufacturing*, vol. 4, pp. 59–66, 2012.
- [2] Z. W. Chen, Y. L. Xu, and X. M. Wang, "Shms-based fatigue reliability analysis of multiloading suspension bridges," *Journal of Structural Engineering*, vol. 138, no. 3, pp. 299–307, 2012.
- [3] M. V. Gangone, M. J. Whelan, and K. D. Janoyan, "Deployment of a dense hybrid wireless sensing system for bridge assessment," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 7, pp. 369–378, May 2011.
- [4] C. B. L. Oliveira, M. Greco, and T. N. Bittencourt, "Analysis of the Brazilian federal bridge inventory," *IBRACON Structures and Materials Journal*, v., vol. 12, p. 13, 2019.
- [5] V. Alves *et al.*, "Novelty detection for shm using raw acceleration measurements," *Structural Control and Health Monitoring*, v., vol. 22, pp. 1193–1207, February 2015.
- [6] A. NBR, *9452:2016 - Vistorias de pontes e viadutos de concreto - Procedimento*. Abr: ABNT, 2016.
- [7] FHWA, "Dynamic bridge substructure evaluation and monitoring," *McLean: Federal Highway Administration*, vol. 1, 2005.
- [8] Z. M. C. Pravia and J. D. Braido, "Measurements of bridges vibration characteristics using a mobile phone," *Ibracon Structures and Materials Journal*, vol. 8, pp. 721–743, October 2015.
- [9] H. K. Hussain *et al.*, "Evaluation behavior of qing shan concrete bridge under static load test," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 3, no. 7, pp. 677–688, 2011.
- [10] Y. Xia *et al.*, "Field monitoring and numerical analysis of tsing ma suspension bridge temperature behavior," *Structural Control and Health Monitoring*, v., vol. 9, pp. 1405–1413, November 2013.
- [11] J. Li *et al.*, "Damage identification in civil engineering structures utilizing pca-compressed residual frequency response functions and neural network ensembles," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 18, pp. 207–226, 2011.
- [12] J. Morales Valdez, L. Alvarez-Icaza, and J. A. Escobar, "Online identification system for damage location in building structures," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 08, pp. 1283–1290, 2019.
- [13] A. Cunha *et al.*, "Recent perspectives in dynamic testing and monitoring of bridges," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 20, pp. 853–877, 2013.
- [14] H. Bachmann *et al.*, "Vibration problems in structures: Practical guidelines," *Berlin: Birkhauser*, vol. 1, 1991.

- [15] M. Girardi, C. Padovani, D. Pellegrini, M. Porcelli, and L. Robol, "Finite element model updating for structural applications," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 370, p. 112675, 2020.
- [16] C. A. Perez Ramirez, J. P. Amezcua Sanchez, M. Valtierra Rodriguez, D. Camarena Martinez, A. Dominguez Gonzalez, J. R. Rivera Guillen, and O. Chavez Alegria, "High-resolution spectral-analysis for fundamental frequency estimation of high-rise buildings subjected to earthquakes," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 12, pp. 3735–3742, 2015.
- [17] W.-H. Hu, "Operational modal analysis and continuous dynamic monitoring of footbridges," *Universidade do Porto*, pp. 1–248, 2013.
- [18] J. L. Wardlaw, I. Karaman, and A. I. Karsilayan, "Low-power circuits and energy harvesting for structural health monitoring of bridges," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, pp. 709–722, February 2013.
- [19] D. Hester and A. A. González, "A bridge-monitoring tool based on bridge and vehicle accelerations," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 11, no. 5, pp. 619–637, 2015.
- [20] Z. Yu, Z. Shan, J. Yuan, and X. Li, "Performance deterioration of heavy-haul railway bridges under fatigue loading monitored by a multisensor system," *Journal of Sensors*, vol. 2018, p. 5465391, Jan 2018.
- [21] T. Becker *et al.*, "Autonomous sensor nodes for aircraft structural health monitoring," *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, no. 11, pp. 1589–1595, 2009.
- [22] M. Moradi and S. Sivoththaman, "Mems multisensor intelligent damage detection for wind turbines," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 1437–1444, 2015.
- [23] A. Diogo Spacek, O. Hideo Ando Junior, J. Mota Neto, V. Coelho, M. Oliveira, L. Shaeffer, and V. Gruber, "Management of mechanical vibration and temperature in small wind turbines using zigbee wireless network," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 11, no. 1, pp. 512–517, 2013.
- [24] A. B. Noel, A. Abdaoui, T. Elfouly, M. H. Ahmed, A. Badawy, and M. S. Shehata, "Structural health monitoring using wireless sensor networks: A comprehensive survey," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, pp. 1403–1423, thirdquarter 2017.
- [25] M. Freitas Kuhn, G. Petry Breier, and T. G. R. Clarke, "Passive wireless sensor for displacement monitoring in metal structures," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 5, pp. 1353–1357, 2018.
- [26] A. Sabato, C. Niezrecki, and G. Fortino, "Wireless mems-based accelerometer sensor boards for structural vibration monitoring: A review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, pp. 226–235, Jan 2017.
- [27] M. A. Syed Humair Ali, Tariq Mairaj Rasool Khan and M. Zaid, "Wireless Sensor Network-Based Structural Health Monitoring of Bridges Using Advanced Signal Processing Techniques," *Journal of Testing and Evaluation*, 2021.
- [28] L. Zhu, Y. Fu, R. Chow, B. F. Spencer, J. W. Park, and K. Mechitov, "Development of a high-sensitivity wireless accelerometer for structural health monitoring," *Sensors*, vol. 18, no. 1, 2018.
- [29] T. Torfs *et al.*, "Low power wireless sensor network for building monitoring," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 909–915, 2013.
- [30] A. M. Zambrano Vizuete, I. Perez Llopis, C. Palau, and M. Esteve Domingo, "Distributed sensor system for earthquake early warning based on the massive use of low cost accelerometers," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 1, pp. 291–298, 2015.
- [31] J. Yao *et al.*, "Strain gauge-enable wireless vibration sensor remotely powered by light," *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, p. 1109, 2015.
- [32] D. P. M. C. C. . F. M. . C. E. Giammarini, Marco; Isidori, "Design of a low cost and high performance wireless sensor network for structural health monitoring," *Microsystem Technologies*, vol. 22, p. 1845–1853, feb 2016.
- [33] E. Galdino and A. Cury, "Development of low-cost wireless accelerometer for structural dynamic monitoring," *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia*, vol. 2, pp. 10–19, fev. 2017.
- [34] R. R. Ribeiro and R. d. M. Lameiras, "Evaluation of low-cost MEMS accelerometers for SHM: frequency and damping identification of civil structures," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 16, 00 2019.
- [35] S.-W. Yoon *et al.*, "Vibration measurements of steel foot-bridges using mobile-phone," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 470, pp. 777–780, 2014.
- [36] C. A. N. Dos Santos, *Retro-análise de estruturas de pontes por meio de técnicas teórico-numérico-experimentais*. Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ, 2013.
- [37] J. Brownjohn *et al.*, "Ambient vibration re-testing and operational modal analysis of the humber bridge," *Engineering Structures*, vol. 32, pp. 2003–2018, 2010.
- [38] A. Iera *et al.*, "The internet of things," *IEEE Wireless Communications*, vol. 17, no. 6, pp. 8–9, 2010.
- [39] A. Regalado, "The internet of things," *Technology Review*, vol. 117, no. 4, pp. 68–69, 2014.
- [40] H. A. Cole, *On-the-line Analysis of Random Vibrations*. AIAA, aiaa paper ed., 1968.
- [41] J. Rodrigues and R. Brincker, *Application of the Random Decrement Technique in Operational Modal Analysis*. Aalborg: Aalborg, 2005.



Ricardo Schleder Tozetto é formado em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica pela Universidade de Passo Fundo (UPF), mestre em Engenharia pela Universidade de Passo Fundo e Doutorando em Engenharia pela Universidade de Passo Fundo. Tem interesse nas linhas de pesquisa relacionadas a Internet das Coisas, Telecomunicações, Instrumentação, Sensores, Ciência de Dados e Aprendizado de Máquina.



Zacarias Chamberlain Pravia é Professor titular da Universidade de Passo Fundo, Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental / UPF. Engenheiro Civil pela UNAN (Nicarágua), M.Sc. Engenharia civil na área de estruturas na COPPE/UFRJ, D.Sc. em Engenharia Civil na área de estruturas na COPPE/ UFRJ. Atua na área de monitoração e processamento de vibrações de edificações, pontes e grandes estruturas.



Adriano Toazza possui graduação em Engenharia Elétrica: Eletrônica pela Universidade de Passo Fundo (1995), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1998), doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (2010) e MBA em Gestão de Projetos pela Faculdade Meridional (2013). Atualmente é professor titular do curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Passo Fundo. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Instrumentação Eletrônica, atuando

principalmente nos seguintes temas: sistema de aquisição de dados, sistemas embarcados e microcontroladores



Francisco Dalla Rosa É docente/pesquisador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Engenheiro Civil pela Universidade de Passo Fundo (UPF), doutor em Geotecnia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e pós-doutor em Gerência de Infraestrutura pela Texas A&M University (USA). Desenvolve pesquisas principalmente na área de gerenciamento de obras de infraestrutura rodoviária.