

Desenvolvimento de Nó Sensor para Monitoramento de Vibrações com IoT

Fernando dos Santos Alves Fernandes *
Francisco de Assis das Neves ** Luis Guilherme Uzeda Garcia *
Alan Kardek Rêgo Segundo *,***

* *Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração, Universidade Federal de Ouro Preto e Instituto Tecnológico Vale, MG, (e-mail: fernando.santos@aluno.ufop.edu.br, lg.uzedagarcia@gmail.com, alankardek@ufop.edu.br,).*

** *Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, (e-mail: fassis@ufop.edu.br).*

*** *Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal de Ouro Preto, MG.*

Abstract: Risk areas such as slopes, dams, bridges, and buildings are susceptible to damage due to the presence of vibrations generated by earthquakes, winds, explosions, heavy traffic, and traffic of heavy vehicles. For this reason, the presence and levels of vibration in these areas should be monitored. This article describes the development of a sensor node with Low Power Wide Area Network communication interface for monitoring vibrations in hazardous areas. As main requirements, a low-cost microelectromechanical accelerometer and a long-range and low-power data processing and transmission platform were selected. The Internet of Things infrastructure uses a MultiTech Conduit gateway, the Lorient network server, and the Cayenne application platform. Tests with a metallic structure and a bi-supported steel beam showed that the sensor node developed has potential for use in applications for monitoring hazardous areas, as it reached a sampling rate compatible with applications in dams, slopes and analysis of the integrity of structures. In addition, the system was able to detect the natural frequencies of the first three vibration modes in the steel beam test.

Resumo: Áreas de Risco como encostas, barragens, pontes e edifícios são susceptíveis a danos em razão da presença de vibrações geradas por terremotos, ventos, explosões, tráfego intenso ou de veículos pesados. Por essa razão, a presença e os níveis de vibração nessas áreas devem ser monitoradas. Neste artigo, descreve-se o desenvolvimento de um nó sensor com interface de comunicação LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) para monitoramento de vibrações em áreas de risco. Como principais requisitos, foram selecionados acelerômetros microeletromecânicos de baixo custo e plataforma de processamento e transmissão de dados de longo alcance e baixo consumo de energia. Como infraestrutura de Internet das Coisas, foi usado um gateway MultiTech Conduit, o servidor de rede Lorient e a plataforma de aplicação Cayenne. Ensaios com uma estrutura metálica e com uma viga de aço bi-apoiada mostraram que o nó sensor desenvolvido tem potencial para uso em aplicações de monitoramento de áreas de risco, pois atingiu taxa de amostragem compatível com aplicações em barragens, encostas e análise de integridade de estruturas. Além disso, o sistema foi capaz de detectar as frequências naturais dos três primeiros modos de vibração no ensaio com a viga de aço.

Keywords: Accelerometer; IoT; LPWAN; Vibration Analysis; Risk Area Monitoring.

Palavras-chaves: Acelerômetro; IoT; LPWAN; Análise de Vibrações; Monitoramento de Áreas de Risco.

1. INTRODUÇÃO

Encostas, taludes, barragens, pontes e edifícios são exemplos de estruturas naturais ou de engenharia sujeitas a potenciais eventos causadores de danos econômicos, ambientais e de saúde, com eventuais perdas de vidas. Encostas e taludes podem sofrer com eventos classificados como quedas, tombamentos, escorregamentos e corridas (Bezerra, 2019). Barragens de terra ou de rejeitos, conforme o método construtivo (montante, jusante, linha de centro), apresentam diferentes capacidades de resistência e segurança, ficando mais suscetíveis ao processo de liquefação, *piping* e outros tipos de ruptura ou colapso (Cardozo and Cordova, 2019). Estruturas de engenharia como pontes, viadutos, edifícios e barragens de concreto também estão sujeitas a rupturas e colapsos, seja pelo desgaste do tempo, seja em função de algum evento externo como trânsito intenso ou pesado, terremotos, furacões e desastres naturais. Portanto, essas áreas de risco precisam ter sua integridade estrutural monitorada, para evitar potenciais desastres com perdas econômicas e humanas (Moreno-Gomez et al., 2017).

O monitoramento e análise de vibrações dessas estruturas para conhecimento dos *parâmetros modais* do sistema (modos de vibração, frequências naturais e coeficientes de amortecimento), permitem validar modelos (por exemplo, modelos gerados pelo Método dos Elementos Finitos), realizar análises dinâmicas de estabilidade e avaliar o índice de segurança dessas áreas de risco. Os métodos para determinação dos parâmetros modais de uma estrutura podem ser divididos entre aqueles que trabalham no domínio do tempo (Método do Decremento Aleatório, Método de Ibrahim, Identificação Estocástica de Subespaços etc.) e aqueles que trabalham no domínio da frequência (Transformada Rápida de Fourier, Decomposição no Domínio da Frequência, Decomposição do Domínio Avançado da Frequência etc.). Na aplicação dos métodos baseados no domínio da frequência, a FFT (*Fast Fourier Transform*) pode ser utilizada para uma análise prévia e identificação das frequências naturais de uma estrutura (Yoshida, 2016).

Dentre muitos fatores que podem levar ao aumento do risco de desastres nessas áreas (características de projeto de estruturas, métodos de construção, presença de eventos naturais, formação do solo), a vibração destaca-se como um potencial gatilho para a ocorrência de processos que levam a rupturas ou colapsos (Susanto et al., 2019). O monitoramento de vibração permite ainda a análise das frequências naturais e modos de vibração de estruturas, auxiliando no processo de detecção de danos estruturais (O'Brien et al., 2020). Vê-se, portanto, a necessidade de desenvolvimento de sistemas de monitoramento de vibração efetivos, inteligentes e de baixo custo.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

No sistema de baixo custo para monitoramento de integridade de estruturas (MIE) desenvolvido por Silva et al. (2019), a plataforma de hardware utilizada foi um Arduino, a tecnologia de transmissão foi Bluetooth e os dados processados com o auxílio de um aplicativo para *smartphones*. O objetivo do sistema era coletar dados de deformação, deslocamento e força, portanto, os sensores

utilizados foram extensômetros, transdutores de deslocamento e células de carga. Os dados coletados pelo aplicativo móvel também eram transmitidos via Internet. A metodologia utilizada para validação do sistema proposto foi a comparação com dados adquiridos por um equipamento comercial de referência.

O módulo sensor sem fio desenvolvido por Priswanto et al. (2019) utiliza um acelerômetro MMA7361L, de três eixos, com tecnologia de sistemas microeletromecânicos ou MEMS (*micro electro-mechanical systems*), em conjunto com um microcontrolador PIC16F873 e transceptores de radiofrequência (RF) YS-C20K, para monitoramento de saúde de estruturas ou SHM (*Structural Health Monitoring*). O sistema é capaz de detectar até 30° de inclinação e vibrações com uma sensibilidade de 80 V/g. Segundo os autores, a comunicação sem fio pode alcançar até 2 km de distância, entre nó e estação central. O módulo RF utilizado caracteriza o nó sensor como um dispositivo LPWAN, operando a 433 MHz e modulação GFSK, no entanto, um PC (*Personal Computer*) é o responsável pelo gerenciamento dos nós, atuando como *gateway*.

Tozetto et al. (2021) propõem um Sistema de Monitoramento de Vibrações (SVM), para realizar medições de vibrações com acelerômetros do tipo MEMS, como suporte à coleta de dados para análise, avaliação e inspeção de estruturas de Obras de Arte Estruturais (OAE). O sistema, que transmite os dados via protocolo TCP/IP a um computador pessoal, é composto por um microcontrolador de 16 bits, da família dsPIC33F da Microchip. O módulo sensor de vibração escolhido para compor o sistema foi o MPU-6050, da Invensense, composto por acelerômetros e giroscópios de 3 eixos e sensor de temperatura. O sistema é capaz de realizar coletas com uma taxa de amostragem de 303 Hz e foi calibrado com o auxílio de um sistema de aquisição de dados e acelerômetro comerciais, além de um oscilador mecânico (*shaker*), com frequência conhecida. A validação do sistema se deu através da comparação de resultados experimentais com estudos anteriores em um viaduto em Passo Fundo, RS.

Embora os trabalhos acima mencionados proponham soluções inovadoras para o monitoramento da integridade de estruturas, algumas limitações em termos de flexibilidade dos sistemas de aquisição de dados, como o uso de cabos, baixa taxa de amostragem, e/ou capacidade reduzida de transmissão de dados à distância, podem comprometer sua aplicabilidade como sistemas para o monitoramento contínuo. Nesse sentido, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo de nó sensor com interface de comunicação LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) para monitoramento de vibração por meio de Internet das Coisas (IoT), com o intuito de verificar sua aplicabilidade no monitoramento de áreas de risco.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do protótipo, a implantação da rede de Internet das Coisas e os ensaios de vibração foram realizados no Laboratório de Tecnologias Industriais do Departamento de Engenharia de Controle e Automação, no Campus Morro do Cruzeiro, na Universidade Federal de Ouro Preto e no seu entorno.

3.1 Requisitos dos sistema

A determinação dos parâmetros comuns aos sistemas de monitoramento para as diferentes áreas de risco, representados pela Tabela 1, foi feita a partir dos estudos relacionados ao monitoramento de vibração em barragens de terra ou de concreto, monitoramento de vibração em estruturas de engenharia civil, como pontes, edifícios e monitoramento de vibração em encostas, realizados por Fernandes (2020).

Tabela 1. Requisitos básicos de um sistema sem fio para monitoramento de áreas de risco.

Sistema de aquisição de dados	
Resolução canais A/D	16 bits
Taxa de amostragem	até 1 kHz
Arquitetura computacional	
Tamanho barramento	8 a 32 bits
Memória de programa	mínimo de 4 kB
Memória de dados	mínimo de 32 kB
Canais de rádio sem fio	
Alcance outdoor	entre 290 m e 1640 m
Taxa de dados	maior do que 5 kbps

Além dos requisitos mencionados, é importante que o sistema ofereça: baixo consumo de energia, alta cobertura em área urbana, boa sensibilidade, escalabilidade e segurança (criptografia, por exemplo) (Meireles, 2018).

A arquitetura de rede proposta na Figura 1 é constituída por: nós sensores de vibração, denominados dispositivos finais (*End-devices*); dispositivos concentradores (*Gateways*), que gerenciam os nós sensores sob sua cobertura, retransmitindo os dados para a próxima camada; servidores de rede (*Network Servers*), responsáveis por gerenciar os pacotes de dados recebidos dos concentradores, encaminhando-os para a camada de aplicação; e camada de aplicação, composta por seus servidores de aplicação (*Application Servers*), onde os dados podem ser analisados e entregues como serviços aos clientes.

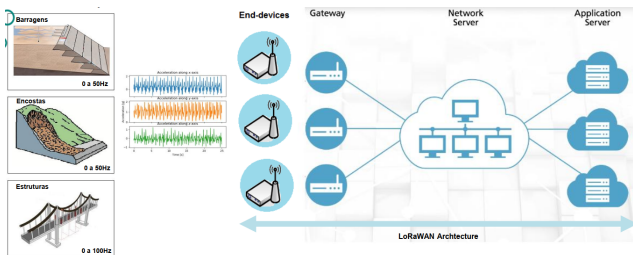


Figura 1. Arquitetura da rede LPWAN para monitoramento de vibração em áreas de risco.

O uso da tecnologia LoRa/LoRaWAN se deu com base nos estudos realizados por Meireles et al. (2018a,b), em que é apresentada uma metodologia para escolha de tecnologias LPWAN para implantação de redes de Internet das Coisas em regiões montanhosas, voltadas ao monitoramento e alerta de emergência em áreas de risco. Uma rede piloto foi implantada usando dois gateways Multitech Conduit mLinux, modelo MTCDTIP-H5-220L-915. A escolha se deu ainda, porque a tecnologia LPWAN LoRa opera em faixa de espectro não licenciada.

Neste trabalho, a rede é composta por apenas um gateway do mesmo modelo e pela mesma plataforma de serviço

de aplicação (myDevices Cayenne). O *Network Server* utilizado foi o Loriot¹. O processo de registro e integração dos elementos da rede é descrito em detalhes por Fernandes (2020).

3.2 Protótipo do nó sensor

Para desenvolver o protótipo do nó sensor, foi selecionado o módulo sensor MPU-6050, que oferece uma gama de configurações relacionadas a operações em modo de baixo consumo de energia e atende aos requisitos de taxa de amostragem do estudo: até 1000 Hz. A placa de desenvolvimento utilizada para a implementação do nó sensor foi a ESP32 LoRa, desenvolvida pela Heltec. Como sugere o nome, o Heltec WiFi LoRa 32 possui um conjunto ESP32, integrado com o transceptor LoRa SX1276 (desenvolvido pela Semtech).

Os dois principais componentes e a primeira versão do protótipo do nó sensor desenvolvido podem ser vistos na Figura 2.

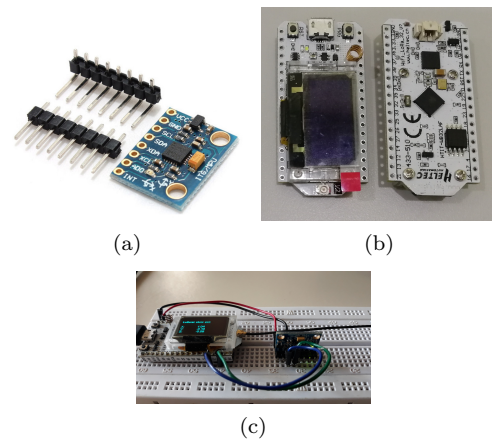


Figura 2. Módulo MPU6050 (a), plataforma computacional Heltec WiFi LoRa 32 (b) e protótipo utilizado nos primeiros testes (c).

Na implementação do nó sensor, três diferentes estratégias de coleta e transmissão de dados foram estudadas:

- E1: Uma leitura dos acelerômetros é realizada num intervalo de tempo predefinido e, assim que o pacote de dados encontra-se disponível, os valores de aceleração dos 3 eixos (X, Y e Z) são transmitidos.
- E2: A partir de uma série de leituras das acelerações dos 3 eixos do MPU-6050O, realizadas num intervalo de tempo predefinido, o maior pacote possível de dados é construído, e só então transmitido. O tamanho do pacote e intervalo de tempo são limitados pelas configurações da tecnologia LoRa.
- E3: Uma série de leituras dos sensores é realizada no menor tempo possível, a transformada rápida de Fourier é calculada e apenas a frequência de maior magnitude é transmitida.

O intuito foi verificar o atendimento aos requisitos de taxa de amostragem necessárias a cada tipo de aplicação, bem como, futuramente, avaliar o impacto dessas diferentes estratégias no consumo de energia dos nós sensores,

¹ <https://www.loriot.io/>

considerando os custos de processamento e transmissão de dados.

Os firmwares foram implementados por meio da IDE (Integrated Development Environment) do Arduino (plataforma *Open Source* para desenvolvimento de protótipos eletrônicos²). Foram utilizadas as bibliotecas desenvolvidas para o microcontrolador ESP32 (Arduino core for the ESP32³) e a biblioteca desenvolvida pela IBM (LMiC⁴), para a implementação do protocolo LoRaWAN. A versão do firmware que realiza o pré-processamento dos dados dos sensores antes do envio ao concentrador (E3), utiliza uma implementação da Transformada Rápida de Fourier⁵. As versões que exploram o recurso de multiprocessamento do microcontrolador (E2 e E3) fazem uso do FreeRTOS (sistema de tempo real para microcontroladores⁶, via biblioteca padrão⁷).

3.3 Ensaio I

Os experimentos iniciais em laboratório utilizaram uma estrutura metálica que compõe uma esteira para projetos de automação. O protótipo do nó sensor e um acelerômetro comercial, utilizado como referência, foram fixados no topo da estrutura, conforme a Figura 3.

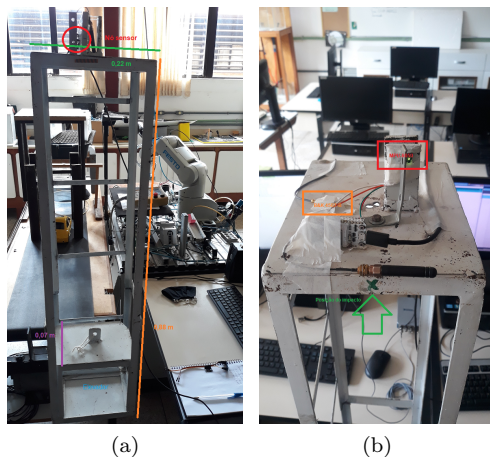


Figura 3. Estrutura metálica com elevador em escala de laboratório (a), com destaque para o posicionamento do nó sensor e do acelerômetro de referência (b).

O acelerômetro de referência é cabeado, do tipo piezoelétrico, marca Brüel & Kjaer, modelo DeltaTron 4507 B, com faixa de frequência de operação de 0,3 Hz a 6 kHz e sensibilidade de 9,8 mV/g ±5%. O sistema de aquisição de dados utilizado foi o modelo NI cDAQ-9171, com o módulo de entrada de som e vibração da série C, modelo NI 9234, desenvolvido pela National Instruments⁸, cuja taxa de amostragem pode chegar a 51,2 mil amostras por segundo, para cada canal. O software utilizado para coleta e análise dos dados do acelerômetro foi o Labview, versão 20.0, 32 bits, também da National Instruments.

² <https://www.arduino.cc>

³ <https://github.com/espressif/arduino-esp32>

⁴ <https://github.com/matthijskooijman/arduino-lmic>

⁵ <https://github.com/kosme/arduinoFFT>

⁶ <https://www.freertos.org/>

⁷ https://github.com/feilipu/Arduino_FreeRTOS_Library

⁸ <https://www.ni.com/pt-br.html>



Figura 4. Setup para ensaio de vibração de uma viga biapoada.

Como fonte de vibração mecânica, utilizou-se um smartphone com o aplicativo FrequencyGenerator Pro, que permite a geração de sinais sonoros com diferentes tipos de onda (senoidais, quadradas, triangulares), em faixas de frequência que podem ser configuradas de 1 Hz a 22 kHz.

Com a fonte de vibração fixada ao topo da estrutura metálica, diferentes frequências foram configuradas (85 Hz, 95 Hz, 100 Hz e 150 Hz) e o comportamento foi monitorado tanto pelo sistema proposto quanto pelo acelerômetro de referência. O objetivo foi validar em laboratório o algoritmo da estratégia E3, em que há processamento embarcado com cálculo e transmissão da FFT das medições de aceleração e, assim, calibrar o nó sensor.

3.4 Ensaio II

Com o objetivo de avaliar o protótipo para a aplicação de monitoramento de integridade de estruturas, uma viga de aço foi utilizada. O setup para a realização dos ensaios pode ser visto na Figura 4. Uma versão mais aprimorada do protótipo do nó sensor, possuindo fixadores magnéticos em sua base, foi posicionado em diferentes posições da viga, nas posições de maior oscilação, de forma a permitir monitoramento das frequências naturais de vibração. A excitação foi feita por meio de impactos com um martelo.

A viga de aço possui 1,496 m de comprimento, 0,074 m de largura e 0,008 m de espessura e foi modelada com o auxílio do software Ansys 2021 R1, sendo descontados 0,035 m correspondentes às extremidades em cada apoio. Com o modelo concluído, uma análise modal foi realizada, obtendo-se as frequências e formas modais de vibração da viga biapoada.

Analiticamente, as velocidades angulares e frequências naturais correspondentes aos n primeiros modos de vibração da viga biapoada podem ser obtidas, respectivamente, por (1) e (2) (Clough and Penzien, 2003):

$$\omega_n = n^2 \pi \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}} \quad (1)$$

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (2)$$

em que A é área da seção transversal da viga (m^2), E é o módulo de elasticidade (para o aço, igual a $2,0 \times 10^{11} N/m^2$), ρ é a massa específica (para o aço, igual a $7850 kg/m^3$) e L é o comprimento da viga (m).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os melhores desempenhos obtidos para cada uma das 3 estratégias, em termos de taxa de amostragem do sistema, são descritos a seguir:

- Estratégia 1 (E1): as leituras dos acelerômetros são realizadas a cada 3 segundos, enquanto as entregas às plataformas de rede e aplicação ocorrem em intervalos de aproximadamente 3,5 segundos.
- Estratégia 2 (E2): 1 leitura dos acelerômetros é realizada a cada intervalo de 0,5 segundo, totalizando 6 leituras ao fim de 3 segundos; as entregas às plataformas ocorrem em intervalos próximos dos 3,5 segundos.
- Estratégia 3 (E3): até 1024 pontos são amostrados e a FFT calculada, dentro de intervalos de 3 segundos. A frequência de maior magnitude é transmitida em intervalos de aproximadamente 3,5 segundos. Embora não seja obrigatório para a maioria das aplicações, caso necessário, é possível transmitir também o valor da magnitude da frequência.

Considerando os tempos de leitura dos sensores e de entrega dos dados às plataformas da rede, o sistema de monitoramento de vibração IoT foi capaz de alcançar as seguintes taxas de amostragem de dados das acelerações: $1/3,5$ (1 leitura a cada 3 s e 1 entrega a cada 3,5 s) = 0,29 Hz para E1; $6/3,5$ (6 leituras a cada 3 s e 1 entrega a cada 3,5 s) = 1,71 Hz para E2 e $1024/3,5$ (1024 leituras a cada 3 s, cálculo da FFT, e entrega a cada 3,5 s) = 292,5 Hz para E3.

A Tabela 2 apresenta, com base nas taxas de amostragem obtidas para o sistema em cada uma das estratégias de coleta e transmissão, possíveis aplicações de monitoramento de áreas de risco. Os valores apresentados refletem o tempo médio de entrega das mensagens pelo nó sensor (3,5 s).

Tabela 2. Possíveis aplicações para as diferentes estratégias de coleta e transmissão de dados.

Estratégia	Taxa de Amostragem (Hz)	Faixa de Freq. (Hz)	Aplicações
E1	0,29	0 a 0,145	barragens e encostas
E2	1,71	0 a 0,85	barragens, encostas e SHM
E3	295,5	0 a 146,25	barragens, encostas e SHM

4.1 Ensaio I

As respostas da estrutura metálica às excitações aplicadas em laboratório (85 Hz, 95 Hz, 100 Hz e 150 Hz), monitoradas de forma simultânea pelo nó sensor e pelo acelerômetro de referência são apresentadas nas Figuras 5 e 6. Nota-se uma oscilação, nunca maior do que 1% nas respostas obtidas pelo nó sensor, em relação à frequência medida com a estratégia E3. Esse erro relativo encontra-se dentro dos limites estabelecidos pela literatura (< 5%), no que se

refere a estudos sobre a identificação de parâmetros modais e sobre monitoramento dinâmico estrutural (Yoshida, 2016; Toledo Júnior, 2018).

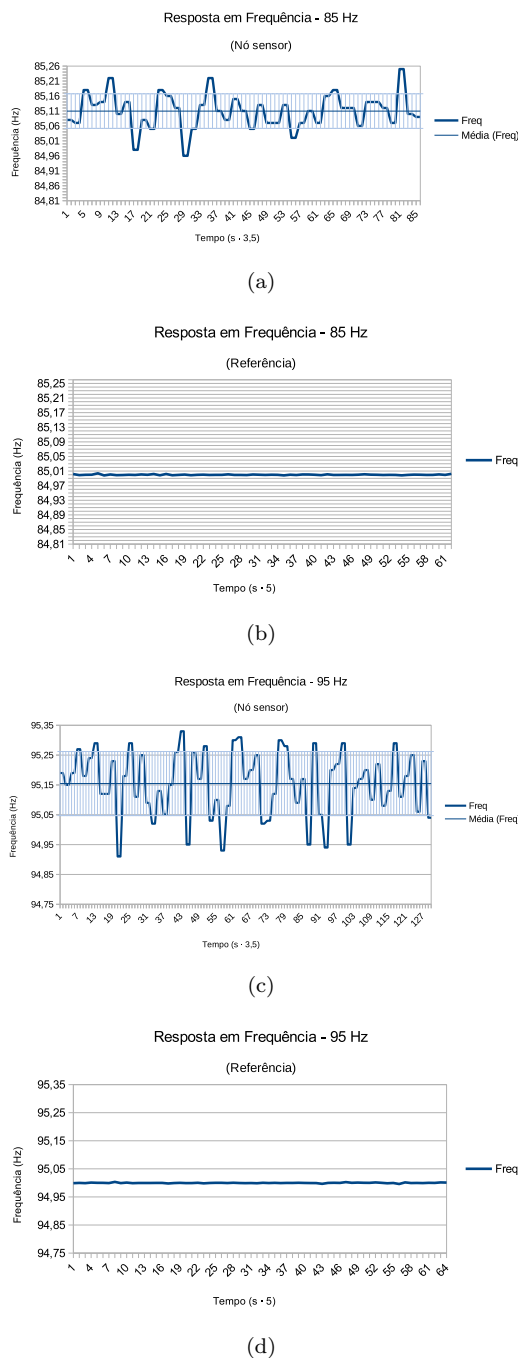
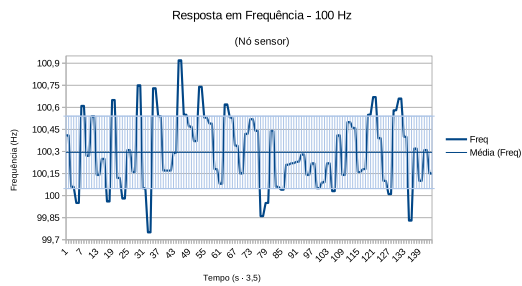


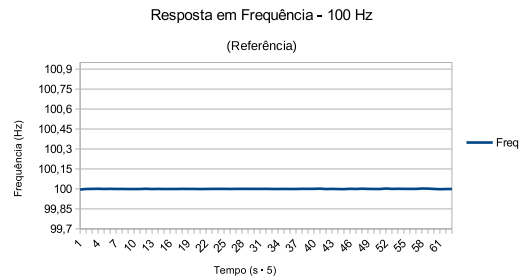
Figura 5. Respostas em frequência para 85 Hz e 95 Hz, com o nó sensor, (a) e (c), e com o acelerômetro de referência, (b) e (d), respectivamente.

4.2 Ensaio II

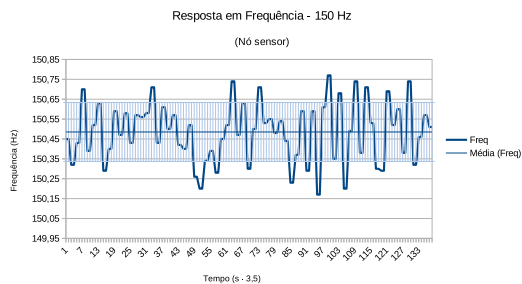
Nos ensaios realizados com a viga de aço, o nó sensor de vibração desenvolvido foi capaz de detectar as 3 principais frequências naturais de vibração, a partir da excitação com golpes de martelo. A análise modal da viga de aço modelada apresentou como resultados as formas modais correspondentes aos 3 primeiros modos de vibração (Figura



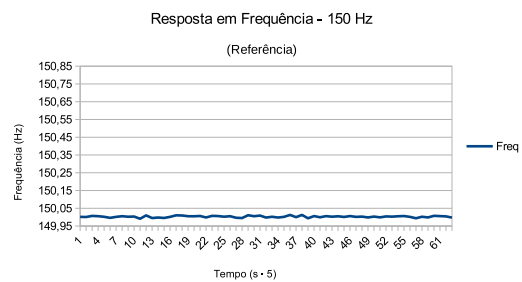
(a)



(b)



(c)



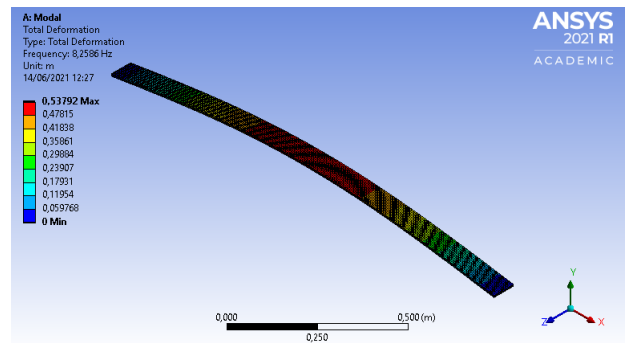
(d)

Figura 6. Respostas em frequência para 100 Hz e 150 Hz, com o nó sensor, (a) e (c), e com o acelerômetro de referência, (b) e (d), respectivamente.

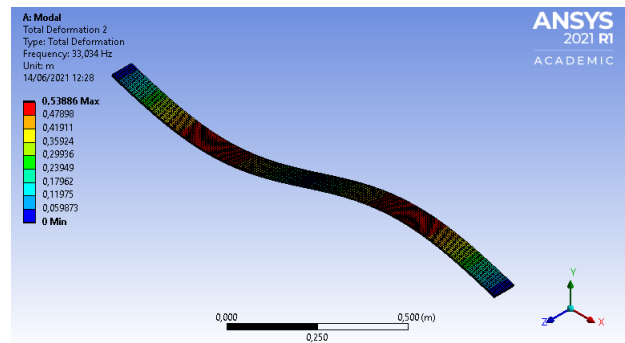
7). Analiticamente, as três primeiras frequências naturais foram obtidas. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Frequências modais em Hz: análise analítica, simulação e ensaios.

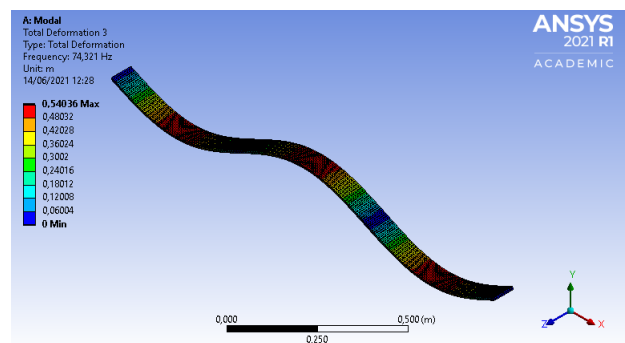
	Teórico	Simulado	Nó sensor
1º Modo (Hz)	8,243	8,259	8,448
2º Modo (Hz)	33,034	32,973	33,068
3º Modo (Hz)	74,189	74,321	71,506



(a)



(b)



(c)

Figura 7. Flexão vertical da viga. Primeiro (a), segundo (b) e terceiro (c) modos de vibração.

Em relação aos valores de frequência teóricos, obtidos analiticamente, a simulação no Ansys apresentou erros relativos de 0,18 %, 0,18 % e 0,17 %, para a primeira, segunda e terceira frequências naturais, respectivamente. Os erros das frequências medidas pelo nó sensor, para a primeira, segunda e terceira frequências naturais foram de 2,4 %, 0,28 % e 3,61 %, respectivamente, dentro dos limites encontrados na literatura.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi apresentado o desenvolvimento de um protótipo de um nó sensor de vibração com interface LPWAN, com o intuito de verificar sua aplicabilidade no monitoramento de áreas de risco.

O protótipo foi desenvolvido utilizando sensor do tipo MEMS e placa de desenvolvimento de aplicações de In-

ternet das Coisas, com interface de comunicação LoRa. A integração do nó sensor com os principais elementos da rede LPWAN utilizada permitiu a transmissão de baixas taxas de dados, com entregas em torno de 3,5 segundos.

As diferentes estratégias de coleta e transmissão de dados de vibração implementadas permitiram obter taxas de amostragem compatíveis com as definidas na literatura, para aplicações de monitoramento de encostas, barragens e estruturas de engenharia civil. O equilíbrio entre a necessidade de uma maior taxa de dados e a entrega de uma mensagem processada localmente é que define a melhor estratégia de coleta e transmissão de dados.

A terceira estratégia implementada (E3) garante taxa de amostragem máxima dos dados de aceleração em torno de 290-300 Hz, possibilitando o uso do nó sensor em aplicações de monitoramento de integridade de estruturas. Ensaios utilizando essa estratégia em uma viga de aço bi-apoiada demonstram a capacidade do sistema de detectar as três primeiras frequências naturais de vibração, com erro relativo máximo em torno de 3 %.

Em trabalhos futuros, pretende-se desenvolver um encapsulamento resistente a poeira e às intempéries climáticas para o nó sensor, bem como explorar e avaliar as capacidades de economia de energia do sistema. Além disso, pretende-se utilizar excitadores de vibração mecânica, como *shakers* e mesas vibratórias, ao invés do smartphone como fonte de vibração, para permitir a realização de ensaios de vibração mais específicos para avaliação da capacidade do sistema para o monitoramento de integridade de estruturas.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), do Instituto Tecnológico Vale (ITV) e da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

REFERÊNCIAS

- Bezerra, L.T.V. (2019). *Mapeamento de risco e análise de estabilidade de movimentos de massa na comunidade São José do Jacó, Natal/RN*. Master's thesis, Universidade Federal de Rio Grande do Norte. Mestrado em Engenharia Civil.
- Cardozo, F.A.C. and Cordova, D.P. (2019). Breves considerações sobre barragens de rejeito da mineração. *Conselho em Revista - CREA-RS*, 129, 42–43.
- Clough, R.W. and Penzien, J. (2003). *Dynamics of structures*. Little, Brown & Co., Berkeley, 3rd edition.
- Fernandes, F.d.S.A. (2020). *Internet das Coisas e Monitoramento de Vibrações: Protótipo de Um Nó Sensor*. Mestrado em instrumentação, controle e automação de processos de mineração, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Meireles, L., Uzeda, L., and Rêgo Segundo, A.K. (2018a). Coisas para se saber sobre a internet das coisas - um guia pratico. *XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBrT2018*, 16–19. doi:10.14209/sbrt.2018.49.
- Meireles, L., Uzeda, L., and Rêgo Segundo, A.K. (2018b). Projeto e implantação de rede de internet das coisas em regiões montanhosas. *XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBrT2018*, 16–19. doi:10.14209/sbrt.2018.49.
- Meireles, L.V. (2018). *Projeto de uma rede de internet das coisas para monitoramento e alerta de emergência em áreas de risco*. Mestrado em instrumentação, controle e automação de processos de mineração, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Moreno-Gomez, A., Pérez-Ramírez, C., Dominguez Gonzalez, A., Valtierra-Rodriguez, M., Omar, C., and Amezquita-Sanchez, J. (2017). Sensors used in structural health monitoring. *Archives of Computational Methods in Engineering*. doi:10.1007/s11831-017-9217-4.
- O'Brien, E., Khan, M.A., McCrum, D.P., and Žnidarič, A. (2020). Using statistical analysis of an acceleration-based bridge weigh-in-motion system for damage detection. *Applied Sciences*, 10(2). doi:10.3390/app10020663. URL <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/2/663>.
- Priswanto, A., Maryanto, S., and Santoso, D.R. (2019). Wireless sensor module for 3-axis vibration and tilt monitoring on the structural building. *Journal of Physics: Conference Series*, 1153, 012040. doi:10.1088/1742-6596/1153/1/012040. URL <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1153/1/012040>.
- Silva, J.B.L.P., Jacintho, A.E.P.G.d.A., Forti, N.C.d.S., Pimentel, L.L., and Branquinho, O.C. (2019). Desenvolvimento de sistema de baixo custo para monitoramento de integridade estrutural. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 24(4).
- Susanto, E., Budiman, F., Husneni Mukhtar, D.P., and Latief, M.H. (2019). Slope, humidity and vibration sensors performance for landslide monitoring system. In *2019 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob)*, 139–142. doi:10.1109/APWiMob48441.2019.8964155.
- Toledo Júnior, E.G. (2018). *Acelerômetro sem fio de baixo custo para monitoramento dinâmico estrutural*. Mestrado em engenharia civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora. Dissertação.
- Tozetto, R.S., Chamberlain Pravia, Z., Toazza, A., and Dalla Rosa, F. (2021). Development of a vibration measurement system for bridges. *IEEE Latin America Transactions*, 19(5), 790–797. URL <https://latam.ieee9.org/index.php/transactions/article/view/3988>.
- Yoshida, L.M. (2016). *Estudo comparativo de técnicas de identificação modal no domínio do tempo aplicadas a estruturas de engenharia civil*. Mestrado em engenharia civil, construção metálica, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Dissertação.