TRANSMISSÃO DE DADOS PARA UM SISTEMA IOT-SHM: UMA ABORDAGEM ESCALÁVEL E DE BAIXO CUSTO PARA O MONITORAMENTO PREVENTIVO DE DANOS EM INFRAESTRUTURAS CIVIS

DATA TRANSMISSION FOR AN IOT-SHM SYSTEM: A SCALABLE AND LOW-COST APPROACH FOR PREVENTIVE DAMAGE MONITORING IN CIVIL INFRASTRUCTURES

FELIPE MINORU COSTA MONOBI
USP - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

JULIA MENESES ROBERTO

ANDRESSA CORRENTE MARTINS

BRENDA CHAVES COELHO LEITE
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Comunicação:
O XIV SINGEP foi realizado em conjunto com a 14th Conferência Internacional do CIK (CYRUS Institute of Knowledge) e com a SPARK (Society for Promoting Academic Research and Knowledge), em formato híbrido, com sede presencial na UNINOVE - Universidade Nove de Julho, no Brasil.

TRANSMISSÃO DE DADOS PARA UM SISTEMA IOT-SHM: UMA ABORDAGEM ESCALÁVEL E DE BAIXO CUSTO PARA O MONITORAMENTO PREVENTIVO DE DANOS EM INFRAESTRUTURAS CIVIS

Objetivo do estudo
Desenvolver e validar um sistema IoT-SHM autônomo, escalável e de baixo custo, utilizando computação na borda e matrizes de múltiplos nós sensores movidos a energia solar fotovoltaica para o monitoramento contínuo de pontes e viadutos.

Relevância/originalidade
Supera as limitações das inspeções visuais manuais e os altos custos de sistemas tradicionais de monitoramento, oferecendo uma solução inovadora que minimiza drasticamente o tráfego de rede e opera de forma autônoma fora da rede elétrica (off-grid).

Metodologia/abordagem
Utilizou-se processamento local (edge computing) com microcontrolador ESP32-C3 e acelerômetro ADXL345 para calcular a transformada de Fourier e extrair as frequências de pico. O sistema foi validado em campo com 10 sensores solares simultâneos transmitindo em arquitetura paralela 4G.

Principais resultados
O acelerômetro apresentou erro médio de 2% frente a referências controladas. O processamento na borda reduziu os dados transmitidos em 98%. A rede paralela associada ao dimensionamento solar garantiu estabilidade e zero perda de dados sob estresse.

Contribuições teóricas/metodológicas
Consolida uma arquitetura descentralizada para sistemas IoT-SHM incorporando rigor metrológico de calibração que reduz falhas sistemáticas de medição em 93%. Demonstra a viabilidade da computação local para contornar gargalos de conectividade em redes móveis tradicionais.

Contribuições sociais/para a gestão
Viabiliza financeiramente a expansão do monitoramento preventivo para milhares de estruturas, permitindo que concessionárias e governos substituam intervenções corretivas emergenciais e onerosas por reparos precoces. Aumenta a segurança das Obras de Arte Especiais (OAEs), prevenindo falhas críticas.

Palavras-chave: Monitoramento de Integridade Estrutural, Internet das Coisas, Computação de Borda, Infraestruturas Civis, Acelerômetro

DATA TRANSMISSION FOR AN IOT-SHM SYSTEM: A SCALABLE AND LOW-COST APPROACH FOR PREVENTIVE DAMAGE MONITORING IN CIVIL INFRASTRUCTURES

Study purpose
To develop and validate an autonomous, scalable, and low-cost IoT-SHM system using edge computing and solar-powered multi-node sensor matrices for the continuous monitoring of bridges and viaducts.

Relevance / originality
It overcomes manual visual inspection limitations and high traditional monitoring costs, offering an innovative solution that drastically minimizes network traffic and operates autonomously entirely off-grid.

Methodology / approach
Local processing (edge computing) with an ESP32-C3 microcontroller and ADXL345 accelerometer was used to calculate Fourier transforms and extract peak frequencies. The system was field-tested using 10 simultaneous solar-powered sensors transmitting in a parallel 4G architecture.

Main results
The accelerometer showed a 2% mean error against controlled references. Edge processing reduced transmitted data by 98%. The parallel network combined with solar sizing ensured stability and zero data loss under severe operational stress.

Theoretical / methodological contributions
It consolidates a decentralized architecture for IoT-SHM systems incorporating metrological calibration rigor that reduces systematic measurement errors by 93%. It demonstrates local computing viability to overcome connectivity bottlenecks in traditional mobile networks.

Social / management contributions
It financially enables the expansion of preventive monitoring to thousands of structures, allowing concessionaires and governments to replace costly emergency corrective interventions with early repairs. It increases the safety of critical infrastructures by preventing catastrophic failures.

Keywords: Structural Health Monitorin, Internet of Things, Edge Computing, Civil Infrastructures, Accelerometer

Transmissão de Dados para um Sistema IoT-SHM: Uma Abordagem Escalável e de Baixo Custo para o Monitoramento Preventivo de Danos em Infraestruturas Civis

1 Introdução

A segurança e a integridade de pontes e viadutos, classificados na engenharia civil como Obras de Arte Especiais (OAEs) constituem preocupação crítica na gestão de infraestruturas de transporte. No Brasil, esse cenário é particularmente alarmante; estima-se que cerca de 5,5 mil estruturas desse tipo operem há mais de 50 anos no país, frequentemente sob cargas de tráfego e condições ambientais que superam os parâmetros de projeto originais (Rittner, 2025). A manutenção dessas estruturas ainda depende majoritariamente de inspeções visuais periódicas, método que apresenta duas limitações centrais: a subjetividade da análise humana, que, de acordo com Moore et al. (2001) revelam que aproximadamente 58% das avaliações visuais resultam em notas discordantes para um mesmo elemento estrutural quando analisadas por inspetores distintos, e a baixa periodicidade normativa, que no Brasil pode chegar a cinco anos entre inspeções especiais (Associação Brasileira de Normas Técnicas [ABNT], 2019). No intervalo entre inspeções, processos patológicos ocultos, como fadiga de materiais ou corrosão interna, podem evoluir para falhas estruturais graves sem detecção prévia.

Essa limitação tem implicação econômica direta; segundo a lógica da "Lei de Sitter" (De Sitter, 1984), o custo de reparo de um dano estrutural cresce em progressão geométrica quanto mais tardia for sua detecção, de modo que intervenções na fase preventiva custam significativamente menos do que reparos após o dano tornar-se visível. Nesse contexto, o Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM - *Structural Health Monitoring*) desponta como disciplina fundamental para converter a manutenção reativa em manutenção preventiva orientada por dados.

Apesar dessa relevância, a adoção do SHM em larga escala enfrenta barreiras tecnológicas e comerciais significativas. A transição para um monitoramento contínuo e remoto exige a coleta e o processamento em tempo real de grandes volumes de dados vibracionais e ambientais, mas essa implementação esbarra em um *gap* de infraestrutura: o alto custo dos equipamentos tradicionais, a dificuldade de fornecimento de energia ininterrupta em locais remotos e os gargalos de comunicação para a transmissão massiva de dados de múltiplos nós sensores inviabilizam, técnica e financeiramente a expansão do monitoramento para o volume de OAEs que efetivamente precisam dele.

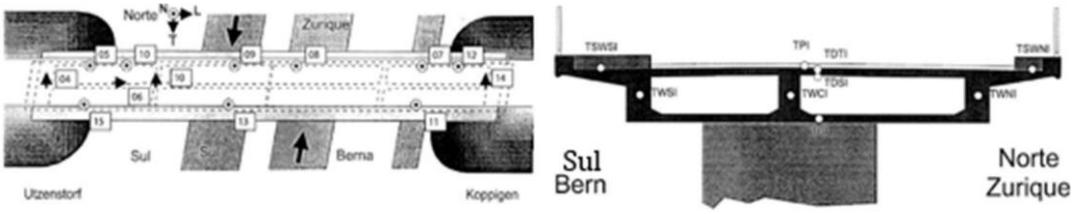
Diante dessa problemática, o objetivo principal deste trabalho é desenvolver e validar um sistema IoT-SHM de baixo custo, autônomo e focado em escalabilidade comercial, ou seja, capaz de operar não como um sensor isolado, mas como uma matriz de múltiplos nós sensores simultâneos em campo. Os objetivos específicos incluem: (i) desenvolver um nó sensor inteligente utilizando componentes de alta disponibilidade no mercado, dotado de processamento na borda (*edge computing*) para otimização de tráfego de dados; (ii) validar a viabilidade do uso exclusivo de energia solar fotovoltaica para a alimentação de matrizes de sensores no campo e (iii) identificando gargalos de conectividade em redes celulares (4G/LTE), propor uma arquitetura de transmissão resiliente e paralela para garantir a integridade dos dados de múltiplos nós sensores operando simultaneamente.

2 Referencial Teórico

O SHM é definido como o processo de implementação de uma estratégia de identificação de danos em infraestruturas, em que o dano é caracterizado como qualquer alteração nas propriedades materiais e/ou geométricas que afete negativamente o desempenho atual ou futuro do sistema estrutural (Farrar & Worden, 2006). O princípio fundamental da

maioria dos métodos baseados em vibração é que uma anomalia estrutural altera propriedades físicas do sistema, massa, amortecimento e rigidez, o que se reflete em mudanças mensuráveis na resposta dinâmica, notadamente nas frequências naturais.

Contudo, a aplicação prática desse princípio enfrenta um desafio técnico bem documentado na literatura: a distinção entre alterações causadas por dano real e aquelas resultantes de variações ambientais e operacionais normais (*Environmental and Operational Conditions* - EOC). O caso da ponte I-40 sobre o Rio Grande (Novo México, EUA) ilustra o problema. Ao introduzir dano progressivo por corte de vigas, esperava-se queda monotônica da frequência fundamental, mas os resultados foram contraintuitivos; a frequência aumentou nos dois primeiros níveis de dano, revelando que a variação de temperatura ambiente teve papel preponderante sobre o efeito do dano (Sohn, 2007). De forma análoga, o monitoramento contínuo de nove meses da ponte Z-24, na Suíça, em que o sistema de monitoramento está representado na Figura *1* identificou uma correlação bilinear entre frequência natural e temperatura, atribuída à rigidez variável da camada asfáltica em função do clima (Steenackers & Guillaume, 2005). Esse comportamento é diretamente relevante para o sistema proposto neste trabalho; como o processamento é feito localmente em cada nó sensor e os dados são agregados de múltiplos pontos simultâneos, a arquitetura precisa considerar, desde o projeto, que variações térmicas diárias produzirão flutuações de frequência que não devem ser confundidas com dano, o que reforça a necessidade de uma aplicação capaz de correlacionar frequência com variáveis ambientais, e não apenas armazená-la isoladamente.



(a) posição e direção dos acelerômetros (b) posição dos sensores de temperatura

Figura 1: Sistema de monitoramento da ponte Z-24. Adaptado de *(Steenackers & Guillaume, 2005).*

Casos de instrumentação em escala real, como o Viaduto de Millau - França (Virlogeux, 2005) e a Ponte Akashi Kaikyō (Japão), demonstram a viabilidade e a maturidade de redes de sensores densas para SHM contínuo, a primeira integrando anemômetros, acelerômetros, GPS de alta precisão e sensores de temperatura para validar o comportamento estrutural sob cargas de vento extremas (Clement et al., 2006) e a segunda operando sob condições sísmicas e de tufões (Kashima et al., 2001). Esses exemplos, no entanto, utilizam instrumentação de altíssimo custo, o que reforça a lacuna que a proposta de dispositivo sensor de baixo custo baseado em componentes de prateleira busca preencher.

A adoção da Internet das Coisas (IoT) materializa uma transformação no modelo de negócios do monitoramento estrutural, permitindo a migração de um modelo de aquisição manual e periódico para um processo remoto e contínuo. Um sistema IoT-SHM típico organiza-se estruturalmente em múltiplas camadas:

- Camada de Percepção: utiliza sensores para coletar dados físicos e atribuir identidade única aos objetos monitorados;
- Camada de Rede: responsável pela transmissão de dados por meio de tecnologias sem fio, sendo o elo mais suscetível a gargalos quando múltiplos nós operam simultaneamente;
- Camada de Processamento de Dados: utiliza computação em nuvem para processar informações e auxiliar na tomada de decisão;

- Camada de Aplicação: entrega serviços inteligentes ao usuário final, como *dashboards* visuais e sistemas de alerta.

É justamente na Camada de Rede, o elo entre a coleta distribuída em campo e o processamento centralizado, que este trabalho identifica e endereça a principal barreira de escalabilidade do SHM de baixo custo, conforme detalhado na metodologia.

3 Metodologia

O procedimento metodológico baseou-se na concepção de um sistema de baixo custo estruturado para ser altamente escalável em número de nós sensores. O conceito fundamental é que cada dispositivo leia os valores de aceleração, processe-os localmente para extrair as frequências naturais da estrutura e envie apenas os resultados resumidos, não o sinal bruto, para um banco de dados em nuvem, minimizando o tráfego de rede por nó. A arquitetura geral do sistema é representada pela Figura *2*.

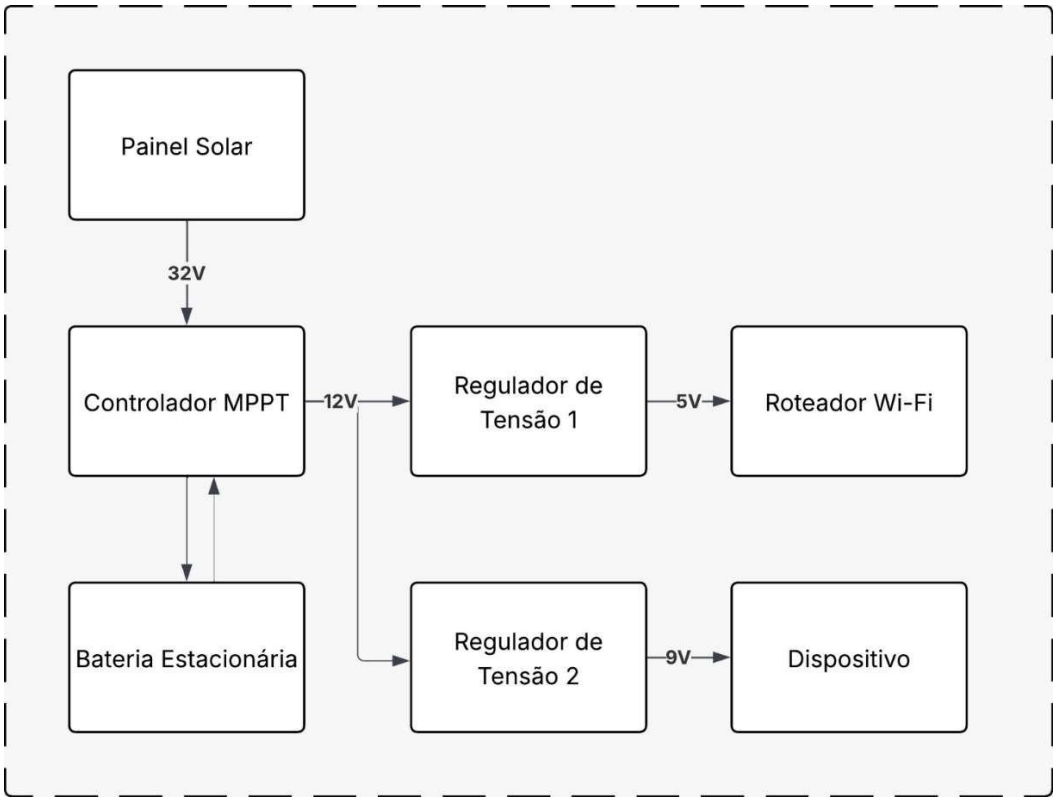


Figura 2: Arquitetura Geral do Sistema. Fonte: O autor (2026)

3.1 Hardware do nó sensor

O componente de processamento selecionado foi o microcontrolador ESP32-C3 Supermini, escolhido por seu tamanho reduzido, conectividade nativa (Wi-Fi 2,4 GHz e Bluetooth LE 5.0), arquitetura RISC-V de 32 bits com *clock* de até 160 MHz e memória *Flash* de 4 MB, necessária para armazenar *firmware* complexo e dados de calibração.

Para a captação das métricas vibracionais, utilizou-se o acelerômetro MEMS ADXL345. A escolha desse sensor foi realizada com base em ensaio comparativo prévio entre quatro modelos MEMS de baixo custo disponíveis no mercado nacional (ADXL335, ADXL345, MPU-6050 e MMA7361), submetidos a uma frequência de referência conhecida de

10 Hz aferida por osciloscópio, tendo como fonte um gerador de áudio. O ADXL345 apresentou erro médio de apenas 2%, contra 7% do ADXL335, 2% do MMA7361 e 16% do MPU-6050. Além do desempenho metrológico, o ADXL345 oferece resolução nativa fixa de 13 bits (3,9 mg/LSB), interface digital I²C e capacidade de registrar frequências a partir de 0,1 Hz, essencial para capturar os modos fundamentais de flexão de pontes e viadutos, tipicamente entre 1 e 14 Hz para vãos de 10 a 100 metros (Karimi et al., 2022).

3.2 Aquisição e processamento local (*edge computing*)

O acelerômetro é configurado para monitorar a atividade de forma contínua a uma taxa de amostragem de 50 Hz, valor definido de acordo com o teorema de Nyquist para preservar com margem as frequências estruturais esperadas, tipicamente concentradas entre 1 e 14 Hz. Ao detectar uma vibração que ultrapassa um limite preestabelecido, uma interrupção de *hardware* é gerada, disparando a coleta de uma janela de 4.096 amostras no eixo de interesse, seguida da remoção da componente DC do sinal. Isso é necessária porque o *offset* estático residual do sensor, se não for removido seria interpretado pela Transformada Rápida de Fourier (FFT) como energia concentrada na frequência zero de maneira incorreta, distorcendo a leitura das componentes de baixa frequência de interesse estrutural (1–14 Hz).

A conversão do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência é realizada localmente em cada nó por meio da FFT, algoritmo que decompõe o sinal em suas componentes senoidais. Essa conversão, no entanto, não pode ser aplicada diretamente sobre o vetor de amostras brutas. Como a análise espectral é necessariamente restrita a uma janela de N amostras e não ao sinal contínuo e infinito no tempo, o truncamento equivale matematicamente a multiplicar o sinal original por uma janela retangular. Essa multiplicação introduz uma distorção conhecida como vazamento espectral (*spectral leakage*), na qual a energia de uma componente de frequência que não coincide exatamente com um dos bins da FFT se espalha para os bins vizinhos, mascarando picos próximos e reduzindo a capacidade de resolver componentes espectrais adjacentes (Proakis & Manolakis, 1996).

Para mitigar esse efeito, o *firmware* aplica uma janela de Hamming ao vetor de amostras antes do cálculo da FFT, definida por:

$$\omega(n) = 0{,}54 - 0{,}46 * \cos\left(\frac{2 * \pi * n}{N - 1}\right), n = 0, 1, \ldots, N - 1 \quad (1)$$

Onde: ω é o valor da função de janelamento, n é o índice temporal da amostra e N é o tamanho total da janela em amostras.

A escolha da janela de Hamming, em detrimento de alternativas como a janela retangular (sem atenuação, logo mais suscetível a vazamento) ou janelas de lóbulo principal mais largo, como a de Blackman (maior atenuação de lóbulos laterais, mas com pior resolução em frequência), representa um compromisso adequado para este sistema, ou seja, atenuação suficiente dos lóbulos laterais para não mascarar frequências estruturais próximas, cenário comum em viadutos, cujos modos de flexão, torção e laterais frequentemente aparecem espaçados por poucos Hertz, sem alargar exageradamente o lóbulo principal, o que prejudicaria a resolução do pico de ressonância.

Com a taxa de amostragem de 50 Hz e a janela de N = 4.096 amostras, a resolução espectral resultante é dada por:

$$\Delta f = fs/N = 50/4.096 \approx 0{,}0122\ Hz\ por\ bin \quad (2)$$

Onde: Δf é a resolução espectral, fs é a frequência de amostragem e N é o número total de amostras.

Este procedimento foi suficiente para identificar deslocamentos milimétricos no pico de ressonância da estrutura monitorada. Esse tamanho de janela representa uma troca consciente entre resolução espectral e responsividade temporal; a mesma janela de 4.096 amostras corresponde a um intervalo de aquisição de N/fs ≈ 81,9 segundos, ou seja, o sistema sacrifica atualizações mais frequentes em favor de uma resolução fina o bastante para separar modos estruturais próximos, decisão que impacta diretamente a análise de tráfego de rede, discutida na Seção 4.3.

Sobre o espectro de magnitude resultante da FFT, o *firmware* executa uma rotina de busca de picos, identificando as duas frequências de maior amplitude (F1 e F2) do evento. São exclusivamente esses valores, e não o espectro completo, que compõem o pacote transmitido, conforme detalhado na estrutura JSON da Seção 3.4. Técnicas adicionais, como o método de Welch (para estimação espectral por médias de segmentos sobrepostos, reduzindo variância em troca de resolução) e análises tempo-frequência (CWT – Continuous Wavelet Transform /STFT – Short Term Fourier Transform), podem ser agregadas na etapa de processamento em nuvem para refinar essas métricas a partir do histórico consolidado de múltiplos nós.

3.3 Calibração do sensor

Para garantir a integridade metrológica de cada nó antes da instalação, executa-se uma rotina de calibração de *offset* estático baseada no método das seis posições. O sensor é posicionado sucessivamente com cada eixo (X, Y e Z) apontado para cima e para baixo, coletando-se conjuntos de 100 leituras por orientação. Considerando que, em repouso, a única força atuante no eixo alinhado com a vertical deve ser a gravidade (±1 g, equivalente a ±256 LSB), o *firmware* calcula o erro de *offset* como a diferença entre a leitura média e o valor teórico esperado, dividido por quatro (fator de sensibilidade do registrador de *offset* em relação à saída de dados do ADXL345).

$$Offset = (\text{Aceleração máxima} + \text{Aceleração mínima})/2 \quad (3)$$

O coeficiente resultante é convertido em complemento de dois e gravado diretamente nos registradores internos do sensor (0x1E, 0x1F e 0x20 para os eixos X, Y e Z, respectivamente), de modo que a correção passe a ser aplicada em *hardware*, sem necessidade de pós-processamento no *firmware* a cada leitura. Em validação prévia desse procedimento, o método reduziu o erro sistemático do eixo Z de +15 LSB para +1 LSB, uma mitigação de 93%, resultando em um resíduo final de aproximadamente 0,004 g, dentro da faixa de tolerância especificada pelo fabricante para essa família de sensores MEMS.

3.4 Arquitetura de comunicação

A comunicação principal ocorre via Wi-Fi, originada em cada microcontrolador, em direção a um modem 4G que atua como ponto de acesso à internet. Uma API REST serve como servidor intermediário, recebendo os pacotes via protocolo HTTP e encaminhando-os a um banco de dados orientado a documentos (MongoDB Atlas), na Camada de Aplicação. Toda a cadeia elétrica que sustenta essa arquitetura em campo segue uma topologia *off-grid* fotovoltaica: painel solar conectado a um controlador de carga MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), responsável por gerenciar os ciclos de carga (*bulk, absorption e float*) de uma bateria estacionária de 12V DC, com reguladores de tensão reduzindo a tensão aos níveis de operação

de cada sensor. Essa topologia elimina a necessidade de infraestrutura elétrica convencional e reduz perdas associadas à conversão AC/DC, requisito crítico quando o número de dispositivos instalados em uma mesma OAE aumenta.

Os pacotes de dados utilizam a estrutura JSON. Para assegurar a rastreabilidade essencial em soluções corporativas com múltiplos clientes e múltiplas estruturas, cada *payload* inclui metadados como *device_id* (identificador único do sensor), *bridge_id* e *company_id*, atrelando o dado físico à infraestrutura exata e à concessionária, além de *arrays* de picos espectrais (frequências dominantes F1, F2) e métricas de aceleração nos eixos monitorados, com *timestamp* de aquisição. Um exemplo simplificado da estrutura é:

```
{
 "device_id": "SNS-014",
 "bridge_id": "PONTE-JND-01",
 "company_id": "EMPRESA-XX",
 "timestamp": "2026-08-05T14:32:10Z",
 "peaks_hz": [3.77, 7.51, 11.2],
 "axis": "z"
}
```

3.5 Dimensionamento e protocolo de validação da autonomia energética

O dimensionamento do sistema fotovoltaico off-grid partiu do consumo energético diário estimado para a matriz completa de nós sensores, obtido pela soma do consumo individual de cada dispositivo ao longo do seu ciclo de operação (monitoramento contínuo em repouso, picos de processamento local da FFT e transmissão Wi-Fi por evento), multiplicado pelos 10 sensores simultâneos previstos na bancada de teste. A esse consumo foi acrescida uma margem de segurança correspondente a um número de dias de autonomia sem recarga solar, de modo a absorver períodos de baixa irradiância consecutivos (dias nublados ou chuvosos), prática usual no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos isolados. A partir desse balanço energético, definiram-se a potência do painel solar e a capacidade da bateria estacionária de 12V DC, respeitando os limites de profundidade de descarga recomendados pelo fabricante para preservar a vida útil do banco de baterias, com o controlador MPPT responsável por otimizar o aproveitamento da energia incidente mesmo sob irradiância variável.

Para validar esse dimensionamento em campo, foi definido um protocolo de teste de operação contínua com duração aproximada de um mês, iniciado em setembro de 2025, no qual a bancada com os 10 sensores simulando duas faixas de rolamento operou exclusivamente com a energia gerada pelo arranjo fotovoltaico, sem qualquer fonte de energia auxiliar. O critério de sucesso adotado foi a manutenção da continuidade operacional do sistema, isto é, a ausência de interrupções por falta de energia, monitorada ao longo de todo o período, incluindo dias de condições climáticas adversas (nublados e chuvosos), que representam o cenário mais crítico para a geração fotovoltaica. Os resultados desse protocolo são apresentados na Seção 4.2.

4 Análise dos resultados e Discussões

A etapa de validação prática buscou aferir o comportamento da infraestrutura energética, a estabilidade de conexão e a tolerância a falhas do sistema sob condições de estresse. O cenário de testes consistiu na montagem de uma bancada que simula o monitoramento de duas faixas de rolamento, totalizando a instrumentação de 10 sensores simultâneos, operando exclusivamente com energia fotovoltaica, ligada a um controlador MPPT e reguladores de tensão. Os testes de operação contínua foram iniciados em setembro de 2025 e avaliados ao longo de aproximadamente um mês.

4.1 Validação do sensor e da calibração

A seleção do acelerômetro foi validada por meio de um ensaio comparativo entre os quatro modelos MEMS de baixo custo considerados (ADXL335, ADXL345, MPU-6050 e MMA7361), submetidos a uma frequência de referência de 10 Hz gerada por um alto-falante e aferida previamente por osciloscópio, conforme mostra a Figura 3.

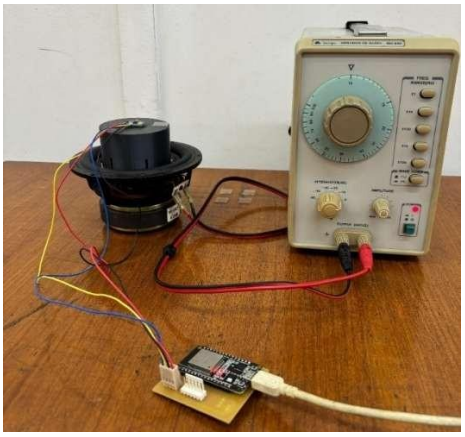


Figura 3: Ensaio em frequência controlada com gerador de áudio calibrado. Fonte: O autor (2025)

O ADXL345, apresentou o menor erro médio entre os sensores digitais avaliados (2%), contra 7% do ADXL335 e 16% do MPU-6050, resultado equivalente ao do MMA7361 (2%) (Tabela 1), porém com a vantagem da interface digital I²C. Esse resultado justifica a escolha, descrita na Seção 3.1.

Tabela 1: Comparativo entre acelerômetros. Fonte: O autor (2025)

Acelerômetro	Valor de Referência	Valor Médio Medido	Erro Médio
ADXL335	10 Hz	10,07 m/s^2	7%
ADXL345	10 Hz	10,02 m/s^2	2%
MMA7361	10 Hz	9,98 m/s^2	2%
MPU-6050	10 Hz	10,16 m/s^2	16%

A eficácia da rotina de calibração de seis posições foi verificada pela comparação das leituras do eixo Z antes e depois da gravação dos coeficientes de *offset* nos registradores do sensor, o que pode ser observado na Tabela 2. O procedimento reduziu o erro sistemático de +15 LSB para +1 LSB, uma mitigação de 93%, resultando em um resíduo final de aproximadamente 0,004 g, dentro da tolerância especificada pelo fabricante para essa família de sensores MEMS. Esse resultado estabelece a linha de base metrológica na qual os testes de campo subsequentes foram conduzidos.

Tabela 2: Resultados após a calibração

Condição	Leitura Média no eixo Z (LSB)	Erro (x4) em relação a 256 LSB	Erro (g)
Antes da calibração	+271	+15	+0,059 g
Depois da calibração	+257	+1	+0,004 g

4.2 Autonomia energética

O dimensionamento do arranjo fotovoltaico mostrou-se pleno e suficiente; a matriz de 10 sensores manteve continuidade operacional mesmo diante de intempéries e cenários adversos, como dias chuvosos e nublados. Essa validação contorna um dos principais limitadores mercadológicos do SHM: a dependência de infraestrutura elétrica cabeada em OAEs remotas, sem histórico de interrupção por falta de energia durante o período avaliado. A bancada de teste com o sistema completo montado é representada pela Figura 4.



Figura 4: Bancada de teste completa. Fonte: O autor (2025)

4.3 Conectividade e arquitetura de rede paralela

Para quantificar o ganho de eficiência do processamento na borda, estimou-se o volume de dados que seria transmitido por evento vibracional nos dois cenários possíveis. No cenário de transmissão do sinal bruto, uma janela de 4.096 amostras (2 bytes por amostra) resultaria em aproximadamente 8 KB de dados por evento, por sensor. No cenário implementado, em que apenas as frequências de pico (F1, F2) e os metadados de rastreabilidade são transmitidos, o

pacote por evento fica na ordem de 150 bytes, conforme estrutura JSON da Seção 3.4, uma redução estimada superior a 98% no volume de dados por transmissão. Essa redução é o que viabiliza, na prática, a operação simultânea dos 10 sensores sobre a mesma infraestrutura de rede, sem a qual o gargalo de conectividade observado no cenário de modem único seria ainda mais severo.

No desenho inicial do teste, a transmissão de dados dos 10 sensores foi concentrada em um único modem USB 4G LTE. Os resultados práticos mostraram que esse modem é incapaz de manter a estabilidade na transmissão concorrente de 10 dispositivos, gerando quedas de conexão diante do volume simultâneo de requisições HTTP.

Para solucionar essa barreira, foi desenvolvida e testada uma arquitetura de modems operando em paralelo, com a carga de transmissão dividida entre dois *hardwares* de rede distintos (por exemplo, 5 dispositivos por modem). Essa solução mitigou as perdas de dados observadas na configuração com um único modem.

4.4 Resiliência a falhas e política contra perda de dados

Ainda que a rede paralela tenha se mostrado estável, o monitoramento preventivo exige rigor quanto à perda de pacotes. Quando a latência estava elevada, demorando para que os pacotes fossem enviados rapidamente, ou quando havia indisponibilidade temporária no servidor, o sistema acionou com sucesso o mecanismo de armazenamento local utilizando um cartão MicroSD para armazenamento embarcado em cada dispositivo. Os pacotes não transmitidos foram salvos e marcados como pendentes. O *firmware* executou rotinas automáticas de reconexão Wi-Fi e *failover* de URL, viabilizando o envio automático de todo o conteúdo armazenado assim que a conexão foi restabelecida. Essa funcionalidade garante não apenas a integridade da série histórica de dados, mas também eleva a autonomia do sistema, eliminando a necessidade de intervenções humanas de manutenção em campo.

5 Conclusões

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento e a consolidação arquitetônica de um sistema IoT-SHM de baixo custo voltado para o monitoramento contínuo de múltiplos nós sensores em Obras de Arte Especiais (OAEs). A pesquisa conclui que o uso estratégico de processamento descentralizado (*edge computing* para cálculo local de FFT, com resolução espectral de ~0,012 Hz), associado a *hardware* de prateleira otimizado (ESP32-C3 e ADXL345, este último validado com erro médio de 2% frente a uma frequência de referência conhecida) e a uma rotina de calibração metrologicamente rigorosa (redução de 93% no erro sistemático de *offset*) viabiliza economicamente a aquisição de dados quase em tempo real em escala de matriz de sensores, e não apenas de um dispositivo isolado.

Em termos de gargalos de infraestrutura identificados e resolvidos, pode-se dizer que o dimensionamento *off-grid* alimentado por energia solar provou-se robusto, solucionando o fornecimento de energia em áreas remotas, mesmo sob condições climáticas adversas. A limitação crítica de conectividade observada no escalonamento dos dispositivos foi resolvida por meio da divisão de carga em modems operando em paralelo, em conjunto com sistemas de armazenamento em MicroSD para redundância.

Como contribuição adicional, destaca-se que a arquitetura de sensoriamento subjacente a este trabalho encontra-se protegida por pedido de patente junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI).

Como próximos passos para expandir o potencial de mercado e a precisão científica desta solução, sugerem-se: (i) Validação metrológica pela condução de ensaios comparativos entre o sistema proposto e sensores de referência de alto custo em campo, para atestar

formalmente a acurácia das respostas de aceleração e frequência em campo, complementando os testes laboratoriais já realizados; (ii) Avanços em conectividade com a exploração de tecnologias 5G, avaliando características de comunicação confiável e de baixa latência (URLLC) para matrizes densas em longas distâncias, minimizando o número de pontos de acesso necessários; (iii) Diagnósticos avançados na nuvem com base na integração dos dados processados em instâncias de *Machine Learning* e modelagem de Gêmeos Digitais (*Digital Twin*) diretamente na Camada de Aplicação, permitindo diagnósticos preditivos e identificação automatizada de anomalias, inclusive com desacoplamento estatístico dos efeitos térmicos (EOC) sobre a frequência natural, conforme discutido na seção 2.

6 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2019). *ABNT 9452: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas - Procedimento.* Rio de Janeiro: ABNT.

Clement, A., Lançon, H., & Servant, C. (2006). The Millau viaduct's monitoring and instrumentation system. *IABSE Symposium.*

De Sitter, W. R. (1984). Costs for service life optimization: The Law of Fives. *CEB-RILEM International Workshop on Durability of Concrete Structures.* Copenhagen: Comité Euro-International du Béton.

Farrar, C. R., & Worden, K. (12 de 12 de 2006). An introduction to structural health monitoring. *Phil. Trans. R. Soc. A* , pp. 303-315.

Karimi, F., Akbari, R., & Maalek, S. (2022). A Simple Conceptual Model for Estimating the First Bending Natural Frequency of Bridge Superstructures. *Shock and Vibration*. doi:https://doi.org/10.1155/2022/1202384

Kashima, Satoshi, Yanaka, Yukikazu, Suzuki, Shuichi, & Mori, Kunihisa. (2001). Monitoring the Akashi Kaikyo Bridge: First Experiences. *Structural Engineering International, 11*(2), pp. 120-123.

Moore, M., Phares, B. M., Graybeal, B. A., Rolander, D. D., & Washer, G. A. (2001). *Reliability of Visual Inspection for Highway Bridges, Volume I: Final Report.* Federal Highway Administration, McLean.

Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. (1996). *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications* (3rd ed.). Simon & Schuster/A Viacom Company.

Rittner, D. (2025). *CNN Brasil*. Acesso em 01 de 2026, disponível em https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/brasil/brasil-tem-55-mil-pontes-com-mais-de-50-anos-e-engenheiros-fazem-alerta/

Sohn, H. (15 de Fevereiro de 2007). Effects of environmental and operational variability on structural health monitoring. *Philosofical Trasactions of The Royal Society*, pp. 536-560.

Steenackers, G., & Guillaume, P. (2005). Structural health monitoring of the Z-24 Bridge in presence of environmental changes using modal analysis. *23rd International Modal Analysis Conference (IMAC).* Orlando: SEM.

Virlogeux, M. (2005). Millau Viaduct, France. *Structural Engineering International, 15*(1), pp. 4-7.