



## MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL (SHM) E SENSORIAMENTO: FLUXO DE DADOS VIA IOT COMO ESTRATÉGIA DE ENSINO NA ENGENHARIA CIVIL

### *STRUCTURAL HEALTH MONITORING (SHM) AND SENSING: IOT DATA FLOW AS A TEACHING STRATEGY IN CIVIL ENGINEERING*

DOI: 10.5281/zenodo.21346449



*Weberton Welks de Oliveira Motta<sup>1</sup>*

*Lívia Félix dos Santos<sup>2</sup>*

*Maisa Oliveira Bueno<sup>3</sup>*

*Bárbara Santos Teles<sup>4</sup>*

*Joana Darc Silva Pinto<sup>5</sup>*

*William Luiz Fernandes<sup>6</sup>*

#### RESUMO

O monitoramento da integridade estrutural (SHM) configura-se como um tema recente e com pouca inserção nos currículos de Engenharia Civil. Este estudo descreve o desenvolvimento e a validação de um sistema de sensoriamento eletrônico de baixo custo, baseado em Internet das Coisas (IoT), a ser instalado na Catedral Cristo Rei, em Belo Horizonte. O objetivo foi estabelecer um fluxo de trabalho funcional para a coleta e transmissão de dados integrados à tecnologia de Gêmeos Digitais. A metodologia compreendeu a programação de sensores de vibração e aceleração por meio do IoT DevKit, da RoboCore, com o envio das informações para armazenamento em nuvem via conexão Wi-Fi. Os resultados qualitativos comprovam o sucesso do ciclo de transmissão proposto, permitindo

1 Discente do curso de Engenharia Civil da PUC Minas, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8622-5242>

2 Discente do curso de Engenharia Civil da PUC Minas, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9798-2324>

3 Discente do curso de Engenharia Civil da PUC Minas, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0610-9228>

4 Discente do curso de Engenharia Civil da PUC Minas, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7613-3799>

5 Doutora em Engenharia de Materiais - Departamento de Engenharia Civil - IPUC - PUC Minas, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2946-0206>

6 Doutor em Engenharia de Estruturas - Departamento de Engenharia Civil - IPUC - PUC Minas, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3530-8198>





obter a resposta dinâmica, a ser inserido no futuro modelo da estrutura, de forma remota. O trabalho conclui que a aplicação dessa tecnologia oferece uma ferramenta prática e acessível para o ensino superior, preenchendo a lacuna pedagógica sobre métodos modernos de supervisão de obras complexas.

**Palavras-chave:** Monitoramento Estrutural; Ensino de Engenharia; IoT; Ciclo de Dados.

## ABSTRACT

Structural Health Monitoring (SHM) is an emerging field with limited presence in Civil Engineering curricula. This study describes the development and validation of a low-cost electronic sensing system, based on the Internet of Things (IoT), to be installed at the Cristo Rei Cathedral in Belo Horizonte. The objective was to establish a functional workflow for data collection and transmission integrated with Digital Twin technology. The methodology included programming vibration and acceleration sensors using the RoboCore IoT DevKit, with data sent to cloud storage via Wi-Fi. Qualitative results confirm the success of the proposed transmission cycle, allowing for the remote acquisition of dynamic responses to be integrated into the future structural model. The study concludes that the application of this technology provides a practical and accessible tool for higher education, filling the pedagogical gap regarding modern methods for supervising complex construction works.

**Keywords:** Structural Monitoring; Engineering Education; IoT; Data Cycle.

## 1. INTRODUÇÃO

A manutenção da integridade de elementos construtivos assegura a funcionalidade e a segurança de espaços habitáveis. Estruturas sofrem processos de envelhecimento, vibrações e eventos externos que podem comprometer sua estabilidade. Nesse contexto, o Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM) surge como uma técnica para detectar danos por meio da análise de respostas dinâmica e características modais. Embora a prática do SHM tenha se consolidado na década de 1980, sua aplicação em larga escala em obras civis ainda enfrenta obstáculos logísticos e financeiros.

O avanço tecnológico possibilitou a produção de concretos de alto desempenho, o que aumentou a necessidade de controle sobre deformações e módulos de elasticidade. Conforme apontam Pertence Júnior e Pertence (2010), o emprego de extensômetros em engenharia civil é fundamental para acompanhar a teoria e as aplicações práticas desses materiais. No entanto, o monitoramento contínuo em tempo real é um tema recente para a área da Engenharia Civil.





Essa condição gera uma lacuna no ensino superior sobre como supervisionar obras complexas com tecnologias acessíveis.



**Figura 1:** Catedral Cristo Rei. Fonte: Prefeitura de Belo Horizonte, 2024.

A Catedral Cristo Rei, última obra projetada por Oscar Niemeyer, destaca-se por sua arquitetura singular e geometria não convencional, o que impõe desafios técnicos significativos para a engenharia (Figura 1). Para prever o comportamento dessa estrutura, o uso de Gêmeos Digitais integrados à Internet das Coisas (IoT) torna-se uma opção viável de supervisão remota. Plataformas de prototipagem, como o Arduino, possibilitam a criação de sistemas de aquisição de dados com custo reduzido, facilitando a integração de sensores em laboratórios educacionais.

Este estudo propõe o desenvolvimento de um sistema de sensoriamento IoT a ser instalado na Catedral Cristo Rei para aquisição de dados. A pesquisa busca validar um ciclo de transmissão funcional, usando sensores de aceleração e vibração para coletar informações em nuvem. A escolha dessa metodologia justifica-se pela necessidade de democratizar o acesso ao monitoramento estrutural no ensino de engenharia, oferecendo uma alternativa prática aos sistemas comerciais.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO



A fundamentação teórica sintetiza a convergência entre dinâmica estrutural, instrumentação eletrônica e processamento de dados em nuvem. O uso de sensores para obtenção de deformações e vibrações supre a necessidade de monitoramento contínuo em elementos estruturais. Este fluxo informativo alimenta os modelos numéricos que espelham o comportamento da estrutura física. Esses fundamentos estabelecem a base técnica para a análise de obras de geometria não convencional.

## 2.1 Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM)

O Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM) consiste em uma estratégia técnica para diagnosticar o estado de conservação de edificações e obras de arte especiais. A detecção de danos ocorre por meio da observação de variações nas propriedades dinâmicas do sistema, permitindo intervenções preventivas. Guerra (2022) destaca que o SHM na construção civil tem se voltado para o acompanhamento contínuo por meio de sensores que captam vibrações e frequências naturais. Embora o tema possua alta relevância técnica, sua inserção no ensino de engenharia civil é um processo recente e em expansão.

O emprego de ferramentas eletrônicas para aferir deformações é uma prática estabelecida; Pertence Júnior e Pertence (2010) descrevem a importância dos extensômetros no controle de estruturas de concreto de alto desempenho. Contudo, o monitoramento contínuo em tempo real representa o progresso necessário para o campo de estudo. Duarte (2022) aponta que a análise modal, quando integrada a sistemas computacionais, amplia a capacidade de identificação de falhas antes que estas comprometam a segurança. Essa abordagem fundamenta a aplicação de Gêmeos Digitais.

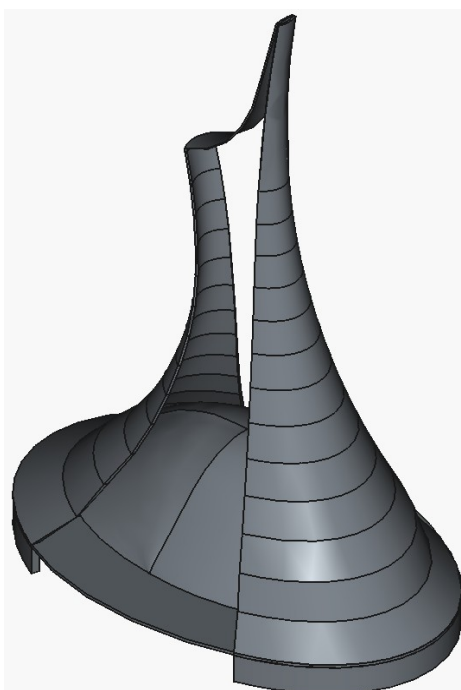
## 2.2 Gêmeos Digitais e Internet das Coisas (IoT)

O conceito de Digital Twin (DT), ou Gêmeo Digital, revisado pela NASA, define-se como uma simulação multifísica e multiescala de alta fidelidade. Esse modelo reflete o estado





de um elemento físico com base em sensores de tempo real e dados históricos. Tao et al. (2019) reforçam que o DT atua como um espelho digital, facilitando a previsão do comportamento estrutural sob diferentes carregamentos. A viabilidade desse sistema de supervisão depende diretamente do fluxo de informações gerado pela Internet das Coisas (IoT). A Figura 2 mostra o Gêmeo Digital, em desenvolvimento, para a Catedral Cristo Rei.



**Figura 2:** Gêmeo Digital (em desenvolvimento) para a Catedral Cristo Rei. Fonte: Autores, 2026.

Conforme Carneiro (2024), plataformas de prototipagem e sensores de baixo custo permitem o desenvolvimento de modelos experimentais funcionais para o ensino superior. A aplicação de dispositivos IoT facilita a aquisição de dados e o envio dessas informações para armazenamento em nuvem via conexão Wi-Fi. Silva et al. (2016) demonstram que sistemas de aquisição de dados meteorológicos e estruturais baseados em Arduino oferecem precisão comparável a equipamentos comerciais de custo elevado. Essa infraestrutura tecnológica será a base para a modelagem futura da Catedral Cristo Rei.

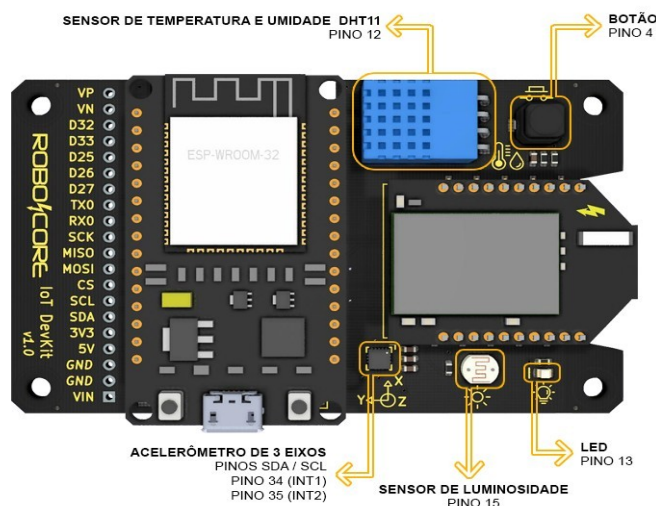


## 3. METODOLOGIA

O delineamento deste estudo possui natureza aplicada e caráter experimental, com foco na validação de um ciclo de transmissão de dados para o monitoramento estrutural. A abordagem metodológica organiza-se em quatro fases: especificação de componentes, programação lógica, estabelecimento do fluxo de dados e aplicação em campo.

### 3.1 Componentes e Instrumentação

A montagem do sistema eletrônico prioriza o emprego de tecnologias de baixo custo para viabilizar sua inserção em currículos de graduação. O núcleo do sistema baseia-se no IoT DevKit, da RoboCore, uma plataforma que integra microcontroladores com capacidades de conexão sem fio (Figura 3). Para a captação das grandezas físicas, foram selecionados sensores específicos que atendem às necessidades de supervisão de estruturas de concreto.



**Figura 3:** Placa IoT DevKit – LoRaWAN da Robocore. Fonte: Robocore, 2025a.

O sensor MMA8452Q permite a análise de aceleração em três eixos ortogonais (X, Y e Z), sendo essencial para detectar movimentações e vibrações mínimas na estrutura.



Complementarmente, o sensor DHT11 monitora a temperatura e a umidade relativa do ar, variáveis que, segundo Silva et al. (2016), influenciam diretamente as propriedades e a durabilidade do concreto. O uso de extensômetros, conforme discutido por Pertence Júnior e Pertence (2010), também integra o escopo de medições para aferir deformações pontuais nos elementos construtivos.

### 3.2 Programação e Lógica de Aquisição

O desenvolvimento do código fonte ocorre no ambiente da IDE do Arduino, um software de código aberto que facilita a compilação e o carregamento das instruções para a placa. A lógica de programação estabelece a frequência de leitura dos sensores e o tratamento inicial dos sinais captados. Um exemplo da estrutura lógica para a leitura de aceleração é apresentado na Figura 4.

```
1  /*****
2  * RoboCore - IoT DevKit - LoRaWAN
3  *
4  * Aprendendo a utilizar o sensor acelerometro
5  * do IoT DevKit
6  *****/
7
8  //Declaracao da biblioteca do sensor acelerometro
9  #include "RoboCore_MMAB452Q.h"
10
11 //Criamos a instancia que nos ajudara a fazer as leituras
12 MMAB452Q acel;
13
14 void setup() {
15
16     //Iniciamos uma comunicacao serial para exibir os valores no Monitor Serial
17     Serial.begin(115200);
18
19     //Inicializamos o acelerometro com uma funcao interna da biblioteca
20     acel.init();
21
22 }
23
24 void loop() {
25
26     //Com um unico comando fazemos a leitura do acelerometro e a partir dai ja temos as componentes X, Y e Z de uma forma simples para
27     //analise
28     acel.read();
29
30     //Se houver movimento no dispositivo, imprimimos no Monitor Serial uma mensagem
31     if((acel.x > 0.40) || (acel.y > 0.40) || (acel.z < 0.80)){
32         Serial.println("ALERTA! MOVIMENTO DETECTADO");
33     }
34 }
```

**Figura 4:** Exemplo de código para leitura de aceleração em 3 eixos. Fonte: Robocore (2025b).



Após a validação do código em ambiente laboratorial, a placa é conectada via USB para a transferência definitiva dos parâmetros. Carneiro (2024) reforça que o aprendizado dessa etapa técnica prepara o estudante para lidar com sistemas de aquisição de dados modernos e integrados.

### 3.3 Ciclo de Transmissão de Dados e Gêmeo Digital

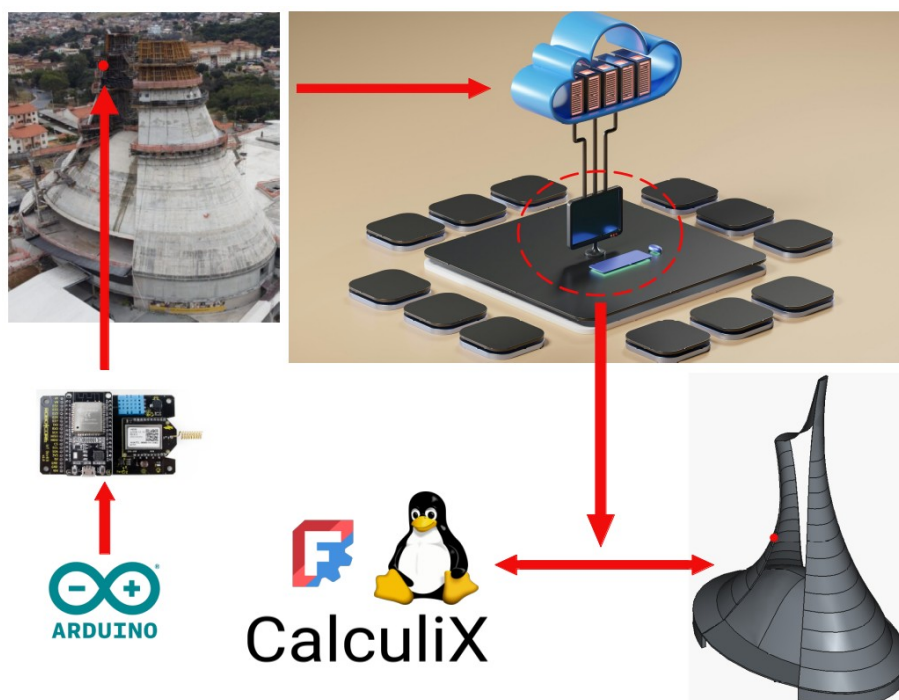
A funcionalidade do sistema IoT reside na capacidade de enviar informações remotamente. O processo inicia-se com a coleta física pelo sensor e o processamento pelo microcontrolador. Em seguida, os dados são transmitidos via conexão Wi-Fi para uma planilha armazenada em nuvem (Figura 5). Esse fluxo assegura a acessibilidade das informações para todos os colaboradores do projeto em tempo real.

| DATE - TIME         | ACCEL X (m/s <sup>2</sup> ) | ACCEL Y (m/s <sup>2</sup> ) | ACCEL Z (m/s <sup>2</sup> ) |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 11/27/2025 11:13:33 | -9.807                      | -0.229852                   | 1.072641                    |
| 11/27/2025 11:13:39 | -9.921926                   | -0.229852                   | 1.110949                    |
| 11/27/2025 11:13:45 | -9.883617                   | -0.26816                    | 1.149258                    |
| 11/27/2025 11:13:51 | -9.883617                   | -0.26816                    | 1.110949                    |
| 11/27/2025 11:13:58 | -9.883617                   | -0.26816                    | 1.110949                    |
| 11/27/2025 11:14:05 | -9.883617                   | -0.26816                    | 1.110949                    |
| 11/27/2025 11:14:10 | -9.921926                   | -0.26816                    | 1.110949                    |
| 11/27/2025 11:14:16 | -9.921926                   | -0.26816                    | 1.110949                    |
| 11/27/2025 11:14:22 | -9.883617                   | -0.26816                    | 1.110949                    |
| 11/27/2025 11:14:28 | -9.883617                   | -0.229852                   | 1.072641                    |
| 11/27/2025 11:14:34 | -9.921926                   | -0.26816                    | 1.149258                    |
| 11/27/2025 11:14:40 | -9.883617                   | -0.26816                    | 1.110949                    |
| 11/27/2025 11:14:46 | -9.883617                   | -0.26816                    | 1.149258                    |
| 11/27/2025 11:14:52 | -9.883617                   | -0.229852                   | 1.110949                    |
| 11/27/2025 11:14:57 | -9.921926                   | -0.229852                   | 1.110949                    |
| 11/27/2025 11:15:03 | -9.921926                   | -0.26816                    | 1.072641                    |
| 11/27/2025 11:15:10 | -9.883617                   | -0.229852                   | 1.034332                    |
| 11/27/2025 11:15:18 | -9.883617                   | -0.229852                   | 1.110949                    |
| 11/27/2025 11:15:24 | -9.883617                   | -0.26816                    | 1.034332                    |
| 11/27/2025 11:15:31 | -9.883617                   | -0.229852                   | 1.110949                    |
| 11/27/2025 11:15:37 | -9.883617                   | -0.26816                    | 1.110949                    |

**Figura 5:** Trecho da planilha com acelerações obtidas pela placa. Fonte: Autores, 2025.



Este ciclo de transmissão alimentará o Gêmeo Digital (DT) da Catedral Cristo Rei (Figura 6). O ponto indicado em vermelho representa o local em que o sensor foi instalado para a coleta de dados. Conforme a definição de Tao et al. (2019), o DT atua como uma simulação de ultrafidelidade que reflete o estado real da obra. O monitoramento contínuo permite a atualização constante do modelo numérico, facilitando a identificação de anomalias dinâmicas. Duarte (2022) destaca que essa integração entre dados reais e modelos simulados é o diferencial para diagnósticos assertivos na engenharia civil contemporânea.



**Figura 6:** Ciclo de transmissão proposto. Fonte: Autores, 2026.

### 3.4 Etapa Executiva na Catedral Cristo Rei

A fase de campo compreende a instalação física do dispositivo no pórtico da Catedral Cristo Rei (Figura 7). A escolha do local de fixação foi feita de acordo com a etapa de concretagem em que a obra se encontrava. A metodologia prevê a coleta de dados de vibração



e aceleração para futuro lançamento dos dados, em tempo real, no modelo numérico, bem como a realização da análise modal da estrutura. Guerra (2022) afirma que essa prática experimental é fundamental para validar a eficiência de sensores eletrônicos em obras de geometria não convencional.

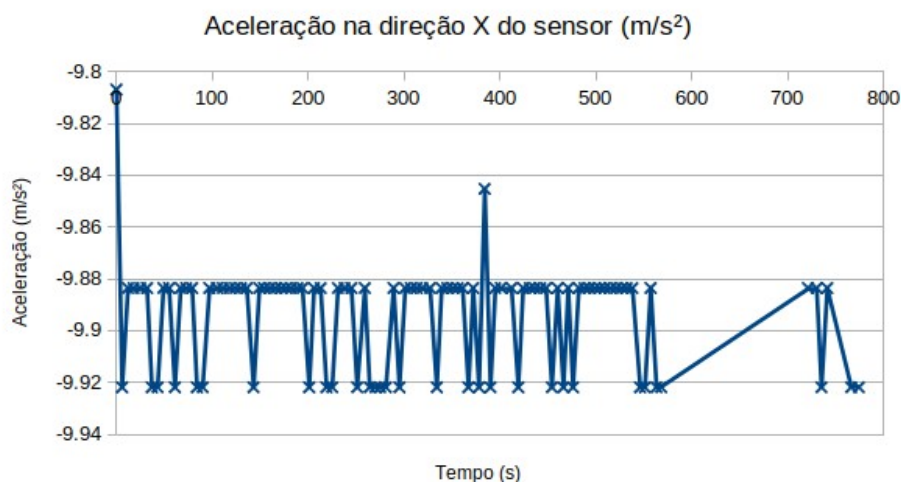


**Figura 7:** Placa de sensores para instalação na Catedral. Fonte: Autores, 2026.

## 4. RESULTADOS PARCIAIS

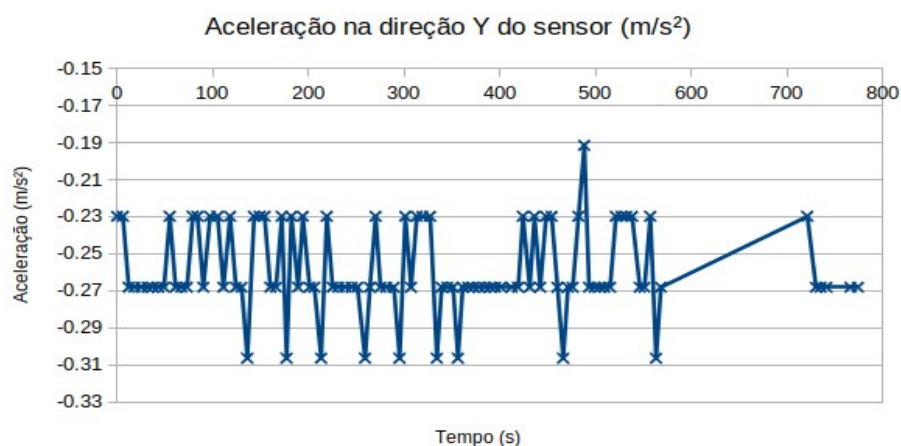
A validação do sistema eletrônico ocorreu mediante a observação do fluxo de dados gerado pelos sensores instalados nos pórticos da Catedral Cristo Rei. O ciclo de transmissão mostrou-se funcional, permitindo a recepção remota de informação em intervalos regulares via Wi-Fi. Este processo espelha o conceito de supervisão contínua defendido por Guerra (2022) para a manutenção preventiva e o diagnóstico assertivo de obras civis.

Os registros obtidos em campo detalham as variações cinemáticas da estrutura sob carregamentos de serviço. Os Gráficos 1, 2 e 3 ilustram as acelerações obtidas pelo sensor nas três direções.



**Gráfico 1:** Aceleração obtida pelo sensor na direção X. Fonte: Autores, 2025

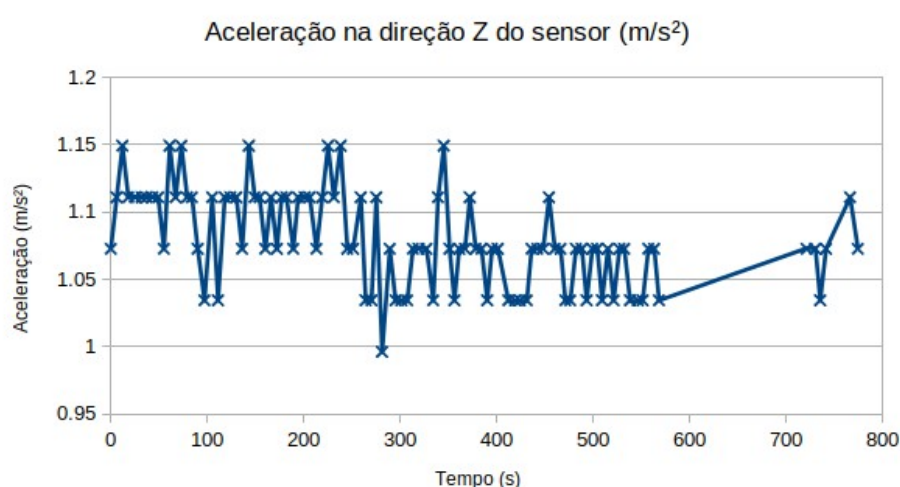
O Gráfico 1 mostra valores que oscilam predominantemente entre  $-9,88 \text{ m/s}^2$  e  $-9,92 \text{ m/s}^2$ , e corresponde à componente da aceleração da gravidade local. A permanência do sinal nesta faixa confirma que o dispositivo foi instalado com o seu eixo X alinhado à verticalidade aproximada da estrutura. Conforme apontam Silva et al. (2016), a proximidade com o valor teórico da gravidade valida o funcionamento do sensor MMA8452Q, embora o pequeno desvio observado possa ser atribuído à falta de uma calibração refinada ou a inclinações residuais na fixação física ao pórtico da Catedral.



**Gráfico 2:** Aceleração obtida pelo sensor na direção Y. Fonte: Autores, 2025



Nas direções ortogonais Y e Z (Gráficos 2 e 3, respectivamente), os valores de aceleração não foram nulos, situando-se em torno de  $-0,27 \text{ m/s}^2$  e  $1,10 \text{ m/s}^2$ , respectivamente. Em um cenário de repouso absoluto e alinhamento perfeito, espera-se valores próximos a zero. A existência desses resíduos constantes indica movimentação da estrutura, o que se confirma pela fase de obras em que a estrutura se encontra, bem como aos efeitos de vento durante a coleta de dados.



**Gráfico 3:** Aceleração obtida pelo sensor na direção Z. Fonte: Autores, 2025

Observa-se em todos os gráficos um padrão de “escada” nas transições de valores. Este fenômeno decorre da resolução de bits do microcontrolador e da sensibilidade do sensor escolhido. Pertence Júnior e Pertence (2010) ressaltam que a compreensão das limitações de resolução é basilar para o controle de deformações e vibrações em estruturas. Embora o ruído eletrônico esteja presente, a estabilidade das leituras permite a extração futura das frequências por meio do processamento matemático, conforme a lógica de Gêmeos Digitais proposta por Tao et al. (2019).

A constância dos dados recebidos via Wi-Fi prova que o ciclo de transmissão é resiliente a interferências externas. Duarte (2022) destaca que a capacidade de manter um



fluxo de dados estável, mesmo com sensores de baixo custo, é o primeiro passo para um monitoramento da integridade estrutural (SHM) eficaz. Portanto, os resultados temporais validam a aplicação do sistema IoT DevKit como ferramenta de supervisão remota para a Catedral Cristo Rei, garantindo a integridade do fluxo de informações necessário para o diagnóstico estrutural.

## 5. CONCLUSÃO

O estudo alcançou o propósito de validar a viabilidade de um sistema IoT para coleta e transmissão de dados a serem usados, posteriormente, no monitoramento da Catedral Cristo Rei. A metodologia proposta estabeleceu um ciclo de transmissão funcional, integrando sensores de aceleração à tecnologia de armazenamento de dados em nuvem. Este resultado comprova que ferramentas de baixo custo podem ser úteis para obtenção de dados para posterior análise e diagnóstico de integridade em estruturas, incluindo as de geometria não convencional.

A contribuição deste trabalho reside em uma alternativa prática para o ensino de Engenharia Civil, preenchendo a lacuna sobre métodos modernos de supervisão estrutural. O fluxo automatizado de aquisição e análise de dados fornece um importante suporte técnico para decisões durante e após a execução da obra. Por fim, pretende-se futuramente utilizar os dados obtidos para alimentar o gêmeo digital numérico, que se encontra em desenvolvimento, de forma a se obter análises mais completas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). Expressamos gratidão à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas) pelo

**Revista *OWL Journal*, Campina Grande - PB, v. 4 n. 7 (2026) - ISSN 2965-2634**

**A Revista *OWL Journal* está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição (CC BY)**





suporte institucional, bem como ao Grupo de Pesquisa SHM PUC Minas, por todo o apoio e incentivo à realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

BELO HORIZONTE. Prefeitura. **Prefeitura reconhece construção da Catedral Cristo Rei como interesse público.** [Belo Horizonte], 20 jun. 2024. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/noticias/prefeitura-reconhece-construcao-da-catedral-cristo-rei-como-interesse-publico>. Acesso em: 27 jun. 2026.

CARNEIRO, Ana Carolinne Almeida. **Utilização de extensômetros elétricos para o monitoramento do módulo de elasticidade do concreto.** 2024. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, 2024.

DUARTE, João Gabriel da Costa de Souza. **Sobre o monitoramento de saúde estrutural utilizando análise modal: uma abordagem de aprendizado de máquina e aprendizado profundo.** 2022. 103 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2022.

GUERRA, Juan Rafael Filgueira. **Monitoramento da Saúde Estrutural na Construção Civil Usando Sensor com Superfície Seletiva em Frequência.** 2022. 116 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

PERTENCE JÚNIOR, Antonio; PERTENCE, Antônio Eustáquio de Melo. **Extensômetros em engenharia civil: teoria e aplicações.** Construindo, Belo Horizonte, v. 2, n. 1, p. 24-26, jan./jun. 2010.

ROBOCORE. . [S. l.], 2025a. **IoT DevKit - LoRaWAN.** Disponível em: <https://www.robocore.net/tutoriais/iot-devkit-introducao>. Acesso em: 28 jun. 2026.

ROBOCORE. . [S. l.], 2025b. **IoT DevKit - LoRaWAN.** Disponível em: <https://www.robocore.net/tutoriais/iot-devkit-leitura-do-acelerometro>. Acesso em: 28 jun. 2026.



# REVISTA OWL (*OWL Journal*)

www.revistaowl.com.br – ISSN: 2965-2634



SILVA, A. C. M. et al. **Estação meteorológica automática de baixo custo**. Multiverso: Revista Eletrônica do Campus Juiz de Fora - IF Sudeste MG, Juiz de Fora, v. 1, n. 1, p. 46-56, jan. 2016.

TAO, F. et al. **Digital Twin in Industry: State-of-the-Art**. IEEE Transactions on Industrial Informatics, v. 15, n. 4, p. 2405-2415, 2019. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.

*Recebido em: 29/06/2026*

*Aprovado em: 05/07/2026*

*Publicado em: 13/07/2026*

Revista *OWL Journal*, Campina Grande - PB, v. 4 n. 7 (2026) - ISSN 2965-2634

**A Revista *OWL Journal* está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição (CC BY)**

