

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA – CAMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA  
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECATRÔNICA**

**THIAGO KOERICH CLAUDINO**

**MONITORAMENTO DE CARREGAMENTOS  
ESTÁTICOS E DINÂMICOS EM ESTRUTURAS  
UTILIZANDO TECNOLOGIAS IOT**

**FLORIANÓPOLIS, 2019.**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA – CAMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA  
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECATRÔNICA**

**THIAGO KOERICH CLAUDINO**

**MONITORAMENTO DE CARREGAMENTOS  
ESTÁTICOS E DINÂMICOS EM ESTRUTURAS  
UTILIZANDO TECNOLOGIAS IOT**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina – IFSC, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica.

Orientador:  
Prof<sup>o</sup>. Dr. André Roberto de Sousa.

**FLORIANÓPOLIS, 2019**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Claudino, Thiago Koerich

**Monitoramento de carregamentos estáticos e dinâmicos utilizando tecnologias IOT / Thiago Koerich Claudino ; orientação de André Roberto de Sousa.** - Florianópolis,

SC, 2019.

54 p.

**Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Mecatrônica. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica.**

Inclui Referências.

**1. Monitoramento. 2. Estruturas. 3. IOT. I. Sousa, André Roberto de. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica. III. Título.**

**MONITORAMENTO DE CARREGAMENTOS  
ESTÁTICOS E DINÂMICOS EM ESTRUTURAS  
UTILIZANDO TECNOLOGIAS IOT**

**THIAGO KOERICH CLAUDINO**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Florianópolis, 19 de novembro de 2019.

Banca Examinadora:

---

André Roberto de Sousa, Prof. Dr.  
Instituto Federal de Santa Catarina

---

Adriano Régis, Prof. Me.  
Instituto Federal de Santa Catarina

---

Mário de Noronha Neto, Prof. Dr.  
Instituto Federal de Santa Catarina



INSTITUTO FEDERAL  
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
SANTA CATARINA CAMPUS FLORIANÓPOLIS

## DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO

Declaro que o(a) estudante **THIAGO KOERICH CLAUDINO**, matrícula nº **131003472-9**, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado **MONITORAMENTO DE CARREGAMENTOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS EM ESTRUTURAS UTILIZANDO TECNOLOGIAS IOT**, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 13 de Dezembro de 2019.

Prof. Orientador do TCC: André Roberto de Sousa

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço todos aqueles que tiveram participação direta e tornaram este trabalho possível de ser realizado, especialmente o orientador Prof. Dr. André Roberto de Sousa e os discentes Cristian Shikanai Feliciano e Vinicius Figueiró Guazzelli.

*“Aprendemos com o que podemos medir. A enormidade do que foge aos nossos instrumentos, o mistério que nos cerca, deveria inspirar um profundo senso de humildade.” (Marcelo Gleiser)*

## RESUMO

O monitoramento estrutural tem como objetivo implementar estratégias de detecção de danos em estruturas de engenharia. O processo de monitoramento envolve a utilização de sistemas integrados, os quais realizam os processos de medição, aquisição, transmissão e avaliação de dados que possam indicar a deterioração da estabilidade da estrutura. Neste contexto, desenvolveu-se no laboratório de Metrologia do IFSC Campus Florianópolis um sistema de monitoramento remoto de estruturas, o qual foi fundamentado em sistemas reais e desenvolvido utilizando soluções de baixo custo. O sistema é composto por um modelo de ponte em alumínio, uma rede de transdutores responsável pelo monitoramento de deslocamentos e vibrações, uma plataforma IOT responsável pela aquisição e transmissão de dados, e uma página web responsável pela apresentação dos resultados obtidos. Ao final do desenvolvimento, realizou-se a avaliação do desempenho do sistema mediante ensaios de carregamentos estáticos e dinâmicos.

Palavras-chave: Monitoramento, Estruturas; IOT.



## **ABSTRACT**

Structural health monitoring aims to implement damage detection strategies for engineering structures. The monitoring process involves the use of integrated systems, which perform the processes of measurement, acquisition, transmission and evaluation of data that may indicate deterioration of structural stability. In this context, a structural health monitoring system was developed at IFSC Campus Florianópolis, based on systems currently used in industry and developed using low cost solutions. This system consists of an aluminum bridge model, a transducer network responsible for monitoring displacements and vibrations, an IOT platform used in data acquisition and transmission, and a web page to present a summary of the results. After the development, the system performance was evaluated through static and dynamic load tests.

Keywords: Monitoring, Structures; IOT.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1 Justificativa e relevância.....	11
1.2 Objetivos .....	14
1.2.1 Objetivo geral .....	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
<b>2 ENGENHARIA ESTRUTURAL</b> .....	<b>16</b>
2.1 Regulamentação para elaboração de projetos estruturais .....	16
2.2 Análise estrutural.....	18
2.3 Monitoramento de estruturas.....	20
<b>3 SISTEMAS DE MONITORAMENTO ESTRUTURAL</b> .....	<b>22</b>
3.1 Transdutores .....	23
3.2 Aquisição de dados .....	25
3.3 Transmissão de dados.....	27
3.4 Tratamento e visualização de dados.....	28
<b>4 DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA O MONITORAMENTO DE DESLOCAMENTOS E VIBRAÇÕES UTILIZANDO TECNOLOGIAS IOT</b> .....	<b>29</b>
4.1 Estrutura monitorada .....	29
4.2 Conjunto de transdutores .....	31
4.2.1 Transdutor de deslocamentos baseado em potenciômetro linear deslizante....	31
4.2.2 Transdutor de deslocamentos do tipo medidor de profundidade de sulcos de pneu.....	33
4.2.3 Acelerômetro baseado em MEMS.....	35
4.2.4 Sensor de deslocamentos do tipo telêmetro laser.....	37
4.3 Plataforma de IOT.....	38
4.4 Visualização de dados.....	41
<b>5 VALIDAÇÃO METROLÓGICA DO SISTEMA DE MONITORAMENTO</b> .....	<b>43</b>
5.1 Calibração e avaliação dos transdutores.....	43
5.2 Validação metrológica do sistema para carregamentos estáticos.....	45
5.3 Validação metrológica do sistema para carregamentos dinâmicos.....	49
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>51</b>
<b>7 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>53</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

Estruturas metálicas e de concreto armado são utilizadas de forma diversificada em obras de engenharia, estando presentes em diferentes domínios desta, como nas áreas de construção civil e metalmeccânica, por exemplo. Durante a concepção deste tipo de estrutura, têm-se como um dos requisitos de projeto a conservação da sua estabilidade geométrica ao longo do tempo. A estabilidade geométrica está associada à capacidade da estrutura em manter as suas dimensões inalteradas ao longo do tempo e é um forte indicador de problemas de projeto, construção e manutenção da estrutura.

Na área de construção civil, instabilidades na geometria de estruturas podem indicar acomodação de solo, degradação do material com o tempo e com o uso, entre outros problemas. Em certos casos, estas estruturas podem acabar cedendo devido influências externas. Em estruturas antigas, ocorre o problema da deterioração devido ao envelhecimento da própria estrutura.

No âmbito industrial também há situações onde a estabilidade geométrica de estruturas é crítica, especialmente nos casos em que se emprega ferramentais cuja precisão de trabalho depende da manutenção da sua geometria ao longo do tempo. Em qualquer caso, estas instabilidades são alertas para que se tomem ações para garantir a segurança operacional destas estruturas.

### **1.1 Justificativa e Relevância**

É frequente a ocorrência de problemas de estabilidade em grandes estruturas no Brasil, por ação do uso e do tempo, e pela inexistência de práticas de monitoramento e de manutenção destas estruturas. Um dos últimos casos que evidenciou essa questão aconteceu na cidade de São Paulo, em novembro de 2018, onde o viaduto da marginal pinheiros cedeu devido ao colapso de um pilar de sustentação da estrutura. O viaduto ficou 4 meses interditado, conforme apresenta a Figura 1, prejudicando o tráfego na região e gerando um prejuízo direto de R\$ 30 milhões à prefeitura de São Paulo, referente aos custos de reparos emergenciais.

**Figura 1 – Viaduto da marginal pinheiros**



Fonte: [www.g1.com.br](http://www.g1.com.br) (2018).

Estas ações emergenciais de reparo são sempre muito custosas e arriscadas para a integridade da estrutura e para os seus usuários. No setor industrial também há situações onde a estabilidade geométrica de estruturas é crítica. A produção de aeronaves, por exemplo, emprega ferramentais de grande porte cuja precisão de trabalho depende da manutenção da sua geometria ao longo do tempo. Em alguns tipos de ferramental, alterações geométricas da ordem de 0,1 mm são capazes de inviabilizar a sua operação, como, por exemplo, uma linha de montagem responsável pelo encaixe das asas de um avião em sua fuselagem, conforme a Figura 2. Nestes casos, a produção de peças tem de ser interrompida regularmente para que a estrutura seja medida e verificada se está estável. Essa operação causa perda de produtividade além de ter alto custo de realização, fazendo com que o setor aeroespacial invista fortemente no monitoramento da estabilidade destes ferramentais como forma de evitar paradas na produção e como forma de melhor assegurar a exatidão dos ferramentais.

**Figura 2 - Ferramentais de precisão empregados na construção de aeronaves.**



Fonte: [www.electroimpact.com](http://www.electroimpact.com) (2019).

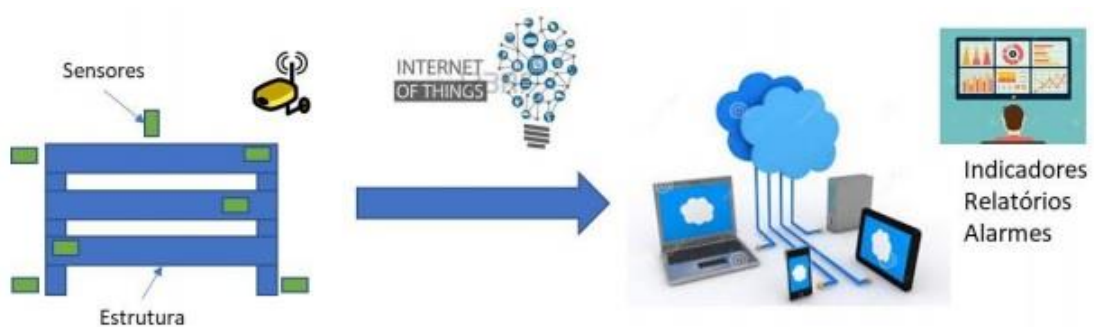
Para evitar a ocorrência de falhas estruturais, ou mudanças na geometria de uma estrutura, deve-se empregar meios para avaliar as alterações estruturais, identificando problemas estruturais ainda em fase inicial, gerando informações valiosas para ações preventivas e corretivas. É neste contexto que se insere a ideia do monitoramento da estabilidade geométrica de estruturas, estratégia mais racional, mas, infelizmente, quase inexistente no Brasil. O monitoramento da estabilidade geométrica de estruturas consiste na implementação de uma estratégia de detecção de danos em estruturas de engenharia, como, por exemplo, mudanças no material e/ou propriedades geométricas do sistema estrutural. O processo de monitoramento envolve a utilização de um conjunto de sensores, instalados ao longo da estrutura, os quais realizam medições ao longo do tempo de variáveis que possam indicar a deterioração da sua estabilidade, como deslocamentos e vibrações, por exemplo. As informações reveladas no monitoramento contínuo de estruturas têm grande utilidade em ações de monitoramento preditivo, podendo ser utilizadas para a geração de relatórios, diagnósticos e alarmes que auxiliam nas ações de manutenção, assegurando a confiabilidade operacional da estrutura monitorada.

Paralelamente, o desenvolvimento da internet tem sido incorporado aos sensores, fazendo surgir dispositivos inteligentes com a capacidade de medir e comunicar os resultados, o que tem permitido o desenvolvimento acelerado de tecnologias de monitoramento inovadoras. Inclui-se neste contexto a Internet das Coisas ou IoT, do inglês *Internet of Things*, a qual segundo Greengard (2015) é uma rede de objetos físicos capaz de reunir e transmitir dados. Surgiu com os avanços da internet e das tecnologias embarcadas em dispositivos e objetos, e tem crescido de forma acelerada em todos os segmentos do cotidiano da sociedade e da indústria, nos mais variados segmentos. Um dos maiores benefícios dessa interconexão entre objetos é a capacidade de medir e comunicar variáveis de um processo para que sejam avaliadas em tempo real.

Nesse contexto, as atividades de monitoramento de processos têm sido particularmente beneficiadas com as tecnologias IoT. A partir de um dispositivo de medição com capacidade de conexão com a internet é possível tornar a informação disponível a outros dispositivos, possibilitando a realização do monitoramento à distância, permitindo a identificação de problemas estruturais em tempo real, assegurando eficiência e confiabilidade. Os dados de medição podem ser processados em computadores distribuídos e conectados (cloud computing) e

disponibilizados para dispositivos portáteis como tablets e smartphones. Desse modo, é possível desenvolver um sistema de monitoramento remoto, e isso é um grande avanço para várias áreas profissionais, dentre elas o monitoramento de grandes estruturas, conforme indica a Figura 3.

**Figura 3 - Monitoramento de estruturas utilizando tecnologias IOT.**



Fonte: Elaboração própria (2019).

Um sistema de monitoramento remoto de estruturas, caso fosse utilizado no viaduto da marginal pinheiros, possibilitaria a sinalização de problemas com antecedência, permitindo aos responsáveis técnicos realizarem as devidas manutenções necessárias dentro do prazo.

Neste contexto, foi desenvolvido no laboratório de Metrologia do IFSC Campus Florianópolis um sistema de monitoramento de estruturas, composto por uma estrutura, sensores para monitoramento, uma plataforma IOT e um servidor Web. A estrutura utilizada foi um modelo de ponte de alumínio, a qual foi submetida a esforços variados, como, por exemplo, aplicações de carga ao longo de sua extensão. Durante os ensaios, o comportamento do modelo foi monitorado com a utilização de sensores diversos, e, com auxílio de uma plataforma IOT, os sinais obtidos pelos sensores foram enviados para um servidor Web local.

## 1.2 Objetivos

Neste contexto, motivados pela necessidade de monitoramento da estabilidade geométrica de grandes estruturas e pelo grande potencial de sucesso e inovação que as tecnologias IoT trazem para esta aplicação, este trabalho apresenta um sistema de monitoramento remoto de estruturas, composto por sensores para o monitoramento de deslocamento e vibrações, instalados em um modelo de ponte em

alumínio. Dentro do conceito IoT, os dados medidos são transmitidos via internet para um servidor Web local com auxílio de uma plataforma IOT, possibilitando realizar o monitoramento da estrutura remotamente. Os resultados, diagnósticos e prognósticos acerca da estabilidade da estrutura podem ser acessados por qualquer usuário conectado na mesma rede local.

#### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho foi avaliar um sistema de monitoramento de estabilidade de estruturas utilizando tecnologias IOT, possibilitando realizar o monitoramento remoto de uma estrutura e enviar os respectivos dados obtidos para um servidor Web local.

#### 1.2.2 Objetivos específicos

Para atender ao objetivo geral deste trabalho foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- a) estudar casos de problemas estruturais e identificar os tipos e magnitudes das variáveis presentes;
- b) estudar tecnologias de sensores aplicáveis à medição da estabilidade de estruturas;
- c) detalhar as tecnologias IoT empregadas no desenvolvimento de sistemas de monitoramento;
- d) interligar os dispositivos de medição com a internet e transmitir dados em tempo real para a rede;
- e) desenvolver aplicativos computacionais para adquirir e processar os dados de medição;
- f) validar experimentalmente o sistema aplicando-o no monitoramento de uma estrutura.

## **2 ENGENHARIA ESTRUTURAL**

Engenharia estrutural é um dos ramos das engenharias que utilizam cálculo estrutural dedicado ao projeto de estruturas. De modo resumido, a engenharia estrutural trabalha com a aplicação de conceitos de mecânica dos sólidos para o projeto de edifícios, pontes, barragens, túneis, plataformas de petróleo, aviões e outras estruturas.

Segundo Martha (2010), a engenharia estrutural trata do planejamento, projeto, construção e manutenção de sistemas estruturais, os quais podem ser concebidos como um empreendimento por si só, como no caso de pontes, ou podem ser utilizados como esqueletos de outros empreendimentos, como, por exemplo, edifícios. Em ambos os casos, antes de se iniciar a construção de uma estrutura, deve-se haver um projeto estrutural, o qual deve ser amparado por normas técnicas, de modo que a estrutura seja desenvolvida atendendo as necessidades, e satisfazendo condições de segurança, ambientais, legais e entre outras.

### **2.1 Regulamentação para elaboração de projetos estruturais**

Projetos estruturais devem seguir normas técnicas, de modo a atender uma série de exigências. Deste modo, órgãos responsáveis pela normalização técnica, tal como a ABNT à nível nacional, elaboraram uma série de normas técnicas referentes ao projeto e construção de estruturas. Entre as normas técnicas vigentes, podemos ressaltar as seguintes:

- a) NBR 6118 - Projeto de Estruturas de Concreto Armado;
- b) NBR 14931 - Execução de Estruturas de Concreto;
- c) NBR 6122 - Projeto e Execução de Fundações;
- d) NBR 9062 - Projeto de Estruturas de Concreto Armado Pré-moldado;
- e) NBR 7190 - Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira;
- f) NBR 8800 - Projeto de Estruturas de Aço de Edifícios;
- g) NBR 6120 - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações;
- h) NBR 6123 - Ações e segurança nas estruturas.



A norma NBR6118, por exemplo, define os requisitos básicos exigíveis para projeto de estruturas de concreto simples, armado e protendido. Entre esses requisitos, encontram-se os requisitos gerais de qualidade, tais como a capacidade de resistência à ruptura, desempenho em serviço e durabilidade da estrutura. A NBR6118 também regulamenta diretrizes que devem ser seguidas visando a durabilidade destas estruturas, como, por exemplo, a utilização de sistemas de drenagem.

Após a queda do viaduto da Marginal Pinheiros, apresentado na seção 1.1, engenheiros do Instituto de Pesquisas Tecnológicas da Universidade de São Paulo realizaram uma vistoria no local, onde um dos problemas encontrados foi de drenagem precária da água e diversos pontos com infiltração. A água, quando não é drenada, pode atingir o concreto armado causando corrosão da armadura (MILITITSKY; CONSOLI; SCHNAID, 2005), comprometendo toda a estrutura. Uma das evidências da existência de infiltração foi a constatação do crescimento de plantas ao longo da extensão do viaduto, conforme mostra a Figura 4.

**Figura 4 – Plantas ao longo do viaduto da Marginal Pinheiros.**



Fonte: Ministério Público do Estado de São Paulo (2019).

Casos como este evidenciam a necessidade de se cumprir as normas técnicas vigentes. No entanto, o cumprimento de normas, somente, não garante a realização de um projeto adequado. Além de cumprir as regulamentações impostas, é fundamental que durante o projeto estrutural realize-se previsões do comportamento da estrutura para diferentes circunstâncias.

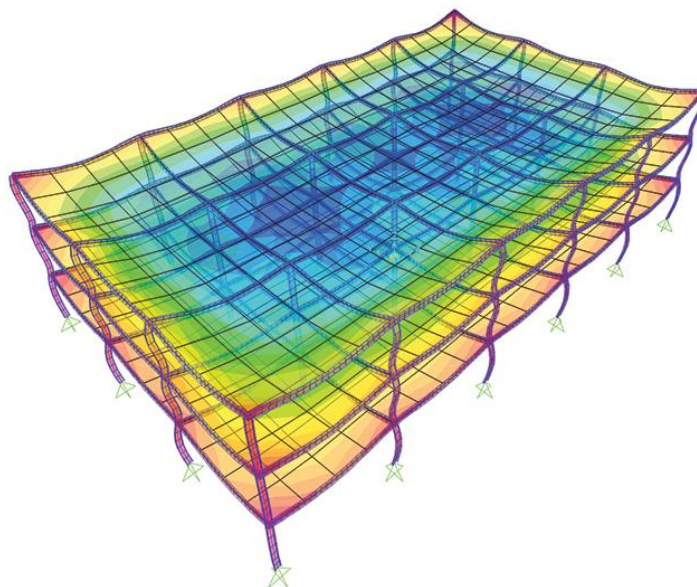
## 2.2 Análise estrutural

Segundo Martha (2010), o projeto estrutural parte de uma concepção geral da estrutura e termina com a documentação que possibilita a sua construção. Entre as etapas de projeto, encontra-se a previsão do comportamento da estrutura de tal forma que ela possa atender às condições para as quais ela foi concebida.

A análise estrutural é a fase do projeto estrutural em que é feita a idealização do comportamento da estrutura, tendo como objetivo a determinação dos efeitos de cargas sobre estruturas físicas e seus componentes, bem como a determinação dos deslocamentos e deformações correspondentes.

Paralelamente, o desenvolvimento de métodos computacionais tem sido incorporado a análise estrutural, conforme Martha (2010). Atualmente, engenheiros realizam modelos estruturais computacionais, os quais agregam diversos aspectos necessários para o desenvolvimento da análise, tais como propriedades de materiais, carregamentos e condições de suporte. Deste modo, é possível avaliar de forma idealizada o comportamento de uma estrutura para diversas solicitações, antes mesmo da sua construção. Atualmente, há uma gama de soluções computacionais para análise estrutural disponíveis no mercado, como, por exemplo, o software SAP2000, Figura 5, o qual possibilita o projeto, análise e otimização de estruturas, as quais podem variar desde modelos básicos até modelos complexos.

**Figura 5 – Análise estrutural computacional utilizando o software SAP 2000.**



Fonte: [www.csiamerica.com](http://www.csiamerica.com) (2019).

Uma análise estrutural realizada de modo a não considerar todas as hipóteses possíveis para o comportamento de um modelo sujeito à carregamentos diversos, culmina no projeto e construção de uma estrutura que pode falhar em serviço. Um dos exemplos mais notáveis é da ponte Tacoma Narrows, Figura 6, nos Estados Unidos, que colapsou alguns meses após a sua inauguração, devido à um fenômeno chamado de flutter aeroelástico, que ocorre quando ventos em alta velocidade combinam com a frequência natural da estrutura. Investigações posteriores atestaram que a forma da ponte era aerodinamicamente instável ao longo da sua direção transversal.

**Figura 6 – Movimentos torsionais da ponte Tacoma Narrows.**



Fonte: [www.simscale.com](http://www.simscale.com) (2019).

Outro caso notável de negligência em projetos estruturais, foi a ocorrência do desabamento de um trecho de cerca de 20 metros da ciclovia Tim Maia, Figura 7, no Rio de Janeiro, em abril de 2016. O trecho desabou durante uma forte ressaca do mar, três meses após a sua inauguração. Um laudo pericial feito pelo CREA-RJ constatou que faltaram estudos preliminares oceanográficos dos efeitos das ondas sobre a estrutura da ciclovia, o que seria imprescindível para a elaboração do projeto, uma vez que o trecho fica entre o costão e o mar.

**Figura 7 – Ciclovia Tim Maia.**



Fonte: [www.g1.com.br](http://www.g1.com.br) (2016).

Além da análise estrutural, outros métodos também podem ser aplicados para avaliação de projeto, como, por exemplo, a realização de ensaios utilizando maquetes. Os túneis de vento, por exemplo, possibilitam simular o efeito do movimento de ar sobre um modelo em menor escala de uma estrutura que está sendo projetada. A Figura 8 apresenta uma maquete da ponte Dala Friendship Bridge, em Myanmar, durante testes em um túnel de vento.

**Figura 8 – Dala Friendship Bridge.**



Fonte: [www.tesolution.com](http://www.tesolution.com) (2019)

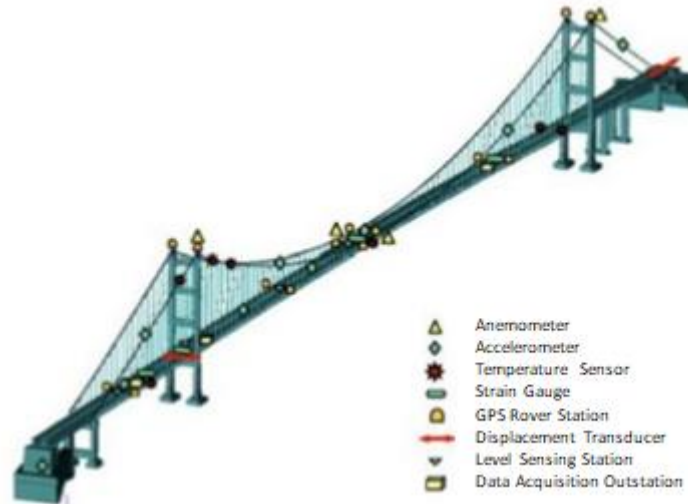
### **2.3 Monitoramento de estruturas**

O cumprimento de normas técnicas, a utilização de cálculo estrutural, e a realização de ensaios com modelos em menor escala são importantes para prever o comportamento de estruturas, mas não garantem que a estrutura projetada não irá falhar em serviço. Portanto, é necessária a adoção de estratégias visando o acompanhamento da integridade da estrutura durante o seu funcionamento. É neste contexto que se insere a ideia de monitoramento estrutural, o qual objetiva supervisionar alterações nas propriedades geométricas da estrutura monitorada, fornecendo informações valiosas sobre a condição da mesma. Estas informações podem ser utilizadas para a geração de relatórios, diagnósticos e alarmes que auxiliam nas ações de manutenção, assegurando a confiabilidade operacional da estrutura monitorada.

Em países como Estados Unidos e China, o monitoramento de estruturas é frequentemente utilizado. A ponte Tsing Ma, Figura 9, em Hong Kong, é um exemplo de estrutura que dispõe de um sistema de monitoramento moderno, o qual conta com uma rede de 350 sensores, entre estes, acelerômetros, anemômetros e

sensores de temperatura, dispostos ao longo da sua extensão e que se comunicam com centrais computadorizadas de aquisição e processamento de dados.

**Figura 9 – Ponte Tsing Ma.**



Fonte: researchgate.net (2019).

No Brasil, os métodos utilizados tanto para o monitoramento quanto para inspeção de estruturas são deficientes ou inexistentes. As pontes Pedro Ivo e Colombo Salles, em Florianópolis, são exemplos de estruturas desgastadas que não são monitoradas e que recebem apenas inspeções visuais esporádicas. Uma inspeção visual realizada em 2013 apontou a presença de fissuras e corrosão ao longo das duas pontes, conforme apresenta a Figura 10, porém não foi realizado nenhum monitoramento dinâmico que permitisse a análise do real comportamento da estrutura.

**Figura 10 – Ponte Pedro Ivo.**



Fonte: ndmais.com.br (2019).

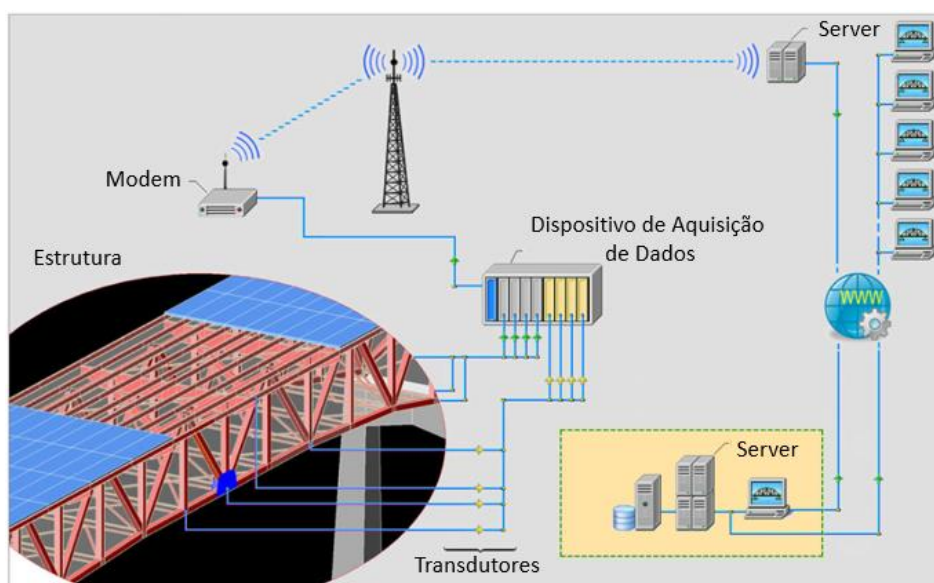


### 3 SISTEMAS DE MONITORAMENTO ESTRUTURAL

Segundo Albertazzi e Sousa (2008), monitorar consiste em observar ou registrar passivamente o valor de uma grandeza. Portanto, pode-se dizer que os sistemas de monitoramento estrutural têm como objetivo registrar passivamente valores de grandezas físicas relacionadas à condição da estrutura monitorada, como deslocamentos e vibrações.

Os sistemas de monitoramento atuais são constituídos basicamente por subsistemas integrados, os quais realizam os processos de medição, aquisição, transmissão e avaliação dos dados obtidos. A Figura 11 exemplifica a utilização de um sistema de monitoramento aplicado em uma ponte, e como ocorre a integração entre os subsistemas. Inicialmente, transdutores instalados ao longo da estrutura realizam medições de variáveis que possam indicar a deterioração da estabilidade desta. As medições realizadas são enviadas para um subsistema de aquisição de dados, o qual tem a função de condicionar e converter os sinais recebidos. Em seguida, um subsistema de transmissão de dados é responsável por enviar os sinais convertidos para um banco de dados em um computador e/ou servidor. Por último, um subsistema de tratamento e avaliação de dados é responsável por, a partir dos dados recebidos, extrair informações úteis, fornecendo resultados compreensíveis e facilitando a tomada de decisões.

**Figura 11 – Sistema de monitoramento aplicado em estrutura.**



Fonte: Adaptado de fynitesolutions.com (2019).

### 3.1 Transdutores

Segundo Albertazzi e Sousa (2008), transdutor é um módulo do sistema de medição que gera um sinal de medição geralmente proporcional ao valor do mensurando. Deste modo, transdutores constituem parte fundamental de um sistema de monitoramento, convertendo sinais de entrada em sinais de saída, como, por exemplo, deslocamentos em energia elétrica. Há uma extensa lista de transdutores disponíveis no mercado para diferentes finalidades, visto que na área de engenharia estrutural, são diversas as variáveis de interesse para o monitoramento, tais como deslocamentos, vibrações e temperatura.

A medição de deslocamentos, por exemplo, é uma tarefa de elevada importância no monitoramento de estruturas. Um dos transdutores mais utilizados para este fim é o LVDT, do inglês *Linear Variable Differential Transformer*, um transdutor indutivo para medição de deslocamento linear. Em síntese, o LVDT, consiste em um núcleo central móvel em um dispositivo cilíndrico que hospeda um sistema de bobinas, possibilitando a transformação do deslocamento mecânico do núcleo em um sinal de tensão elétrica. O LVDT, apresentado na Figura 12, normalmente visa monitorar a evolução de trincas e deslocamentos causados por movimentos de diferentes partes de uma mesma estrutura. Nesta perspectiva, os LVDT são tipicamente explorados em sistemas de monitoramento estáticos, realizando medições com frequências de amostragem relativamente baixas. Segundo Noll e Soares (1999), a vantagem dos transdutores de deslocamento baseados em LVDT é que estes podem fornecer sinais de saída elevados mesmo para pequenos deslocamentos do elemento móvel, além de garantirem linearidade para grandes deslocamentos.

Figura 12 – LVDT.



Fonte: [www.mitutoyo.co.jp](http://www.mitutoyo.co.jp) (2019).

Outra grandeza de elevada importância para se monitorar é a frequência de vibração de um elemento. Estruturas submetidas a carregamentos dinâmicos estão suscetíveis a falhar por causas decorrentes de fenômenos de vibração. Este fato exemplifica a importância de se utilizar transdutores para o monitoramento de vibrações, tal como o acelerômetro, um dispositivo usado para medir a aceleração própria de um sistema, amplamente utilizado para o monitoramento da estabilidade de estruturas. De acordo com Assis (2007), a ponte estaiada Octávio Frias de Oliveira, localizada na cidade de São Paulo, é um dos exemplos de estruturas monitoradas com o uso de acelerômetros, conforme a Figura 13.

**Figura 13 – Acelerômetro na ponte Octávio Frias de Oliveira.**



Fonte: Assis (2007)

Conceitualmente, um acelerômetro se comporta como uma massa amortecida em uma mola, onde o conjunto massa e mola é deslocado de maneira proporcional às acelerações em que o conjunto está submetido. Deste modo, um acelerômetro é capaz de mensurar acelerações próprias de um sistema em até 3 eixos espaciais (x, y e z). Atualmente, existem diferentes tipos de concepções de acelerômetro, que utilizam diferentes efeitos para medir a aceleração própria de um objeto, tais como os acelerômetros piezoelétricos, capacitivos, de efeito Hall, e mais atualmente, os acelerômetros MEMS.

As notáveis evoluções tecnológicas observadas nas últimas décadas, principalmente nas áreas de manufatura de precisão e microeletrônica, possibilitaram o desenvolvimento de transdutores cada vez mais eficientes. Um dos exemplos é o surgimento dos sistemas micro eletromecânicos (MEMS). Os sistemas MEMS são caracterizados pela integração de elementos mecânicos e circuitos eletrônicos em um chip micrométrico de silício. Os acelerômetros MEMS são dispositivos de grande sensibilidade, podendo ser utilizados em aplicações de monitoramento estrutural, choques, explosão, entre outros.

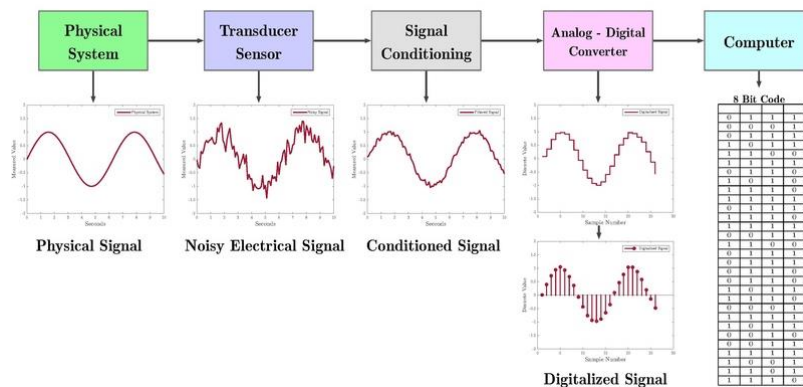


### 3.2 Aquisição de dados

Usualmente, os transdutores utilizados em sistemas de monitoramento fornecem sinais analógicos para as medições realizadas, e, frequentemente, os sinais obtidos devem ser condicionados e convertidos para uso. Deste modo, utiliza-se dispositivos de aquisição de dados (DAQ), os quais funcionam como uma interface entre os sinais fornecidos pelos transdutores e equipamentos que armazenam estes dados, atuando no condicionamento e na conversão dos sinais.

Segundo Emilio (2013), os dispositivos de aquisição de dados são constituídos basicamente de hardware e software, atuando em conjunto para realizar o condicionamento e conversão de sinais. O hardware é composto de circuitos eletrônicos responsáveis pelo condicionamento dos sinais obtidos, utilizando para isso circuitos dedicados à amplificação, atenuação, filtragem e isolamento dos sinais, dependendo da necessidade. À título de exemplo, um dos problemas que ocorrem durante o processo de medição é a presença de ruídos nos sinais obtidos, o que diminui a precisão dos resultados. Portanto, é de suma importância que ocorra o tratamento dos sinais obtidos para o funcionamento do sistema de monitoramento. Em seguida, os sinais analógicos condicionados devem ser convertidos em sinais digitais, de modo que estes possam ser manipulados por equipamentos digitais, como computadores. Para tal fim, utiliza-se um conversor analógico-digital, o qual é capaz de quantizar um sinal analógico dentro de um número finito de valores inteiros, transformando um sinal contínuo no tempo em um sinal discreto. O processo de condicionamento e conversão está apresentado no diagrama da Figura 14.

Figura 14 – Condicionamento e conversão de dados.



Fonte: Wikipédia (2019)

Atualmente, há uma grande variedade de soluções para a aquisição de dados no mercado, como data loggers, dispositivos de aquisição de dados e sistemas de aquisição de dados.

O *Data Logger*, ou registrador de dados, é um sistema autônomo de aquisição de dados com processador e software embutidos. Estes sistemas podem dispor de instrumentos e sensores embutidos, ou podem receber dados de instrumentos e sensores externos. Os *Data Loggers* podem ser utilizados como dispositivos autônomos, sendo portáteis e fáceis de usar.

O dispositivo de aquisição de dados dispõe de hardware direcionado para o condicionamento de sinal e um conversor analógico digital, mas precisa estar conectado a um computador para ser utilizado. Esses dispositivos são muito flexíveis e podem ser usados em muitas aplicações diferentes, o que os torna uma escolha popular.

Os sistemas modulares de aquisição de dados são projetados para sistemas mais complexos, onde é necessária a utilização de múltiplos canais de aquisição, para integrar e sincronizar variados tipos de transdutores. Esses sistemas são mais complexos de integrar e usar, sendo a opção de aquisição de dados mais cara, mas muitos aplicativos exigem os recursos que somente um sistema de aquisição de dados pode fornecer.

A Figura 15 apresenta alguns modelos disponíveis de equipamentos utilizados para aquisição de dados. Da esquerda para a direita, um *data logger* portátil, um dispositivo de aquisição de dados voltado ao uso estudantil e um sistema modular de aquisição de dados.

**Figura 15 – Soluções para a aquisição de dados disponíveis no mercado.**



a) Data Logger GL240.



b) MyDAQ.



c) PXI.

Fonte: Wikipedia (2019)

### 3.3 Transmissão de Dados

Após o processo de aquisição, condicionamento e conversão dos sinais, estes devem ser enviados para um computador e/ou servidor para serem disponibilizados à um usuário final. Este processo de transferência de dados deve ser feito de modo a garantir a integridade da informação transmitida.

A maioria dos sistemas de monitoramento atuais utilizam de meios físicos para transmissão de dados, como cabos, utilizando de protocolos de comunicação como o RS-232. Apesar de funcional, é uma solução que, dependendo da extensão da estrutura monitorada, pode ser dispendiosa e de difícil implementação. Com os avanços das tecnologias de comunicação sem fio, e no contexto atual da Internet das Coisas, a tendência é que se utilize cada vez mais tecnologias para transmissão de dados à distância. Atualmente, existe uma variedade de tecnologias de comunicação sem fio, que variam de curta distância, tal como o WLAN, e de longa distância, como o GSM/GPRS.

O GSM, *Global System for Mobile Communications* ou Sistema Global para Comunicações Móveis, é o padrão mais popular para a comunicação celular no mundo. Criado em 1991, é utilizado em mais de 190 países atualmente, possibilitando a comunicação entre os mais remotos locais do planeta. O GPRS, *General Packet Radio Services* ou Serviços Gerais de Pacotes por Rádio, desenvolvido em 2000, é um padrão de dados móveis orientado a pacotes no sistema global de comunicações móveis, tecnologia que permitiu aumentar as taxas de transferência de dados nas redes GSM existentes. Atualmente, as tecnologias GSM/GPRS são muito utilizadas em projetos de IOT, principalmente onde existe a necessidade de se monitorar variáveis à grandes distâncias, como, por exemplo, no setor agropecuário.

O WLAN, *wireless local area network* ou rede de área local sem fio, é uma tecnologia que possibilita a comunicação entre dispositivos através de um ponto de acesso compartilhado ou diretamente entre dispositivos individuais. Esta tecnologia insere-se na esfera de redes de computadores, tal como o LAN, rede local, o WAN, rede de longa distância, o PAN, rede pessoal e o MAN, rede de área metropolitana. A maioria das WLANs modernas são baseadas nos padrões IEEE 802.11, conhecido popularmente como WIFI, sendo uma das tecnologias utilizadas para comunicação sem fio mais populares atualmente.

A figura 16 apresenta uma solução compacta para o monitoramento remoto de um viaduto em Long Island, Estados Unidos. Neste caso, dados referentes a vibrações estruturais são coletados utilizando acelerômetros, e, utilizando de tecnologias de comunicação sem fio, os dados são armazenados em um banco remoto.

**Figura 16 – Monitoramento remoto de viaduto em Long Island.**



Fonte: National Instruments (2019).

### **3.4 Tratamento e visualização de dados**

Os dados transmitidos do módulo de aquisição são armazenados continuamente em um banco de dados em um servidor e/ou computador. Neste momento, é fundamental utilizar um subsistema para o tratamento e visualização destes dados, de modo a extrair informações úteis, fornecendo resultados compreensíveis e facilitando o gerenciamento da estrutura. Para tal fim, pode-se implementar via software soluções para transformar os milhares de dados obtidos em resultados legíveis, por exemplo, apresentando os resultados através de gráficos, tabelas entre outros, facilitando a compreensão das medições realizadas. Neste subsistema também pode-se empregar modelos estatísticos e técnicas computacionais para aperfeiçoar o sistema de monitoramento, utilizando, por exemplo, modelos probabilísticos para prever a condição da estrutura em momentos futuros.

## **4 DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA O MONITORAMENTO DE DESLOCAMENTOS E VIBRAÇÕES UTILIZANDO TECNOLOGIAS IOT**

Visto a crescente relevância do tema de monitoramento estrutural, desenvolveu-se no laboratório de Metrologia do IFSC Campus Florianópolis um sistema de monitoramento remoto de estruturas. Ao longo do desenvolvimento, procurou-se concebê-lo de modo similar aos sistemas empregados em estruturas reais, considerando o conjunto de aspectos tratados na seção 3. No entanto, é importante salientar que a instrumentação utilizada em sistemas reais possui custo elevado, dificultando a utilização destes para fins acadêmicos. Deste modo, procurou-se reduzir o custo do sistema, utilizando instrumentos similares, porém de baixo custo.

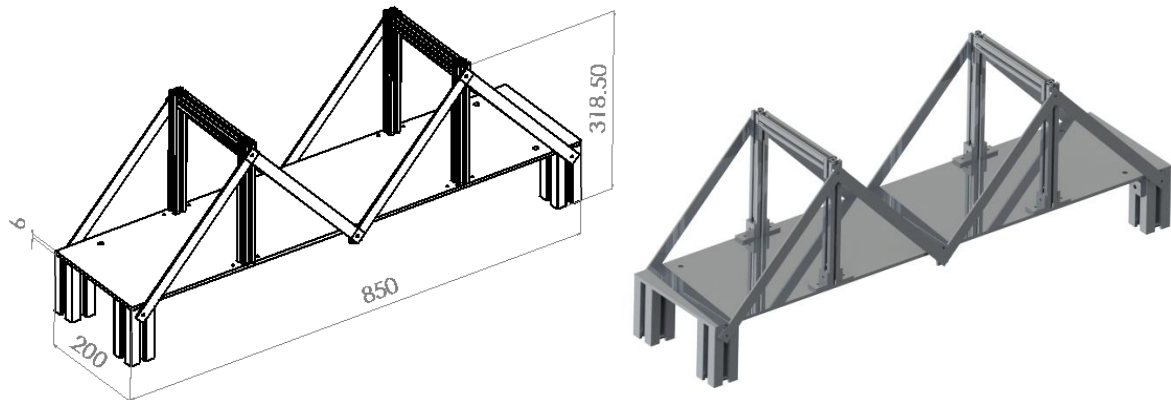
O sistema é composto por um modelo de ponte em alumínio, uma rede de transdutores responsável pelo monitoramento de deslocamentos e vibrações, uma plataforma IOT responsável pela aquisição e transmissão de dados, e uma página web responsável pela apresentação dos resultados obtidos.

### **4.1 Estrutura monitorada**

Requisitos foram determinados antes da concepção do modelo de ponte, como, por exemplo, este deveria ser flexível, deformando-se elasticamente com pouca carga, se assemelhar à uma estrutura real em menor escala, e suportar uma carga considerável sem falhar. Deste modo, optou-se por construí-lo utilizando peças de alumínio, por ser um material leve e resistente para esta aplicação. Sucessivas concepções foram realizadas até a obtenção de um modelo utilizando pórticos fixados sobre uma chapa plana, conforme a Figura 17.

Segundo Silva e Souto (1997), pórticos resultam da criação de uma união rígida em um sistema viga-pilar. O sistema viga-pilar é composto basicamente por dois elementos verticais, denominados de pilar, que suportam um elemento horizontal, denominado viga. Utilizando de uma união rígida entre os elementos, obtém-se um pórtico, o qual é mais resistente tanto às cargas verticais como horizontais.

**Figura 17 – Concepção do modelo de ponte.**



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Disponibilizando de um laboratório para usinagem, o laboratório de máquinas operatrizes do IFSC Campus Florianópolis, desenhos técnicos das peças foram realizados possibilitando a fabricação destas utilizando de operações de usinagem convencionais. Ao final, obteve-se um modelo com dimensões de 850 mm x 200 mm x 318,50 mm, e com sua chapa principal com 6 mm de espessura. Todas as peças são de alumínio, com exceção das cantoneiras que são de aço, e as chapas laterais de latão. O modelo finalizado pode ser visto na Figura 18.

**Figura 18 – Modelo de ponte construído.**



Fonte: Elaboração Própria (2019).

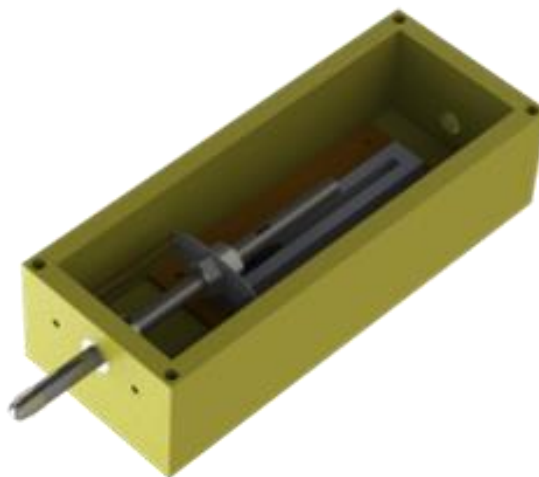
## 4.2 Conjunto de transdutores

O sistema de ensaio utiliza quatro transdutores, os quais realizam o monitoramento de deslocamentos e vibrações da estrutura. Foram empregados em sequência: um transdutor baseado em um potenciômetro linear deslizante, um transdutor do tipo medidor de profundidade de sulcos de pneu, um acelerômetro MEMS e um telêmetro laser.

### 4.2.1 Transdutor de deslocamentos baseado em potenciômetro linear deslizante

O primeiro transdutor empregado foi fabricado especificamente para o projeto. Tendo o requisito de ter baixo custo e possuir uma precisão condizente com a aplicação, elaborou-se um transdutor para medição de deslocamentos a partir de um relógio comparador em desuso e um potenciômetro linear deslizante. A estrutura foi embarcada em um case polimérico sendo apresentada na Figura 19.

**Figura 19 – Transdutor de deslocamentos baseado em potenciômetro linear deslizante.**



Fonte: Elaboração Própria (2019).

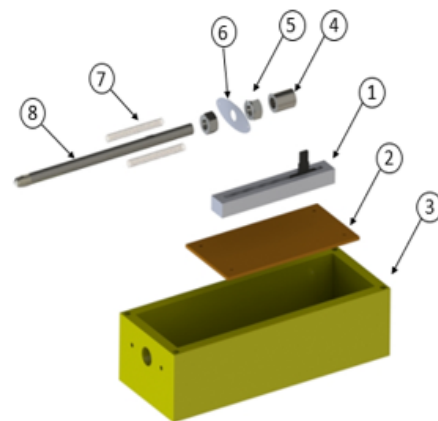
O princípio de funcionamento deste transdutor é igual ao de um potenciômetro linear deslizante. Potenciômetro é um componente eletrônico que possui resistência elétrica ajustável, logo, o potenciômetro do tipo de deslizante possui uma resistência que pode ser ajustada variando a posição de um contato deslizante através de uma resistência uniforme.



Este transdutor é composto por um fuso de um relógio comparador, de aproximadamente 80 mm de comprimento, o qual possui uma ponta de contato em uma das extremidades e um contato deslizante de um potenciômetro linear na outra extremidade. O potenciômetro deslizante foi parafusado junto ao case, possui resistência de 100 K $\Omega$  e capacidade de medição de 55 mm. A partir do canhão do relógio comparador fabricou-se um mancal, o qual foi colocado entre o fuso e o case, facilitando o deslizamento do fuso. O percurso útil do transdutor é de aproximadamente 35 mm, possuindo o mancal e a própria contração da mola como delimitadores do curso. Deste modo, evita-se utilizar as extremidades do percurso, de forma a garantir a linearidade do sinal. Quando a ponta de contato não apalpa nenhum objeto, o fuso é deslocado para fora, até que a contração da mola seja suficiente para parar o movimento. Quando a ponta de contato apalpa um objeto, o fuso pode ser deslocado para dentro do case até a ponta de contato atingir o mancal e parar o movimento. Para evitar histerese mecânica, utilizou-se molas como elemento de tração. A Figura 20 apresenta uma vista explodida do transdutor.

**Figura 20 – Vista explodida do transdutor de deslocamentos baseado em potenciômetro linear deslizante.**

No.	Componente
1	Potenciômetro
2	Placa
3	Case
4	Mancal
5	Porca
6	Acoplamento
7	Mola
8	Fuso



Fonte: Elaboração Própria (2019).

O deslocamento da haste do transdutor resulta em uma variação da resistência, gerando um sinal analógico proporcional que pode ser enviado para um microcontrolador. O microcontrolador, por sua vez, tem a incumbência de converter o sinal analógico obtido em um valor que represente o deslocamento da haste e armazená-lo em um banco de dados.



#### 4.2.2 Transdutor de deslocamentos do tipo medidor de profundidade de sulcos de pneu

O segundo transdutor empregado é um paquímetro digital desenvolvido para a medição de profundidade de sulcos de pneu, conforme a Figura 21. Este transdutor trabalha em uma faixa de 0 a 25,4 mm com uma resolução de 0,01 mm, possuindo uma haste móvel, que indica em uma tela de LCD o deslocamento realizado.

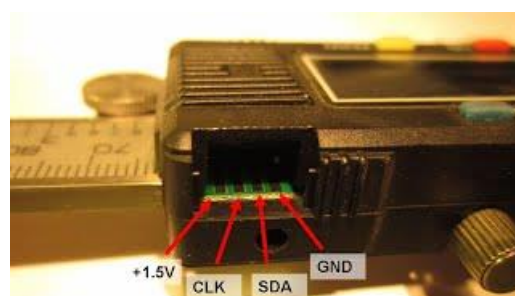
**Figura 21 – Transdutor de deslocamento do tipo medidor de profundidade de sulcos de pneu.**



Fonte: [www.amazon.com](http://www.amazon.com) (2019).

Este transdutor pode ser utilizado de forma independente, não necessitando de um instrumento extra para realizar leitura e interpretação de sinais. No entanto, ele possui na extremidade superior direita dois pinos, Data e Clock, conforme apresenta a Figura 22, que devem ser utilizados caso deseje-se conectá-lo com um dispositivo externo, como, por exemplo, um microcontrolador. Neste caso, é importante salientar que os pinos de Data e Clock possuem nível lógico de 1,5 V, logo é necessário alterar o nível lógico para um valor compatível com o microcontrolador utilizado.

**Figura 22 – Transdutor de deslocamento do tipo medidor de profundidade de sulcos de pneu.**

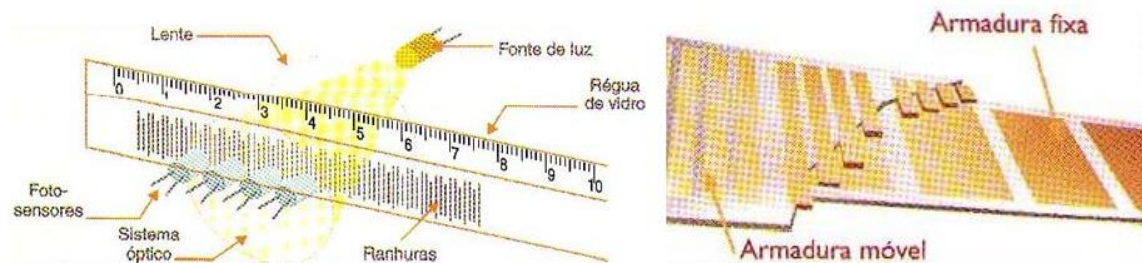


Fonte: [www.sites.google.com](http://www.sites.google.com) (2019).

Uma vez realizada a conexão, os dados são enviados do transdutor para o microcontrolador em fluxo contínuo por comunicação serial. O pino Data envia pacotes de 24 bits, sendo cada pacote separado por uma transição de nível lógico do pino Clock. Estes 24 bits são recebidos pelo microcontrolador, o qual interpreta o nível lógico de cada bit possibilitando a conversão para um valor de deslocamento em milímetros.

Segundo Braga (2019), existem basicamente dois sistemas utilizados nos paquímetros digitais eletrônicos, o sistema optoeletrônico e o sistema capacitor diferencial, ambos ilustrados na Figura 23.

**Figura 23 – Construção do paquímetro digital.**



a) Sistema Optoeletrônico

b) Sistema de Capacitor Diferencial

Fonte: [www.newtoncbraga.com.br](http://www.newtoncbraga.com.br) (2019).

No sistema optoeletrônico, uma régua de vidro transparente com ranhuras está disposta entre uma fonte de luz e foto-sensores, apresentando o mesmo princípio de funcionamento de encoders lineares incrementais. A luz emitida pela fonte atinge os foto-sensores, sendo bloqueada e desbloqueada a medida que a régua se desloca. Deste modo, os foto-sensores emitem sinais de nível lógico alto ou baixo, dependendo da presença ou não de luz. São estes sinais que possibilitam determinar a posição em que a régua se encontra em relação à uma posição inicial.

O sistema capacitor diferencial utiliza um conjunto de armaduras fixas e móveis de material metálico, separados por uma distância constante, constituindo um capacitor. O deslocamento das armaduras móveis sobre as armaduras fixas provoca uma variação linear da capacitância do sistema. Utilizando de circuitos eletrônicos auxiliares, a variação da capacitância é medida e indicada no LCD.

### 4.2.3 Acelerômetro baseado em MEMS

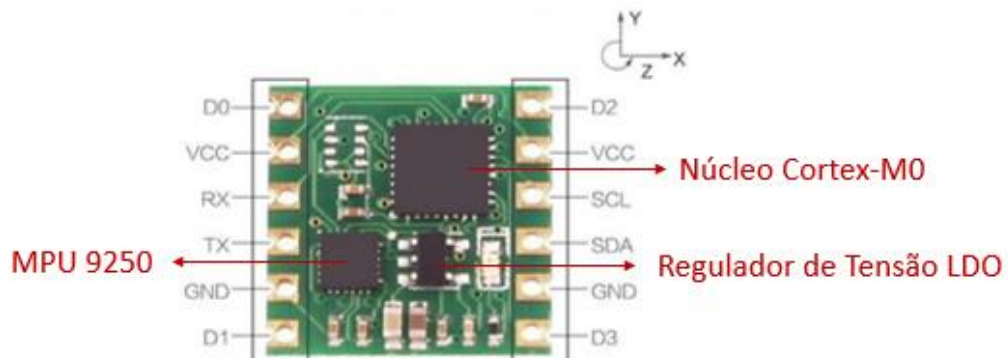
O acelerômetro é um dispositivo usado para medir a aceleração própria de um sistema, amplamente utilizado para o monitoramento da estabilidade de estruturas. Neste sistema, optou-se por utilizar o módulo BWT901CL da WitMotion, Figura 24:



Fonte: [www.wit-motion.com](http://www.wit-motion.com) (2019).

O BWT901CL é fundamentado em um MEMS (Micro Electrical Mechanical System). Conforme abordado na seção 3.1, os sistemas MEMS são caracterizados pela integração de elementos mecânicos e circuitos eletrônicos em um chip micrométrico de silício. O BWT901CL é composto basicamente de um chip chamado JY-901, Figura 25, que dispõe de um processador de 48 MHz com núcleo Cortex-M0, desenvolvido pela ARM Holdings, um regulador linear de tensão Low-Dropout, que garante o suprimento de energia de maneira precisa e estável, e um sensor MEMS MPU9250.

**Figura 25 – Módulo JY-901.**

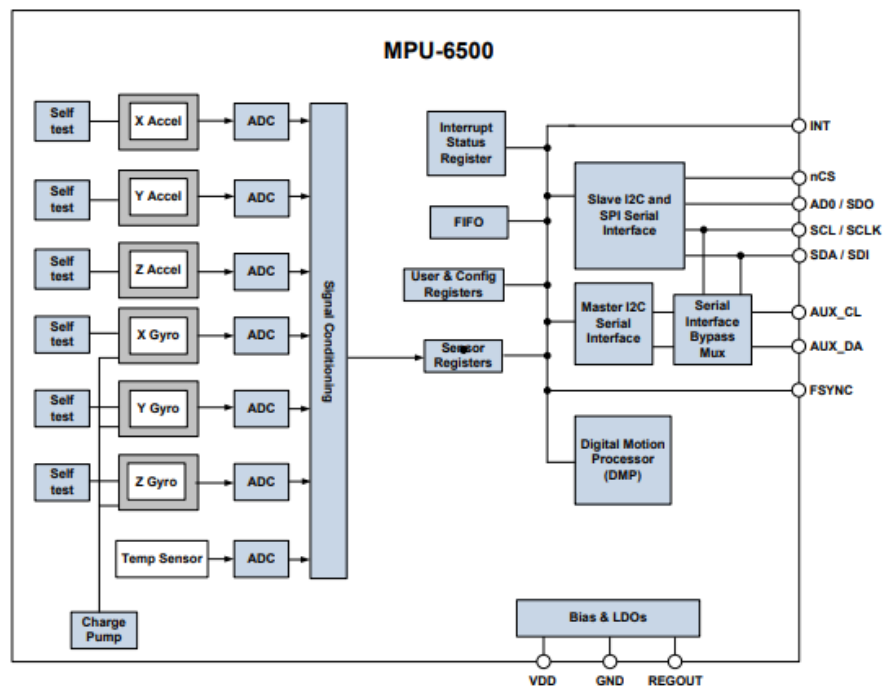


Fonte: Adaptado de [www.wit-motion.com](http://www.wit-motion.com) (2019).

O MPU-9250, desenvolvido pela InvenSense, combina dois módulos em um só, o MPU-6500 e o AK8963. O primeiro consiste em um giroscópio e acelerômetro de 3 eixos, enquanto o segundo consiste em um magnetômetro de 3 eixos.

A Figura 26 apresenta um diagrama de blocos do funcionamento do MPU-6500. O acelerômetro de 3 eixos do MPU-6500 é do tipo capacitivo, utilizando uma placa unida à estrutura do acelerômetro, e outra ligada à uma massa de prova. A aceleração da massa ao longo de um eixo específico resulta em deslocamento, variando a capacitância do sistema. Conversores analógico-digital convertem os valores obtidos fornecendo saídas digitais. Em seguida, o MPU-6500 se comunica com um processador do sistema usando uma interface serial SPI ou I2C.

Figura 26 – Diagrama de blocos do MPU-6500.



Fonte: [www.invensense.com](http://www.invensense.com) (2019).

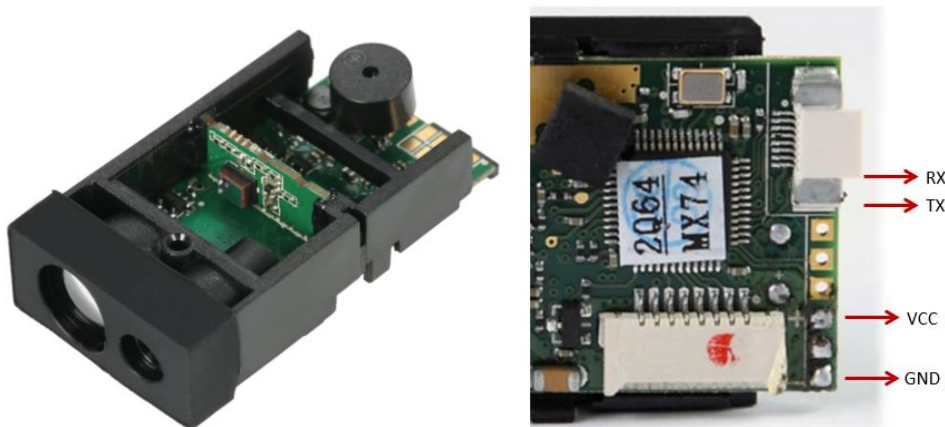
O módulo BWT901CL, na sua totalidade, integra giroscópios de alta precisão, acelerômetro, sensor geomagnético e microprocessadores de alto desempenho, possibilitando uma alta aquisição de dados em tempo real. O módulo utiliza modelos estatísticos, tais como o filtro de Kalman, possibilitando, a partir da grande quantidade de medições realizadas, determinar com alto grau de aproximação a posição do acelerômetro no espaço em tempo real.

As saídas digitais fornecidas pelo módulo podem ser enviadas por comunicação serial para um microcontrolador externo, utilizando os pinos RX e TX.

#### 4.2.4 Sensor de Deslocamentos do tipo telêmetro laser

Telêmetro é um dispositivo de precisão destinado à medição de distâncias em tempo real. Os telêmetros de última geração são digitais, baseados em disparo de feixe laser, como, por exemplo, trenas laser, bem difundidas no mercado. Uma trena laser é composta basicamente de um display LCD e um módulo de medição à laser. Ao invés de utilizar uma trena laser, utilizou-se apenas o seu módulo de medição conforme Figura 27, modelo 703A da desenvolvedora JRT Meter Technologies. Este módulo de medição possui alcance de 0.03 m até 40 m, e uma resolução de 1 mm.

**Figura 27 – Telêmetro Laser.**



a) Telêmetro Laser.

b) Conexões do Telêmetro 703A.

Fonte: Adaptado de [www.jrt-measure.com](http://www.jrt-measure.com) (2019).

A forma mais comum de telêmetro laser opera utilizando o princípio do tempo de voo, enviando um pulso de laser em um feixe estreito em direção ao objeto e medindo o tempo gasto pelo pulso para ser refletido no alvo e retornar ao remetente. Um circuito eletrônico mede o intervalo desde o momento em que o sinal sai do transmissor a laser até ser recebido de volta no detector, e, conhecendo a velocidade do laser, é possível calcular a distância que o feixe percorreu até atingir o objeto.

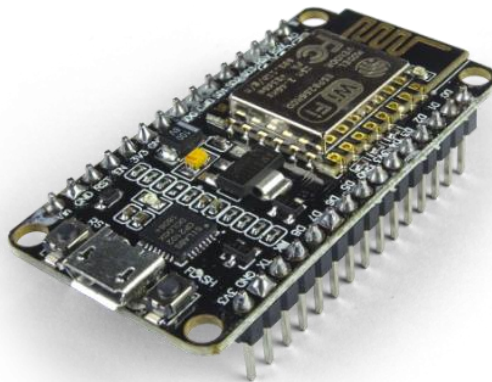
Conforme Figura 27, o módulo dispõe de pinos RX e TX para o envio das medições realizadas para um dispositivo externo, como um microcontrolador, por meio de comunicação serial.

### 4.3 Plataforma de IOT

Visando realizar o monitoramento de modo remoto, procurou-se utilizar tecnologias que realizem a transmissão à distância dos dados obtidos. Neste contexto, insere-se o conceito IOT, ou internet das coisas, tecnologia que permite a composição de uma rede de objetos capaz de coletar e transmitir dados entre si, sem a necessidade de uma conexão física entre estes componentes.

Deste modo, escolheu-se empregar como plataforma de IOT o dispositivo de código aberto NodeMCU DevKit 1.0, Figura 28.

Figura 28 – NodeMCU DevKit 1.0.

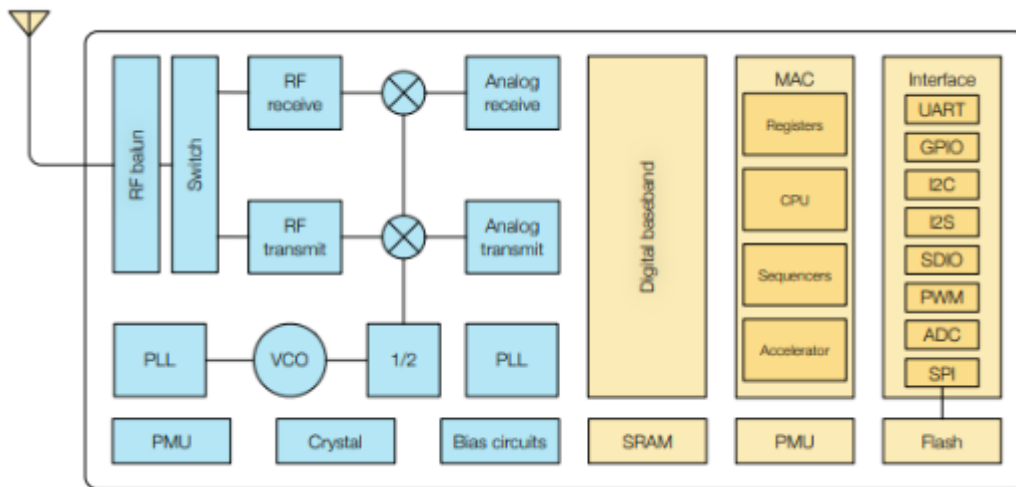


Fonte: [www.robocore.net](http://www.robocore.net) (2019).

O NodeMCU, do inglês *Node MicroController Unit*, é uma plataforma de IOT de código aberto desenvolvida em torno de um SoC, *System on a Chip*, chamado ESP8266. O ESP8266, projetado e fabricado pela Espressif Systems, é um microchip que possui funcionalidades de microcontrolador e dispõe de protocolo TCP/IP integrado, o que lhe confere acesso a redes WI-FI. O ESP8266 é constituído principalmente de um processador Tensilica L106 32-bit com velocidade de 80 a 160 MHz e memória SRAM de 64 Kb. O microchip também possui comutadores de antena, amplificadores de potência, filtros e módulos para gerenciamento de energia, e talvez o mais importante, dispõe de GPIOs para interfaceamento com dispositivos externos. Deste modo, é possível conectar na plataforma os transdutores previamente apresentados, adquirir os dados referentes as medições realizadas e enviar os resultados obtidos para um banco de dados na web. O diagrama de funcionamento do ESP-8266 pode ser visualizado na Figura 28.



Figura 28 – Diagrama de blocos funcional do ESP8266-12.

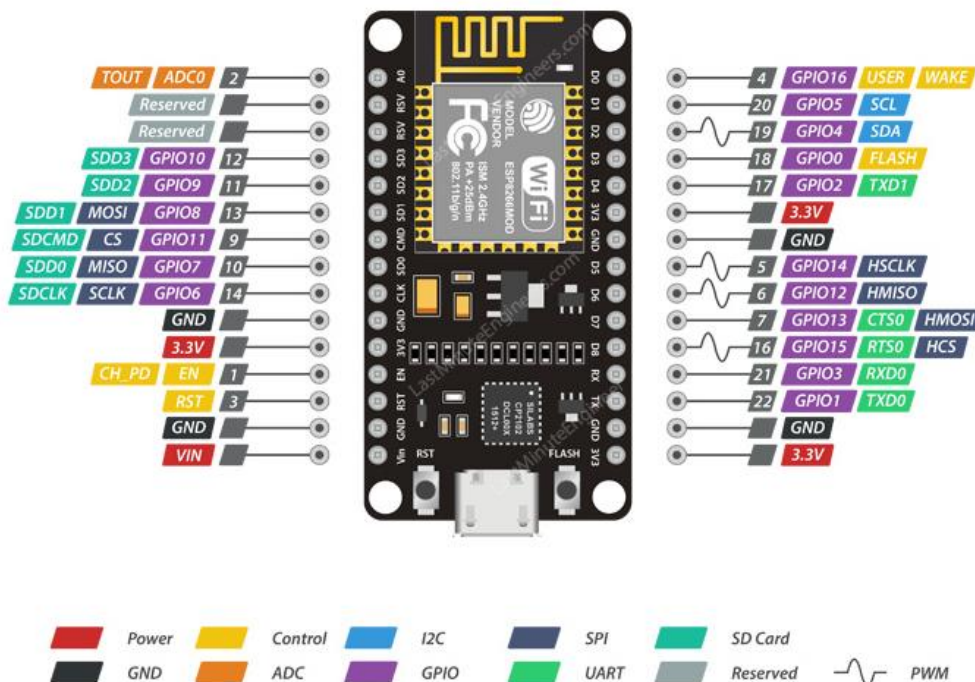


Fonte: Expressif.com (2019).

Além do ESP8266, a placa também possui uma porta micro USB, um botão de redefinição de hardware, antena wifi, LED's, reguladores de tensão entre outros componentes.

Antes de realizar a conexão física entre dispositivos externos e NodeMCU, é necessário compreender o funcionamento dos pinos da plataforma. A Figura 29 apresenta os pinos do NodeMCU e suas respectivas funções.

Figura 29 – Pinagem NodeMCU.



Fonte: www.instructables.com (2019).

O NodeMCU dispõe de um total de 30 pinos com variadas funções, como pode ser constatado abaixo. A plataforma possui:

- a) Quatro pinos de tensão, sendo três pinos de 3.3 Volts que podem ser utilizados para alimentar componentes externos;
- b) Quatro pinos de terra (GND);
- c) Dois pinos para comunicação I2C habilitados via firmware;
- d) Dezesete pinos GPIO que podem desempenhar várias funções, como I2C, I2S, UART, PWM entre outros;
- e) Um pino para leitura analógica;
- f) Dois pinos de interfaces UART, *Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*, para comunicação assíncrona (RS232 e RS485);
- g) Dois pinos SPIs nos modos escravo e mestre;
- h) Pinos SDIO para interface direta com cartões SD;
- i) Quatro canais para modulação por largura de pulso (PWM), a qual pode ser implementada via firmware;
- j) Pinos de controle, incluindo o pino de habilitação de chip (EN), o pino de redefinição (RST) e o pino WAKE.

O NodeMCU pode ser programado na linguagem padrão do popular microcontrolador Arduino, utilizando inclusive o mesmo ambiente de desenvolvimento. Os transdutores previamente apresentados foram conectados ao NodeMCU, e então, desenvolveu-se um firmware possibilitando a plataforma de receber informações de todos os transdutores simultaneamente, interpretar estas informações e enviar para um banco de dados na Web.

Neste sistema, o NodeMCU utiliza a sua porta analógica para a leitura do transdutor de deslocamentos baseado em potenciômetro linear, duas GPIO para leitura digital do transdutor de deslocamentos baseado em paquímetro digital, duas GPIO para a leitura do acelerômetro e duas GPIOs para a leitura do telêmetro à laser. A biblioteca Software Serial foi empregada para a leitura dos dois últimos dispositivos, habilitando as respectivas GPIO utilizadas para realizar comunicação serial.



## 4.4 Visualização dos dados

Os dados enviados dos transdutores para o NodeMCU devem ser armazenados em nuvem, e apresentados de forma legível em uma página Web. Portanto, é necessária a utilização de ferramentas de programação Web, como PHP, HTML, CSS e Java Script. Foi utilizado o servidor independente de plataforma e software livre XAMPP, que torna fácil para os desenvolvedores a tarefa de criar um servidor web local para fins de teste. O XAMPP consiste principalmente na base de dados MariaDB, servidor web Apache, e os interpretadores para linguagens de script: PHP e Perl.

Uma vez com a plataforma instalada no computador, utilizou-se as ferramentas HTML e CSS para criar o layout da página, apresentada na Figura 30. O HTML - *HyperText Markup Language* - é uma linguagem de marcação utilizada na construção de páginas Web, agindo principalmente na parte de formatação e layout da página. O CSS - *Cascading Style Sheets* - é usado para alterar esse layout para adicionar informações estilísticas ou relacionadas à aparência na página. A página fica acessível para todos os usuários que estejam conectados na mesma rede em que a página está sendo desenvolvida.

Figura 30 – Página Web.

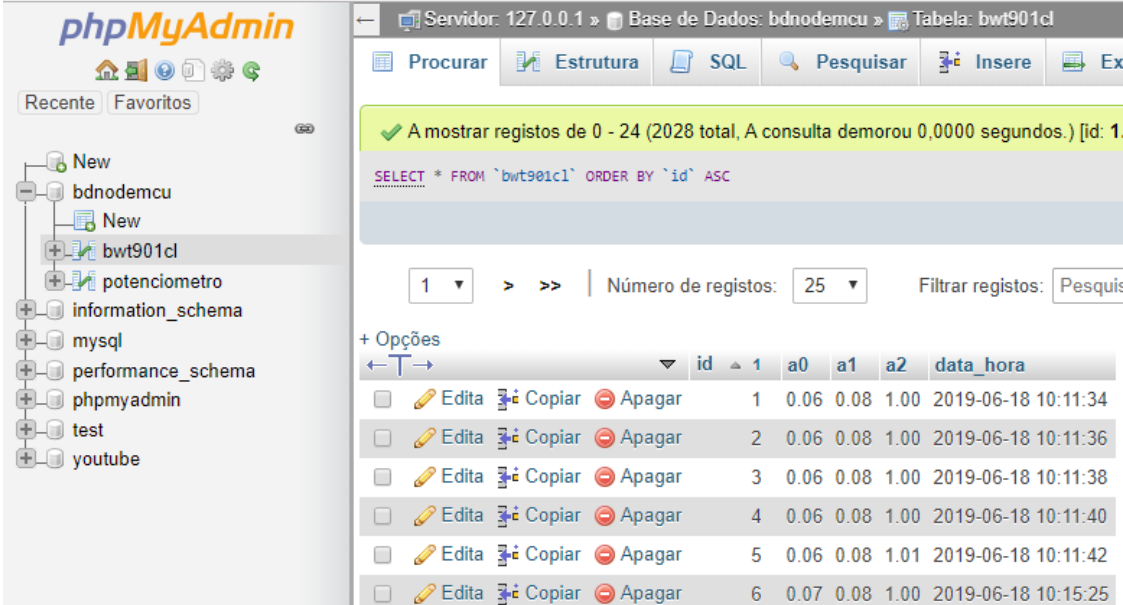


Fonte: Elaboração Própria (2019).

Após a criação da página, foi utilizada a linguagem PHP para programar a rotina que auxilia o NodeMCU a salvar os dados obtidos em um banco de dados disponibilizado pelo XAMPP. O PHP - *Hypertext PreProcessor* - é uma linguagem interpretada livre, usada para o desenvolvimento de aplicações *back-end*, gerando conteúdo dinâmico na Web.

O sistema de gerenciamento de banco de dados utilizado é o MariaDB, que surgiu como uma ramificação do MySQL. No MariaDB é possível armazenar os dados adquiridos juntamente com o horário da aquisição. A Figura 31 apresenta os dados obtidos de aceleração gravitacional no espaço utilizando o BWT901CL, juntamente com o horário de aquisição.

**Figura 31 – Banco de dados MariaDB.**



The screenshot shows the phpMyAdmin interface for a MariaDB database. The left sidebar displays a tree view of databases, including 'bdnodemcu' and 'bwt901cl'. The main area shows the table 'bwt901cl' with a query result. The query is 'SELECT \* FROM `bwt901cl` ORDER BY `id` ASC'. The result shows 6 records with columns 'id', 'a0', 'a1', 'a2', and 'data\_hora'. The data is as follows:

id	a0	a1	a2	data_hora
1	0.06	0.08	1.00	2019-06-18 10:11:34
2	0.06	0.08	1.00	2019-06-18 10:11:36
3	0.06	0.08	1.00	2019-06-18 10:11:38
4	0.06	0.08	1.00	2019-06-18 10:11:40
5	0.06	0.08	1.01	2019-06-18 10:11:42
6	0.07	0.08	1.00	2019-06-18 10:15:25

Fonte: Elaboração Própria (2019).

Finalizada a programação Web, o sistema está integrado e pronto para ser utilizado. Os sensores, dispostos ao longo da estrutura da mini ponte, enviam sinais ao NodeMCU, que guarda estes dados, com auxílio de PHP, em um banco gerenciado pelo MariaDB. HTML, CSS e Java Script utilizam esses dados para apresentar resultados de forma legível na página Web.

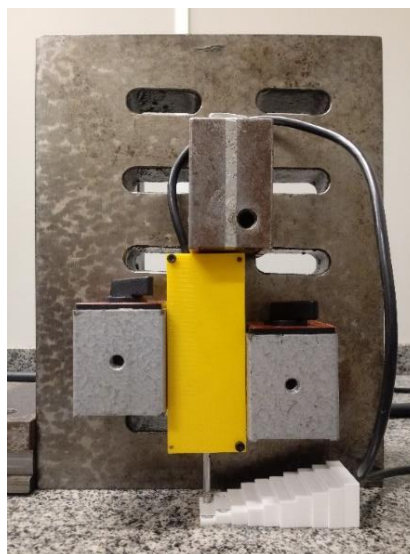
## 5 VALIDAÇÃO METROLÓGICA DO SISTEMA DE MONITORAMENTO

Finalizada a programação Web, o sistema foi integrado e colocado em operação. Realizaram-se dois testes, o primeiro sujeitando a estrutura à carregamentos estáticos e o segundo à carregamentos dinâmicos. Durante os ensaios estáticos, o sistema foi programado de forma a realizar um ciclo de medição e apresentação dos resultados a cada seis segundos. Durante os ensaios dinâmicos, o sistema foi otimizado para realizar os ciclos de aquisição de dados e apresentação de resultados em uma frequência de 20 Hz, ou seja, 20 medições são realizadas e apresentadas de forma legível na página Web a cada segundo.

### 5.1 Calibração e avaliação dos transdutores

Antes do início dos ensaios, fez-se necessário realizar a calibração do transdutor apresentado na seção 4.2.1, realizando o levantamento da curva de resposta do mesmo. Para isto, foram realizados testes de deslocamento do sensor, utilizando como mensurando um conjunto de blocos padrão de cerâmica Mitutoyo, serial 968054. Este conjunto dispõe de dez blocos padrão de diferentes espessuras, variando de 2.5 mm até 25 mm. Conforme a figura 32, utilizou-se uma cantoneira de aço para apoio do transdutor e com bases magnéticas fixou-se o mesmo, de modo que ele não se movesse durante as medições.

**Figura 32 – Levantamento da curva de resposta do sensor.**



Fonte: Elaboração Própria (2019).

O ensaio foi realizado com 5 medições repetidas em cada bloco padrão, e, ao final, realizou-se uma média dos valores medidos para cada padrão utilizado. O transdutor foi conectado à porta analógica do NodeMCU, possibilitando a conversão dos valores de tensão enviados ao microcontrolador para valores equivalentes em bits. Os dados obtidos são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 – Padrão mm x Média dos valores medido em bits**

Padrão (mm)	Valores Convertidos (bits)
0,00	871
2,50	889
5,10	904
7,70	920
10,30	935
12,90	950
15,00	964
17,60	985
20,20	1001
22,80	1020
25,00	1024

Fonte: Elaboração própria (2019).

Não interessa para o sistema a utilização da informação em bits. É vaga a ideia do que seria uma estrutura deslocando 100 bits, por exemplo. Portanto, a partir dos dados da Tabela 1, obteve-se uma equação que relaciona o deslocamento do fuso em milímetros e o valor correspondente em bits:

$$D(B) = 0,151987.B - 131,939 \quad (1)$$

Onde:

D = Deslocamento (mm);

B = bits.

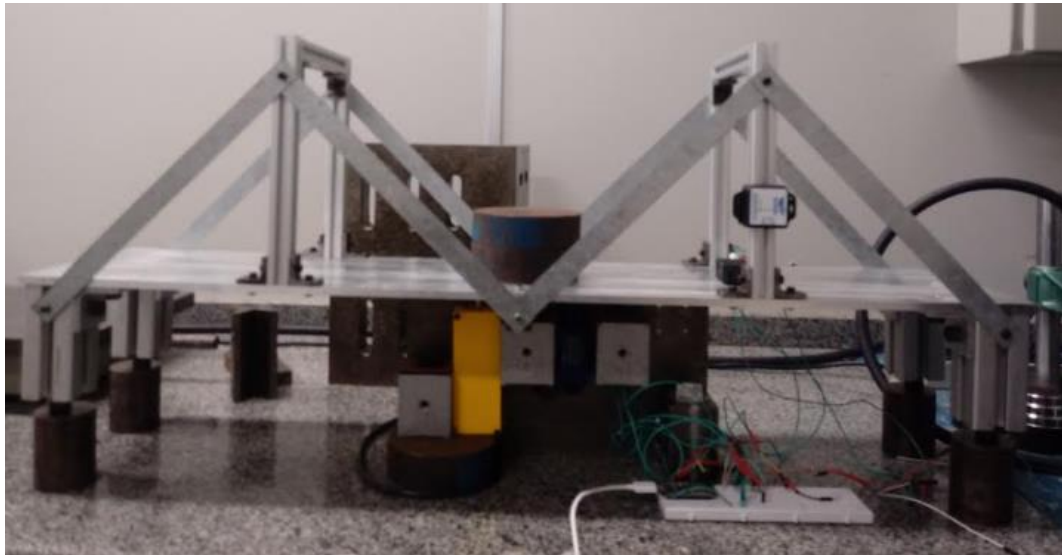
Utilizando a equação 1, foi possível programar o NodeMCU de modo a ler os valores de tensão enviados pelo transdutor, realizar a conversão para milímetros, e salvar os dados no banco de dados da web.

Os demais transdutores de deslocamento foram avaliados utilizando o conjunto de blocos padrão da Mitutoyo e apresentaram resultados confiáveis.

## 5.2 Validação metrológica do sistema para carregamentos estáticos

Conforme mencionado na seção 4, os transdutores previamente apresentados foram conectados ao NodeMCU, e então, desenvolveu-se um firmware possibilitando a plataforma de receber informações de todos os transdutores simultaneamente, interpretar estas informações e enviar para um banco de dados na Web. Deste modo, foi possível instrumentar a ponte com todos os transdutores, conforme Figura 33.

**Figura 33 – Validação metrológica do sistema para carregamentos estáticos.**

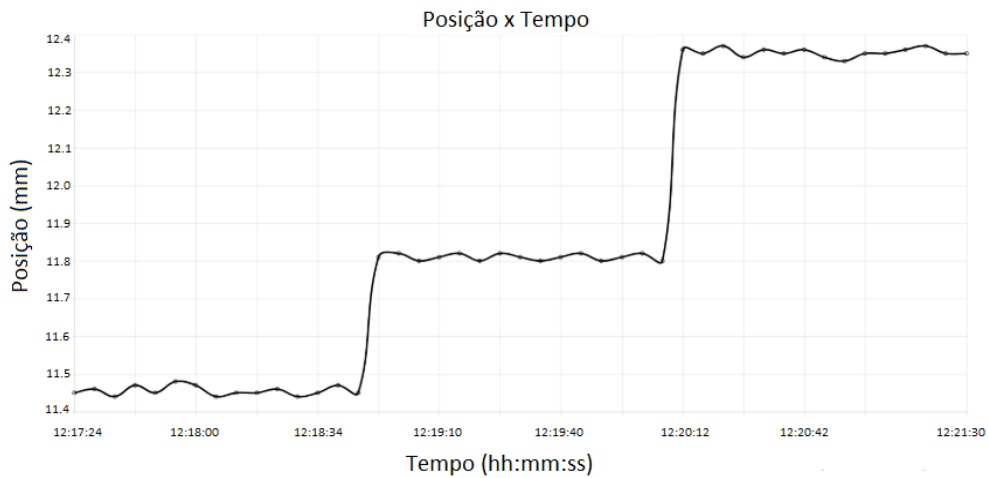


Fonte: Elaboração Própria (2019).

Com o sistema integrado, realizou-se dois testes, os quais consistiram em colocar cargas sobre a estrutura do modelo, de modo a fazê-lo fletir, para então medir os deslocamentos resultantes. As cargas utilizadas foram de 4 kg e 8 kg, respectivamente.

O gráfico da Figura 34 apresenta os resultados de deslocamento ao longo do tempo para o sensor do tipo potenciômetro linear deslizante, o qual foi posicionado de baixo da chapa principal, praticamente no centro desta. O fuso do transdutor já inicia o ensaio deslocado, com a ponta de contato apalpando a estrutura, aferindo um valor inicial de 11,45 mm.

**Figura 34 – Deslocamentos resultantes para o transdutor do tipo potenciômetro deslizante.**

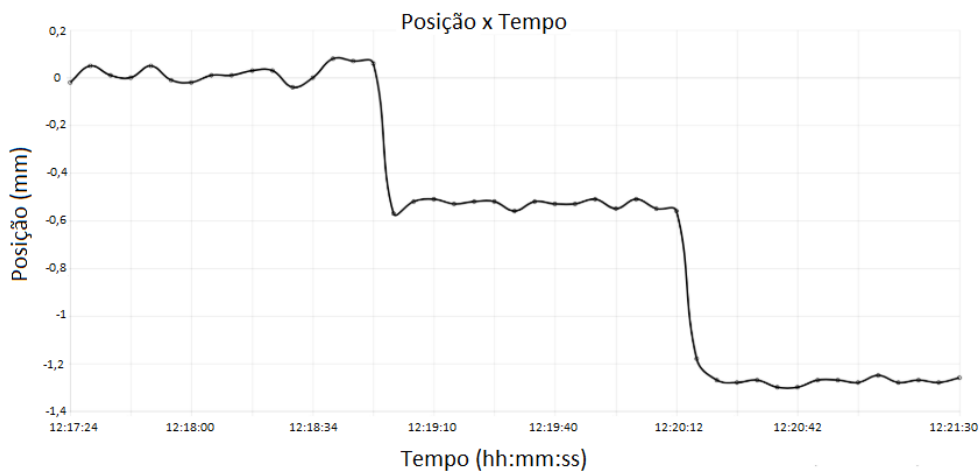


Fonte: Elaboração Própria (2019).

O valor inicial medido foi de aproximadamente 11,45 mm. Utilizando uma carga de 4 kg, o valor medido ficou em aproximadamente 11,80 mm, e manteve oscilando em torno deste valor, ou seja, um deslocamento de 0,35 mm. Utilizando uma carga de 8 kg, o valor medido foi de aproximadamente 12,20 mm, também apresentando oscilações, indicando, portanto, um deslocamento total de 0,75 mm.

Em seguida, analisou-se os resultados para o transdutor de deslocamentos do tipo medidor de profundidade de pneus, com os resultados apresentados no gráfico da Figura 35.

**Figura 35 – Deslocamentos resultantes para o sensor do tipo medidor de profundidade de pneus.**

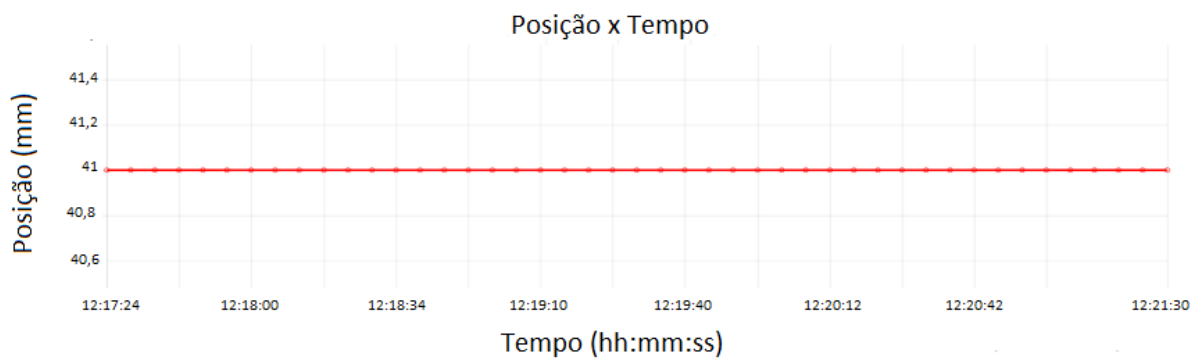


Fonte: Elaboração Própria (2019).

Este transdutor também foi posicionado de baixo da chapa principal, próximo do potenciômetro deslizante. Sem carga sobre a estrutura, o transdutor aferiu um deslocamento de 0 mm, com oscilações em torno deste valor. Colocando uma carga de 4 kg, e, após, 8 kg, o transdutor indicou deslocamentos de aproximadamente 0,50 mm e 1,20 mm, respectivamente, com oscilações em torno destes valores.

O telêmetro à laser foi posicionado à distância da estrutura, disposto de forma a medir o deslocamento de um dos pórticos da ponte, medindo uma distância inicial para este como sendo de 41 mm. O telêmetro acusou a mesma medida durante todo o experimento, de 41 mm, indicando que o pórtico se deslocou menos do que a resolução do telêmetro, que é de 1 mm, conforme apresenta a Figura 36.

**Figura 36 – Deslocamentos resultantes para o sensor do tipo telêmetro à laser.**

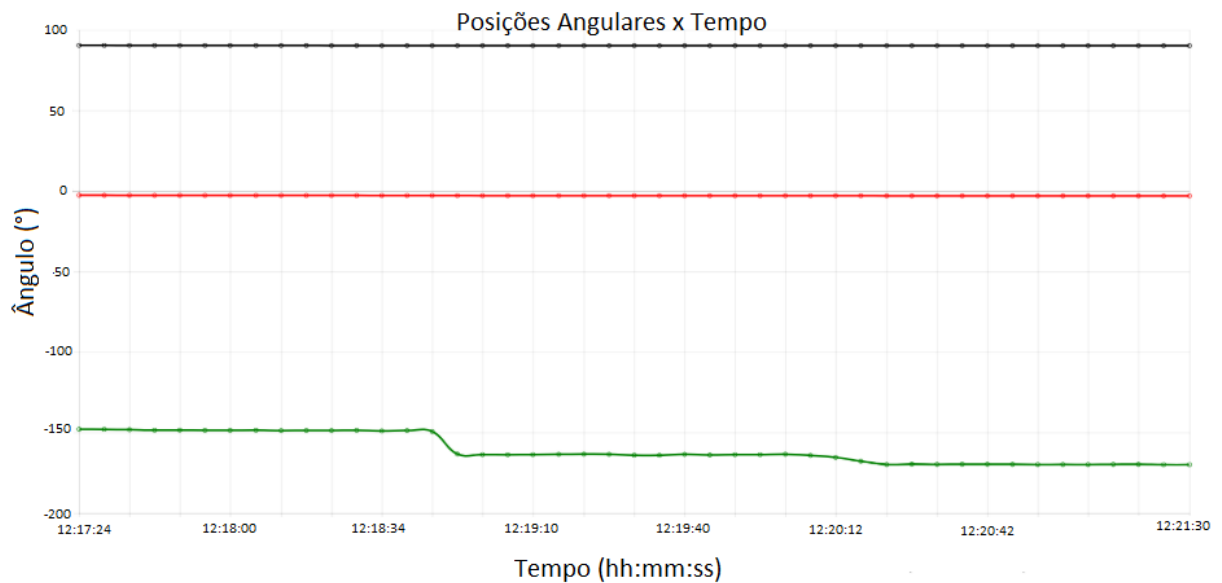


Fonte: Elaboração Própria (2019).

O acelerômetro, montado em um dos pórticos, gerou resultados de medições de deslocamentos angulares, velocidades angulares e acelerações gravitacionais em torno dos 3 eixos. A Figura 37 apresenta o gráfico de deslocamentos angulares por tempo. A variação de carga, de 0 kg à 8 kg provocou um deslocamento angular total do pórtico de aproximadamente 15° em torno de um dos eixos, conforme mostra a curva em verde.

Os gráficos apresentados são gerados em tempo real, ficando disponíveis para acesso a qualquer usuário conectado na mesma rede local em que a página foi desenvolvida, o qual pode utilizar essas informações para diagnosticar a atual condição da estrutura.

**Figura 37 – Deslocamentos resultantes para acelerômetro baseado em MEMS.**



Fonte: Elaboração Própria (2019).

É importante ressaltar que filtros digitais foram implementados via software para suavizar o ruído presente durante as aquisições, como, por exemplo, o filtro média móvel. Este filtro, normalmente descrito como um filtro passa-baixa, atua produzindo sinais de saída a partir de uma média de sinais de entrada, sendo um dos filtros digitais mais simples existentes. Durante os ensaios foi constatado que, quanto maior o número de sinais de entrada para o cálculo da média, maior a atenuação dos sinais de saída, e, conseqüentemente, mais suavizadas são as curvas obtidas. No entanto, quanto maior o número de sinais de entrada, maiores são os cálculos que o microcontrolador deve efetuar, afetando no fator “tempo real” do sistema. Deste modo, testes foram realizados até encontrar um ponto intermediário para a obtenção de curvas de resposta suavizadas no menor tempo possível.

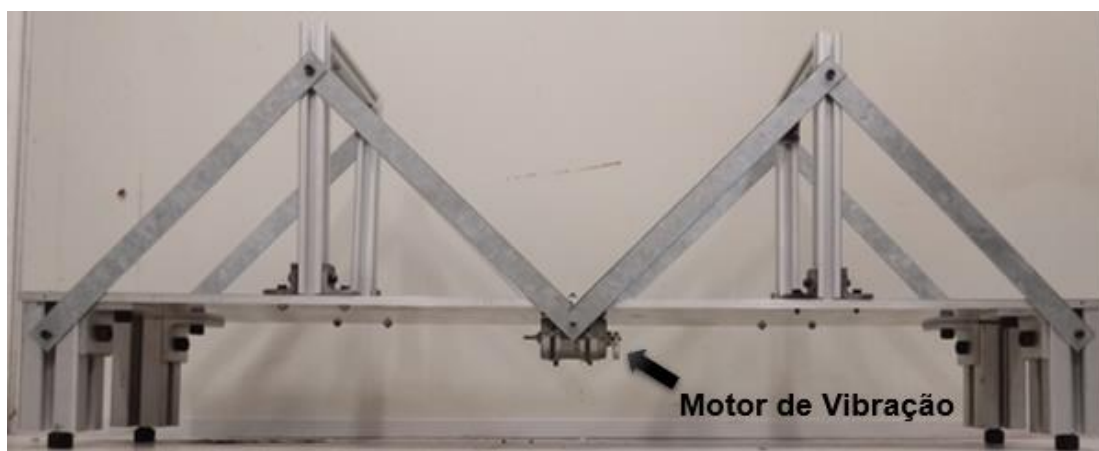
Finalizados os ensaios de carregamento estático, o sistema foi readaptado para os ensaios de carregamentos dinâmicos. Manteve-se o acelerômetro MEMS instalado na estrutura, desta vez sobre a chapa principal, e atualizou-se o firmware do NodeMCU para aquisição de dados e apresentação dos resultados em uma frequência de 20 Hz.



### 5.3 Validação metrológica do sistema para carregamentos dinâmicos

De forma a possibilitar que a estrutura seja submetida a vibrações de diferentes frequências e amplitudes, um motor CC com um disco excêntrico no eixo foi acoplado na estrutura, conforme pode ser visto na Figura 38. Desta forma, variando a tensão de alimentação do motor consegue-se variar a frequência de rotação do seu eixo, variando o modo de vibração da estrutura.

**Figura 38 – Estrutura com motor de vibração acoplado.**



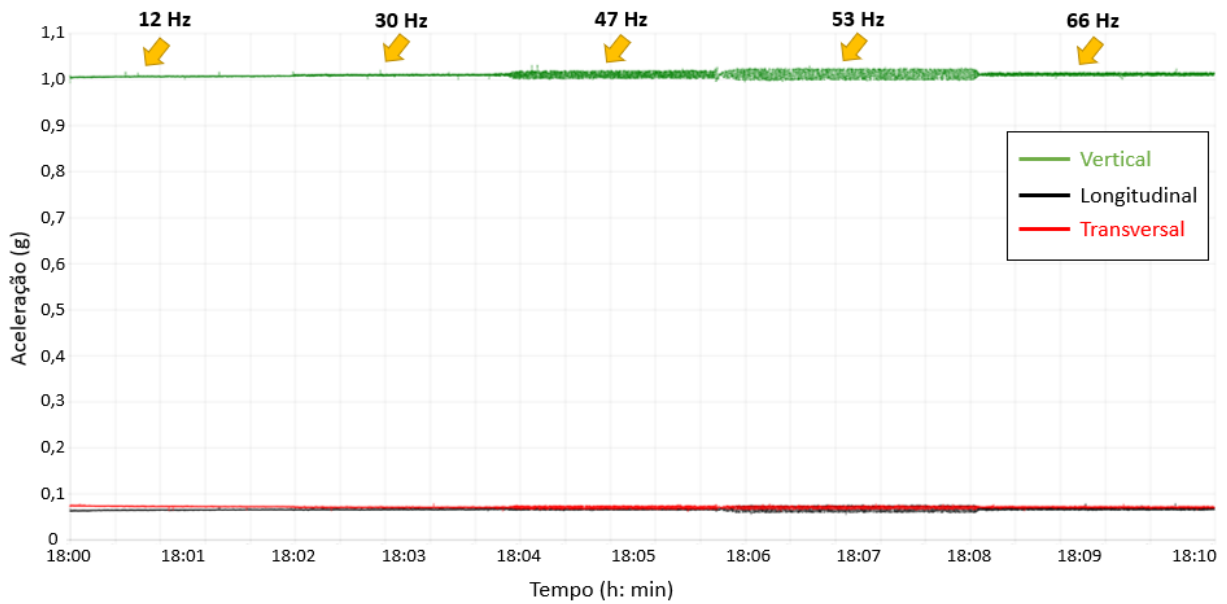
Fonte: Elaboração Própria (2019).

Os ensaios dinâmicos consistiram em variar a tensão de alimentação do motor CC, de forma a possibilitar que a ponte seja submetida a 5 frequências de vibração diferentes: 12 Hz, 30 Hz, 47 Hz, 53 Hz e 66 Hz.

O acelerômetro MEMS foi colocado sobre a chapa principal da estrutura, adquirindo dados referentes a posições angulares, velocidades angulares e acelerações gravitacionais em torno dos eixos transversal, longitudinal e vertical. Os dados obtidos foram enviados ao NodeMCU por comunicação serial, que, por sua vez, guardou os dados com auxílio de PHP em um banco gerenciado pelo MariaDB. HTML, CSS e Java Script atuam em conjunto para apresentar os dados obtidos em forma de gráficos em tempo real na página web.

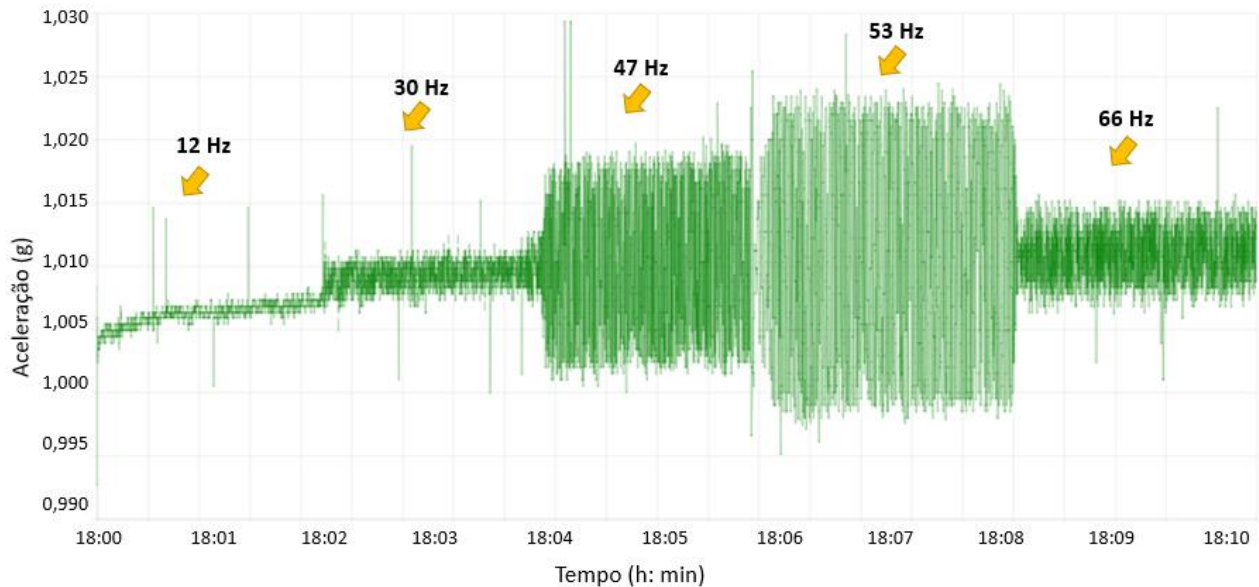
O gráfico da Figura 39 apresenta as acelerações gravitacionais em torno dos três eixos para as cinco diferentes frequências utilizadas, enquanto o gráfico da Figura 40 apresenta uma ampliação da curva de aceleração gravitacional em torno do eixo vertical.

**Figura 39 – Gráfico de aceleração por tempo para os eixos lateral, longitudinal e vertical.**



Fonte: Elaboração Própria (2019).

**Figura 40 – Gráfico de aceleração por tempo para o eixo vertical.**



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Constata-se que as cinco frequências de vibração utilizadas causam efeitos distintos na estrutura, sendo a frequência de 53 Hz a mais prejudicial, submetendo a ponte à mais elevada amplitude de aceleração gravitacional, variando entre aproximadamente 1 g e 1,025 g.

## 6 CONCLUSÃO

No Brasil, o monitoramento da estabilidade geométrica de estruturas ainda é uma exceção destinada a poucos casos, predominando inspeções visuais esporádicas, e muitas ações de reparo emergencial a custos elevados, ocorrendo muitas vezes interrupções inesperadas na operação destas estruturas ou até mesmo o colapso das mesmas. Portanto, faz-se necessário incorporar a prática do monitoramento contínuo, a qual é a melhor solução para garantir a preservação de uma estrutura. Neste contexto, desenvolveu-se o sistema de monitoramentos apresentado ao longo deste trabalho, o qual foi fundamentado em sistemas reais e desenvolvido utilizando soluções de baixo custo.

Excelentes resultados foram obtidos durante os ensaios de carregamentos estáticos e dinâmicos, propiciando a validação do sistema descrito. O sistema possui custo reduzido, e, uma vez programado, é de fácil utilização, apresentando-se como uma plataforma intuitiva e de fácil compreensão para o uso no monitoramento de estruturas, sendo de inserção viável em atividades de ensino, pesquisa e extensão em cursos técnicos e de engenharia.

A implementação do NodeMCU neste sistema deve-se sobretudo ao seu baixo custo, e pelo fato deste atender os requisitos necessários. Entretanto, existem hoje no mercado plataformas de IOT que possuem maiores taxas de transmissão quando comparadas ao NodeMCU, portanto, sugere-se a utilização de outras plataformas em trabalhos posteriores.

Referente aos ensaios de carregamentos dinâmicos, a resolução do sinal obtido, com quatro casas decimais, aliada a alta frequência de resposta do acelerômetro para esta aplicação, foram essenciais para se obter os resultados apresentados. Conforme citado anteriormente, este acelerômetro possui uma frequência de resposta de até 200 Hz, a qual é comprometida, uma vez que existe toda uma operação para salvar os dados e apresentá-los na página Web. A máxima frequência obtida para a aquisição de dados e apresentação foi de 20 Hz, ou seja, 20 medições são realizadas e apresentadas de forma legível na página Web a cada segundo. Para contornar esse problema, sugere-se que para trabalhos posteriores o NodeMCU seja programado de modo a dividir o seu trabalho em duas etapas, uma etapa de aquisição de sinal, e outra etapa de armazenamento de dados. Pode-se observar que, apesar da frequência de amostragem estar abaixo da frequência do

sistema, conseguiu-se ótimos resultados, permitindo analisar remotamente e em tempo real o efeito de diferentes frequências sobre uma estrutura.

Devido a amplitude do tema tratado, são inúmeras as modificações e melhorias que podem ser feitas em trabalhos futuros. Sugere-se, por exemplo, o aperfeiçoamento do sistema de visualização de dados, o qual, atualmente, tem a função de somente apresentar os dados obtidos, mas pode realizar atividades mais complexas, como a utilização de modelos estatísticos para a previsão da condição da estrutura no futuro. Sugere-se também o desenvolvimento de um sistema de alerta, que possibilite notificar os responsáveis em condições de desestabilidade da estrutura. Por fim, propõe-se a realização de testes de campo, utilizando o sistema aqui apresentado no monitoramento de uma estrutura real.

## REFERÊNCIAS

ASSIS, WAYNE SANTOS DE. **Sistemas Computacionais de Apoio à Monitoração de Estruturas de Engenharia Civil**. São Paulo, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto Armado. Rio de Janeiro, 2004.

CSI AMERICA. **SAP 2000**. Disponível em:

< <https://www.csiamerica.com/products/sap2000>> Acesso em: 19 out. 2019.

EMILIO. M. D. P. **Data Acquisition Systems: From Fundamentals to Applied Design**. Springer. 2013.

ELECTROIMPACT. **Soluções em linhas de montagem de aviões**. Disponível em:

<<https://www.electroimpact.com/AssemblySolutions.aspx>> Acesso em: 30 jul. 2019.

EXPRESSIF. **Diagrama Funcional ESP8266**. Disponível em:

< [www.expressif.com](http://www.expressif.com) > Acesso em: 09 nov. 2019.

FYNITE SOLUTIONS. **Sistema de Monitoramento**. Disponível em:

< <http://fynitesolutions.com/shm.html>> Acesso em: 21 out. 2019.

GREENGARD. S. **The Internet of Things**. MIT Press, 2015.

G1. **Ciclovía Tim Maia**. Disponível em:

< <https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2019/02/07/trecho-da-ciclovía-tim-maia-desaba-com-temporal-no-rio.ghhtml>> Acesso em: 20 out. 2019.

G1. **Viaduto da marginal pinheiros**. Disponível em:

<<https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2018/11/15/elevado-de-acesso-da-marginal-pinheiros-para-a-ponte-do-jaguare-cede.ghhtml>> Acesso em: 30 jul. 2019.

GOOGLE SITES. **Pinos do Paquímetro Digital**. Disponível em:

< [www.sites.google.com/site/marthalprojects](http://www.sites.google.com/site/marthalprojects)> Acesso em: 03 nov. 2019.

GONÇALVES JR, Armando Albertazzi; SOUSA, A. R. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. São Paulo: Manole, 2008.

INSTRUCTABLES. **Pinos NodeMCU**. Disponível em:  
< [www.instructables.com](http://www.instructables.com) > Acesso em: 09 nov. 2019.

INVENSENSE. **MPU6050**. Disponível em:  
< <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6500/>>  
Acesso em: 09 nov. 2019.

JRT MEASURE. **Telêmetro Laser**. Disponível em:  
< [www.jrt-measure.com](http://www.jrt-measure.com) > Acesso em: 09 nov. 2019.

MARTHA. L. F. **Análise de Estruturas: Conceitos e Métodos Básicos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

MILITITSKY, J.; CONSOLI, N. C.; SCHNAID, F. **Patologia de fundações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

MITUTOYO. **LVDT**. Disponível em:  
< <https://www.mitutoyo.co.jp/eng/products/seimitusensor/sesshoku.html>>  
Acesso em: 21 out. 2019.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Monitoramento Remoto de Viaduto**. Disponível em:  
< <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-13833#>> Acesso em: 03 nov. 2019.

NEWTON BRAGA. **Construção do Paquímetro Digital**. Disponível em:  
< <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/3830-mec085>>  
Acesso em: 09 nov. 2019.

NOLL, V.; SOARES, F. A. P. . **Tecnologia de Transdutores**. 1999.

NOTÍCIAS DO DIA. **Inspeção Pontes Pedro Ivo e Colombo Salles**. Disponível em:  
< <https://ndmais.com.br/noticias/com-estrutura-precaria-pontes-pedro-ivo-campos-e-colombo-salles-passarao-por-inspecao-tecnica/>> Acesso em: 21 out. 2019.

ROBOTCORE. **NodeMCU**. Disponível em:  
< [www.robotcore.net](http://www.robotcore.net)> Acesso em: 09 nov. 2019.

SILVA, Daíçon Maciel da; SOUTO, André Kramer. **Estruturas - Uma abordagem arquitetônica**. Porto Alegre: Editora Ritter dos Reis, 1997.

SIMSCALE. **Tacoma Narrows**. Disponível em:  
< <https://www.simscale.com/blog/2018/07/tacoma-narrows-bridge-collapse/>>  
Acesso em: 20 out. 2019.

TE SOLUTION. **Dala Friendship Bridge**. Disponível em:  
< [http://www.tesolution.com/dala\\_bridge.html](http://www.tesolution.com/dala_bridge.html)> Acesso em: 20 out. 2019.

WIKIPEDIA. **Aquisição de Dados**. Disponível em:  
< [https://en.wikipedia.org/wiki/Data\\_acquisition](https://en.wikipedia.org/wiki/Data_acquisition)> Acesso em: 02 nov. 2019.

WIT MOTION. **BWT901CL**. Disponível em:  
< [www.wit-motion.com](http://www.wit-motion.com) > Acesso em: 09 nov. 2019.