



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU**



BRUNO MOREIRA DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA SEM FIO PARA MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO**

Ouro Preto, 2023

BRUNO MOREIRA DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA SEM FIO PARA
MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo

Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
Fevereiro/2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586d Silva, Bruno Moreira da.

Desenvolvimento de um sistema sem fio para monitoramento de vibrações. [manuscrito] / Bruno Moreira da Silva. - 2023.
63 f.: il.: color.. + Quadros.

Orientador: Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Controle e Automação .

1. Sistemas de comunicação sem fio. 2. Computação - Processamento de dados. 3. Microcontroladores. 4. Detectores - Acelerômetro. 5. Análise estrutural (Engenharia) - Monitoramento de Saúde Estrutural. I. Rêgo Segundo, Alan Kardek. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E
AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Bruno Moreira da Silva

Desenvolvimento de um Sistema Sem Fio para Monitoramento de Vibrações

Monografia apresentada ao Curso de Eng. de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação

Aprovada em 28 de fevereiro de 2023

Membros da banca

Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Profa. Dra. Adrielle de Carvalho Santana - Convidado (Universidade Federal de Ouro Preto)
Me. Fernando dos Santos Alves Fernandes - Convidado (Universidade Federal de Ouro Preto)

Alan Kardek Rêgo Segundo, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 06/03/2023



Documento assinado eletronicamente por **Alan Kardek Rego Segundo, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/03/2023, às 14:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0481567** e o código CRC **7CA58873**.

*Família, meu bem terreno de mais alto valor,
este trabalho é dedicado a cada um de vocês
que são fonte inesgotável de amor e motivação.*

AGRADECIMENTOS

Mas Deus é sempre bom!

Agradeço inicialmente a Deus por ter me dado saúde, força para superar as dificuldades, e por me ajudar alcançar todos os objetivos que almejo. Agradeço, especialmente, meus pais Osvaldo e Iranir e meu irmão Gabriel que sempre me impulsionaram, me ensinaram os melhores valores possíveis para me tornar o que sou, sempre permanecendo ao meu lado com muito amor, tanto nos melhores momentos quanto nos difíceis. Também agradeço a toda a minha família, que está sempre presente e tornando os momentos especiais.

Ao meu orientador e professor Dr. Alan Kardek, pelo suporte e ajuda no tempo que lhe coube, pelas suas correções, amizade, incentivos, críticas construtivas, atenção, paciência e pelo excelente trabalho prestado durante os anos de formação, sendo um bom exemplo e referência profissional a ser seguido que contribuiu para meu desenvolvimento intelectual, acadêmico e profissional.

Agradeço a Universidade Federal de Ouro Preto, por meio da Escola de Minas, pela oportunidade do estudo de alto nível que me foi dado, como também a formação profissional que me foi oferecida e todos os professores que passaram em minha trajetória acadêmica.

Aos amigos e colegas que me acompanharam durante o percurso acadêmico, pela amizade, pelo apoio e por todos os bons momentos que ao longo destes anos me proporcionaram as condições necessárias para chegar aqui. Em especial, aos meus amigos do curso Ana Carolina, Ana Luiza, Arnaldo, Diego, Henrique, João, João Paulo, José Lucas, Pedro, Phillipi, Ray que sempre me ajudaram. Além dos meus amigos de longa data Breno, Juliano, Luiz, Matheus, Nísio, Paulo Henrique, Rafaela, Romário e Suelly. E a minha pura gratidão aos meus amigos Diego, Henrique e Maria de Fátima que me ajudaram muito nesses últimos meses a desenvolver este trabalho.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“Os sonhos são como uma bússola, indicando os caminhos que seguiremos e as metas que queremos alcançar. São eles que nos impulsionam, nos fortalecem e nos permitem crescer.” Augusto Cury

RESUMO

As estruturas de engenharia, como barragens de concreto, edifícios e pontes estão sujeitas a desgastes estruturais ao longo do tempo, podendo chegar a grandes danos e colapsos. O monitoramento de condição estrutural é usado para prever e analisar os danos que podem ocasionar potenciais desastres com perdas econômicas e humanas. Portanto, a análise de vibrações é muito importante nesse processo de monitoramento, pois as vibrações podem causar diversas falhas em grandes estruturas. A utilização de tecnologias de monitoramento de vibrações por meio de sistemas de redes sem fio vem sendo bastante estudada, possibilitando atingir locais de difícil acesso. Além disso, é possível reduzir custos por não precisar de cabeamento, o qual pode sofrer danos com o tempo e apresentar dificuldade de reposição e instalação. Nesse sentido, este trabalho propõe o desenvolvimento de um dispositivo para medição e transmissão de dados de um sensor de aceleração via radiofrequência. Assim, é possível instalar esse dispositivo em uma estrutura civil para o monitoramento das vibrações. Os dados são recebidos por um computador, que então processa as informações por meio da Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform - FFT), permitindo ao usuário analisar a saúde da estrutura por meio de gráficos no domínio da frequência. Após realizar ensaios com uma viga biapoiada observou-se que a primeira frequência modal de vibração da viga foi de 8.053Hz. Logo, o resultado obtido pela FFT está próximo ao valor teórico, demonstrando, assim, a aderência do sistema desenvolvido para o monitoramento de vibração sem fio para análise da integridade de estruturas.

Palavras-chaves: Comunicação sem fio; Processamento de dados; Microcontrolador; Acelerômetro; Monitoramento de Saúde Estrutural.

ABSTRACT

Engineering structures such as concrete dams, buildings and bridges are subject to structural wear over time, which can lead to major damage and collapse. Structural condition monitoring is used to predict and analyze the damage that can cause potential disasters with economic and human losses. Therefore, vibration analysis is very important in this monitoring process, as vibrations can cause several failures in large structures. The use of vibration monitoring technologies through wireless network systems has been extensively studied, making it possible to reach places that are difficult to access. In addition, it is possible to reduce costs by not needing cabling, which can suffer damage over time and present difficulty in replacement and installation. In this sense, this work proposes the development of a device for measuring and transmitting data from an acceleration sensor via radiofrequency. Thus, it is possible to install this device in a civil structure to monitor vibrations. The data is received by a computer, which then processes the information through the Fast Fourier Transform (FFT), allowing the user to analyze the health of the structure through graphs in the frequency domain. After carrying out tests with a simply supported beam, it was observed that the first modal vibration frequency of the beam was 8,053Hz. Therefore, the result obtained by the FFT is close to the theoretical value, thus demonstrating the adherence of the system developed for wireless vibration monitoring to analyze the integrity of structures.

Key-words: Wireless communication. Data processing. Microcontroller. Accelerometer. Structural Health Monitoring.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquemático da estrutura interna de um microcontrolador.....	22
Figura 2 - Vista da ponte Carquinez de Crockett, Califórnia.....	25
Figura 3 - Nó sensor wireless instalado na superfície inferior da ponte.....	25
Figura 4 – Topologias do padrão IEEE 802.15.4.....	28
Figura 5 – Placa GY-521 com MPU-6050 integrado.....	33
Figura 6 – Diagrama de pinos.....	35
Figura 7 – Novo protótipo do nó sensor com seus componentes desenvolvido no PROTEUS.....	38
Figura 8 – Montagem do circuito utilizando para o nó sensor em uma Protoboard.....	39
Figura 9 – Função principal para utilizar a comunicação I2C.....	40
Figura 10 – Biblioteca de configurações do PIC18F2550.....	43
Figura 11 – Configuração das IOs e Portas no programa principal.....	44
Figura 12 – Código implementado para aquisição da aceleração no programa principal.....	44
Figura 13 – Configurações do XBee Coordenador no programa XCTU e sua interface.....	47
Figura 14 – Configurações do XBee NODE1 no programa XCTU e sua interface.....	47
Figura 15 – Exemplo de gráfico para a função S.....	49
Figura 16 – Função com o cálculo da FFT.....	49
Figura 17 – Gráfico da FFT para a função S com taxa de amostragem a 25Hz.....	50
Figura 18 – Exemplo de viga biapoiada utilizada no ensaio.....	51
Figura 19 – Estrutura para o ensaio de vibrações.....	52
Figura 20 – Apoio da viga em uma barra de aço e um banco de madeira maciço.....	52
Figura 21 – Fixação do sensor GY-521.....	53
Figura 22 – Gráfico da resposta do estado estacionário no domínio do tempo.....	54
Figura 23 – Gráfico da resposta do estado estacionário no domínio da frequência.....	55
Figura 24 – Gráfico ampliado da resposta do estado estacionário no domínio do tempo.....	55
Figura 25 – Gráfico da resposta no domínio do tempo com o golpe de um martelo.....	56
Figura 26 – Gráfico da resposta no domínio da frequência com o golpe de um martelo.....	56
Figura 27 – Gráfico ampliado da resposta no domínio do tempo com o golpe de um martelo.....	57
Figura 28 – Gráfico da resposta no domínio do tempo para comparar taxas de amostragem.....	59
Figura 29 – Gráfico da resposta no domínio da frequência para outras taxas de amostragem.....	59

Lista de Quadros

Quadro 1 –Comparativo de redes.....	26
Quadro 2 – Funcionalidade dos dispositivos.....	28
Quadro 3 – Funções para a comunicação I2C.....	40
Quadro 4 – Mapa de registro configurados para a MPU-6050.....	41
Quadro 5 – Funções utilizadas para MPU-6050.....	42
Quadro 6 – Funções utilizadas para a comunicação serial.....	42
Quadro 7 – Biblioteca de configurações do PIC18F2550.....	45
Quadro 8 – Configurações do XBee coordenador no programa XCTU.....	46
Quadro 9 – Configurações do XBee NODE1 no programa XCTU.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analogico/Digital
ADCs	Analogue to Digital Converter
DACs	Digital to Analogue Converter
DFT	Discrete Fourier Transform
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Readonly Memory
FFT	Fast Fourier Transform
FFD	Full Feature Device
F _s	Frequência de amostragem
Hz	Hertz
I/O	Input/Output
I ² C	Inter-Integrated Circuit
ICSP	in-circuit serial programming
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISM	International Symposium on Multimedia
KB	Kilobyte
Km	Quilômetro
KHz	Quilo Hertz
MHz	Mega Hertz
μA	Microampere
mA	Miliampere
MAC	Medium Access Control
MEMS	Micro Electro-Mechanical Systems
OSCCON	Oscillator Control Register
PIC	Peripheral Interface Controller
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Random Access Memory
RFD	Reduce Feature Device
ROM	Read Only Memory
SCL	Serial Clock
SDA	Serial Data
SHM	Structural Health Monitoring
SI	Sistema Internacional de Unidades
SPI	Serial Peripheral Interface
T _s	Período de amostragem
UNESP	Universidade Estadual Paulista
UART	Universal Asynchronous Receiver / Transmitter
USB	Universal Serial Bus
WPAN	Wireless Personal Area Networks)

Sumário

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivo geral	15
1.3 Justificativa do Trabalho	15
1.4 Estrutura do texto	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Monitoramento de Saúde Estrutural	17
2.1.1 Vibração	18
2.1.2 Sensor acelerômetro	19
2.1.3 Sistema embarcado	20
2.1.3.1 Microcontroladores.....	20
2.1.3.2 O microcontrolador PIC	22
2.2 Sistemas de Monitoramento de Vibração sem fio aplicados a pontes.....	23
2.2.1 IEEE 802.15.4	26
2.2.1.1 Topologia de rede	26
2.2.1.2 Tipos e papéis do IEEE 802.15.4	27
2.2.1.3 Módulos Xbee no padrão IEEE 802.15.4	28
2.3 Processamento de sinais no Monitoramento de Saúde Estrutural	28
2.3.1 Frequência na análise de estruturas	28
2.3.2 Transformada Rápida de Fourier	29
3. DESENVOLVIMENTO.....	31
3.1 Materiais	31
3.1.1 <i>Hardware</i>	32
3.1.1.1 MPU-6050	32
3.1.1.2 Microcontrolador PIC18F2550.....	33
3.1.1.3 Módulos XBee-PRO.....	34
3.1.1.4 PICKit 2.....	35
3.1.2 <i>Software</i> utilizados	35
3.1.2.1 Processamento de dados no MATLAB	35
3.1.2.2 MPLAB	35
3.1.2.3 XCTU	36
3.2 Metodologia.....	36
3.3 Desenvolvimento do nó sensor utilizando o PIC18F2550	37
3.4 Desenvolvimento da programação para o microcontrolador PIC18F2550	38

3.4.1 Programando as rotinas no MPLAB:.....	38
3.5 Processo de validação da comunicação entre os XBee Pro utilizados	44
3.5.1 Processo de configuração do nó	44
3.6 Processamento dos dados pelo computador utilizando o MATLAB	47
3.7 Realizando um ensaio de vibração	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5. CONCLUSÃO.....	60
REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Bezerra (2019), são classificadas áreas de risco os edifícios, os taludes, as barragens e as pontes sendo, portanto, exemplos de estruturas naturais ou de engenharia as quais estão suscetíveis a potenciais causadores de danos tanto econômicos como ambientais e de saúde. Logo, podem ocorrer acidentes leves e até mesmo fatais. Ainda segundo o autor supracitado, encostas e taludes podem sofrer com eventos classificados como quedas, tombamentos, escorregamentos e corridas.

Em se tratando de estruturas de engenharia, como pontes, edifícios e barragens de concreto, Moreno-Gomez *et al.* (2017), afirmam estarem essas submetidas a possíveis rupturas ou colapsos. Isso decorre do natural desgaste ao longo do tempo, como também em virtude de eventos, como terremotos, furacões ou desastres naturais. Por isso, essas estruturas de engenharia precisam ter sua integridade estrutural monitorada com o intuito de se evitar potenciais desastres com perdas econômicas e humanas. Reiterando, faz-se necessário o monitoramento de condição estrutural.

O Monitoramento de Condição Estrutural ou SHM (sigla em inglês) é um processo de estimativa da integridade das estruturas civis, com base em análise adequada dos dados medidos no local. Essa técnica é realizada em diferentes tipos de estruturas por meios de detecção, localização e avaliação de danos em fases anteriores, o que por sua vez, vem aumentando a segurança e reduzindo os custos de manutenção (ABDULKAREM *et al.*, 2020).

Observa-se que o aumento de riscos de desastres pode decorrer pela presença de vibrações, assim, por meio delas, ocorrem processos que, ao longo do tempo, levam a rachaduras ou rupturas que podem abalar as estruturas. Desse modo, para se fazer o monitoramento de condição estrutural de obras civis utilizam-se estudos pautados nas vibrações.

Testes com base em monitoramento de vibrações são utilizados para se ter a confiabilidade e a segurança para qualquer equipamento, e isso ocorre da mesma maneira com as frequências e amplitudes, proporcionando a demonstração de falhas e a necessidade de manutenção.

Para Fernandes (2020),

o monitoramento contínuo das frequências naturais de equipamento ou de uma estrutura permite a observação de mudanças na frequência ou em outros parâmetros da vibração, indicando falhas ou a necessidade de manutenção, além de auxiliar o desenvolvimento de sistemas de monitoramento e alerta.

Não é diferente com as estruturas como pontes, que, ao serem monitoradas, precisam desses estudos de vibrações. Além disso, o uso de comunicação sem fio para esse tipo de aplicação é muito eficaz e vem crescendo, sendo um bom facilitador para que não tenha grande quantidade de cabeamento ou uma grande quantidade de profissionais inspecionando em locais de difícil acesso, sujeitos à ocorrência de acidentes.

Assim, neste estudo, é apresentada a importância do monitoramento de saúde estrutural utilizando redes sem fio, por meio de acelerômetros para captação de vibrações, para evitar o uso de cabeamento e, por fim, utilizando o processamento de sinais para permitir a análise dos dados no domínio da frequência. Tudo isso é feito com o intuito de proporcionar a detecção e a prevenção de falhas com eficácia para melhorar a saúde estrutural e evitar acidentes ou até mesmo catástrofes com perdas de vidas.

1.1 Objetivo geral

Tem-se como objetivo geral deste trabalho o desenvolvimento de um sistema sem fio de monitoramento de vibração para analisar a integridade de estruturas civis.

Objetivos específicos

- Estudar as propriedades dos componentes empregados em sistemas de Monitoramento de Saúde Estrutural;
- Desenvolver e aplicar um protótipo para captação, tratamento e envio de dados via comunicação sem fio utilizando o microcontrolador escolhido;
- Validar o sistema sem fio, ao qual se integram três componentes, compreendendo: subsistemas de aquisição de dados, algoritmos embutidos num microcontrolador e comunicação sem fio, com vistas ao monitoramento de condição estrutural;
- Realizar comparação entre as taxas de amostragem alcançadas no trabalho de conclusão de curso de Eler Filho (2014), que adotou outro tipo de microcontrolador.

1.3 Justificativa do Trabalho

Justifica-se este estudo devido à necessidade do desenvolvimento de novos dispositivos via comunicação sem fio para o monitoramento e a detecção de possíveis riscos em estruturas civis, especificamente em pontes.

Compreender o padrão das vibrações, que são motivadas por agentes externos assim como sua variação de acordo com o tempo, é importante para o entendimento das frequências

modais, frequências de naturais dentre outros fatores. Os dados são passíveis de análise em função do tempo, havendo a antecipação de uma iniciativa em relação a manutenções preditivas, para que os danos estruturais não se transformem em acidentes fatais ou incidentes.

Com o progresso do estudo no campo do monitoramento de saúde estrutural, observa-se grande utilização de redes sem fio para evitar as seguintes situações: (i) utilização de cabeamento; (ii) mão de obra especializada *in loco*; (iii) riscos de acidentes; (iv) gasto na instalação, utilização e manutenção de equipamentos, além de energia e (v) a limitação de instalação.

1.4 Estrutura do texto

Este trabalho foi organizado em 5 capítulos. É introduzido o contexto sobre o trabalho no primeiro capítulo. No capítulo 2 tem-se uma visão de como anda o estado da arte em monitoramentos de saúde estrutural sem fio, e partes integrantes de um nó sensor para mensurar vibrações como: acelerômetro, microcontrolador PIC, XBee S2Pro. Foi abordada também a Transformada Rápida de Fourier para calcular as frequências modais de uma viga. No capítulo 3, foram apresentados os materiais a serem utilizados incluindo *hardwares* e *softwares* para o desenvolvimento do sistema de monitoramento de vibrações, além dos métodos para obter os resultados obtidos a partir dos ensaios no laboratório. No capítulo 4, são apresentados os resultados do nó sensor e analisado suas limitações, além de comparar a taxa de amostragem obtida com o trabalho de Eler Filho (2014).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são abordados conceitos e estudos relacionados a área de sistemas de monitoramento de saúde estrutural. Assim, é utilizado o modelo do SHM como referência para criação de um dispositivo de aferição de vibrações. Esse dispositivo é um nó sensor que conta com uma unidade de aquisição e transmissão de dados via radiofrequência.

2.1 Monitoramento de Saúde Estrutural

Segundo Kurata *et al.* (2013), o interesse em sistemas permanentes de monitoramento estrutural tem crescido em resposta ao desejo da comunidade de engenharia de pontes implementar mais métodos para avaliação da saúde estrutural.

Neste trabalho são usadas como expressões sinônimas, Monitoramento da Condição Estrutural (SHM -Structural Health Monitoring) e Monitoramento de Saúde Estrutural. De acordo com Abdulkarem *et al.* (2020), conceitua-se como sendo um processo de estimativa da integridade das estruturas civis, com base em análise adequada dos dados medidos no local. Além disso, é considerada uma técnica que se realiza em diferentes tipos de estruturas com o propósito de detecção, localização e avaliação de danos em fases anteriores, o que, por sua vez, vem aumentando a segurança e reduzindo os custos de manutenção.

Desse modo, o SHM é aplicado em pontes, edifícios e aeronaves, com o intuito de detectar quaisquer sinais de danos ou degradação, por isso é de suma importância. Ademais, esse monitoramento melhora a confiabilidade das estruturas, detectando mudanças no comportamento ou em suas propriedades, prevenindo falhas ou colapsos, por exemplo, rupturas, acidentes, incidentes e desmoronamentos.

Segundo o Abdulkarem *et al.* (2020), os sistemas de Monitoramento da Saúde Estrutural normalmente, incluem sensores que medem vários parâmetros, como deformações, deslocamentos, temperaturas e vibrações. Assim, são utilizados sistemas de aquisição e processamento de dados que analisam alguns desses parâmetros para identificar quaisquer alterações ou anomalias. Os dados coletados pelos sensores possibilitam a geração de um relatório de condição estrutural, que fornece informações sobre a condição da estrutura e de áreas de preocupação.

Ainda seguindo a proposta do referido autor, as tecnologias SHM podem ajudar as equipes de manutenção a priorizar reparos, minimizar o tempo de inatividade e prolongar a vida útil das estruturas. Também melhoram a eficiência e a segurança dos processos de inspeção e

manutenção, reduzindo a necessidade de inspeções manuais e permitindo um monitoramento mais frequente.

Em suma, os sistemas SHM se tornaram uma das ferramentas essenciais para o monitoramento de condição estrutural, já que há confiabilidade, robustez, segurança e maior facilidade de implementação e manutenção. A seguir será abordado o tema vibração que é parte fundamental para este trabalho e tem como referência os estudos de Ripper Neto (2007).

2.1.1 Vibração

Conforme Ripper Neto (2007), as vibrações em estruturas são consideradas oscilações repetitivas de uma estrutura em um espaço de tempo. Elas podem ser causadas por fontes internas, como a deformação da estrutura devido às tensões ou fontes externas, por exemplo, fenômenos naturais, como abalos sísmicos, terremotos, correntes de ar, bem como o tráfego de veículos automotores ou de máquinas pesadas. As vibrações são geralmente medidas em Hertz (Hz), que indicam o número de ciclos por segundo.

Sobre os tipos de vibrações, Ripper Neto (2007) assevera em seu livro que há vibrações harmônicas, vibrações forçadas e vibrações livres. Quanto às vibrações harmônicas, essas ocorrem quando um objeto vibra com uma frequência constante e regular, enquanto as vibrações forçadas ocorrem quando uma força externa é aplicada a um objeto, fazendo-o vibrar. Já as vibrações livres, ocorrem quando um objeto é liberado após ter sido comprimido ou tensionado e continua a vibrar sem a aplicação de uma força externa.

Acerca da medição e da análise, as vibrações podem servir para avaliar a condição e o desempenho de uma estrutura. Em Monitoramento de Condição Estrutural, as vibrações são, geralmente, monitoradas por meio de sensores – acelerômetros – que medem a intensidade e a frequência das vibrações.

Fornecendo informações essenciais, a análise das vibrações reflete a condição da estrutura, identificando pontos e a gravidade de danos potenciais, bem como avaliando a eficiência de reparos e manutenções preditivas.

Em geral, as vibrações são uma parte importante para a avaliação da condição estrutural, e a tecnologia de monitoramento de vibrações é amplamente utilizada em aplicações críticas, como a avaliação de pontes, edifícios, máquinas rotativas e aeronaves. No próximo tópico, é abordado sobre um componente fundamental para a captação da vibração, o acelerômetro.

2.1.2 Sensor acelerômetro

Conforme Koene, Klar e Vitalla (2020), um acelerômetro é um dispositivo o qual mensura acelerações lineares em três dimensões: x, y e z. Sendo composto por um ou mais sensores de movimento, o sensor acelerômetro converte as acelerações em sinais elétricos do tipo analógico/digital, os quais podem ser processados e interpretados por um microcontrolador ou outro dispositivo de processamento.

Segundo Rocha e Marranghello (2013), a aceleração é uma grandeza física cinemática que mede a taxa de variação da velocidade em função do tempo. Acelerômetros mecânicos antigos podem ser construídos, por exemplo, a partir de um pêndulo simples. Este, quando adequadamente acoplado a uma estrutura para medir a aceleração, apresenta um deslocamento angular proporcional à aceleração momentânea sofrida.

Já na perspectiva de Eler Filho (2014), os acelerômetros podem ser compreendidos como um transdutor massa-mola inserido em seu conjunto constituído por uma massa de reação, com peso conhecido e suspenso por uma estrutura fixa. No caso da aplicação de uma força em um corpo de estudo, a inércia proporciona ao corpo a tendência de ficar em repouso. Portanto, ao aplicar uma força proporcional à da estrutura fixa, causando um deslocamento, essa mesma força é proporcional à força aplicada e à aceleração do corpo. Desse modo, obtém-se a aceleração.

Koene, Klar e Vitalla (2020) determinam que os sistemas convencionais são baseados em acelerômetro piezoelétrico (PA) por oferecer alta precisão e taxa de amostragem. No entanto, seu alto custo o torna pouco atrativo para ser utilizado em um sistema. Assim, discute-se para este trabalho o uso dos acelerômetros MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*) que são uma boa alternativa devido ao baixo custo, baixo consumo de energia e uma boa precisão.

Acrescenta-se, também, outra visão de Koene; Klar e Vitalla (2020) de que os acelerômetros MEMS foram intensamente pesquisados e desenvolvidos para uso em dispositivos portáteis que são produzidos em massa, por exemplo, smartphones, tablets e relógios inteligentes. Esse desenvolvimento não apenas diminuiu as dimensões e os custos unitários, mas também estimulou o desenvolvimento de acelerômetros MEMS com precisão e largura de banda cada vez maiores.

Na concepção de Figueiredo *et al.* (2009) *apud* Eler Filho (2014)

Esta tecnologia explora as propriedades mecânicas do silicone, criando estruturas móveis possibilitando, no caso dos acelerômetros, a medição de

vibração em direções distintas. O sensor MEMS de um acelerômetro linear baseia-se numa estrutura de silicone, com interdigitações com partes fixas e móveis. A aceleração é então obtida pela leitura das variações dos espaçamentos entre estas ranhuras, que variam de acordo com o movimento. Estes sensores convertem então estes sinais para um sinal analógico e/ou digital.

Assim, observam-se as vantagens obtidas pelos acelerômetros do tipo MEMS, os quais são de pequenas dimensões, de baixo consumo de energia, de boa precisão na coleta da aceleração e de alta taxa de amostragem, assim sendo de grande importância no desenvolvimento deste trabalho.

2.1.3 Sistema embarcado

Neste tópico, discorre-se sobre o sistema embarcado com base nos estudos de Santos, De campos-velho e Chiwiacowsky (2006), o qual afirma que um sistema embarcado é um sistema de computação integrado a outro produto ou a outro sistema. O sistema embarcado é projetado para realizar uma tarefa específica ou conjunto de tarefas em combinação com o produto ou sistema em que está incorporado.

Sabe-se que os sistemas embarcados são amplamente utilizados em muitos dispositivos, como aparelhos eletrônicos, automóveis, sistemas de controle industrial, equipamentos médicos, dispositivos de áudio e vídeo, dentre outros. Eles têm a vantagem de serem compactos, eficientes e de baixo custo, além de serem programáveis para atender aos requisitos específicos de cada aplicação.

Neste estudo, o acelerômetro, citado anteriormente, um microcontrolador e um transmissor sem fio formam o denominado sistema embarcado que irá captar e transmitir as vibrações emitidas pela estrutura a ser avaliada. A seguir, com base em estudos da área de sistemas embarcados, de Silva e Minhoni(2022) e de Agnol (2018), será abordado o componente fundamental para o processamento das vibrações captadas pelo sensor, os Microcontroladores.

2.1.3.1 Microcontroladores

De acordo com Silva e Minhoni (2022), microcontroladores são pequenos sistemas embarcados que incluem um processador, memória, entrada/saída (I/O) e periféricos, como módulos de temporização e conversores A/D, em uma única unidade de silício. Eles são amplamente utilizados em aplicações de controle, de automação e de sistemas embarcados,

2.1.3.2 O microcontrolador PIC

Segundo Souza (2003), PIC é a sigla para Peripheral Interface Controller e é uma família de microcontroladores fabricados pela Microchip Technology. São projetados para aplicações de controle e automação e são amplamente utilizados em muitos dispositivos eletrônicos, incluindo brinquedos, aparelhos de áudio e vídeo, automóveis, sistemas de segurança, etc..

Ainda conforme o autor supracitado, os microcontroladores PIC são conhecidos por serem de fácil utilização, de baixo custo e eficientes, tornando-os uma ótima escolha para desenvolvimento de projetos. Eles possuem uma ampla gama de periféricos integrados, incluindo conversores analógicos digitais ou ADCs (Analog Digital Converter), conversores digitais analógicos ou DACs (Digital Analog Converter), temporizadores, comunicação serial, dentre outros, que podem ser utilizados para implementar várias funções, como a de um relógio programado por um timer interno. Eles também possuem várias opções de memória (FLASH, EEPROM e RAM) que são abordadas a seguir.

Sobre a programação dos microcontroladores PIC é possível constatar o uso de linguagens de programação de alto nível, como C e C++. Além disso, existem muitas ferramentas de desenvolvimento de *software* disponíveis, incluindo compiladores, emuladores e ambientes de desenvolvimento integrado, que ajudam a simplificar o processo de desenvolvimento.

As especificações de um PIC variam de acordo com o modelo específico. Algumas das características comuns incluem:

- **Processador:** A maioria dos PICs é baseada em microprocessadores de 8 bits com arquitetura Harvard, oferecendo um equilíbrio entre desempenho e eficiência de energia;
- **Memória:** Alguns PICs possuem memória FLASH programável para armazenar o código, memória EEPROM para armazenar dados não voláteis e memória RAM para armazenar variáveis e dados temporários. A quantidade de memória disponível varia de acordo com o modelo;
- **Comunicação:** Vários PICs possuem interfaces de comunicação, como USB, UART, I2C, SPI, entre outras, que permitem a conexão com outros dispositivos e a transferência de dados;

- Periféricos integrados: Muitos PICs possuem uma ampla gama de periféricos integrados, incluindo conversores analógicos-digitais (ADCs), temporizadores, PWM, entre outros;
- Frequência de clock: A frequência de clock varia de acordo com o modelo, mas geralmente varia de 4 MHz a 80 MHz;
- Alimentação: A tensão de alimentação varia de acordo com o modelo, mas geralmente é de 3,3V ou 5V. Alguns PICs também possuem recursos de proteção contra sobretensão e curto-circuito;
- Pinagem: A quantidade de pinos varia de acordo com o modelo, mas geralmente está na faixa de 14 a 40 pinos, incluindo pinos de entrada/saída, alimentação, comunicação e outros pinos para acesso aos periféricos integrados (SOUZA, 2003).

2.2 Sistemas de Monitoramento de Vibração sem fio aplicados a pontes

Segundo Engst e Flsieshman (2005), “A palavra *wireless* significa sem fio, ou seja, são redes cujos cabos são substituídos por ondas de rádio. Sua utilização é muito simples, assim como sua instalação, o que proporciona seu crescente uso nos dias de hoje”.

Ainda de acordo com os autores, “Uma rede *wireless* é reconhecida por ser sem fio, pois o transmissor e o receptor estão se comunicando sem a presença de fios, no nosso caso, por ondas de rádio”.

Nos Estados Unidos, foram instaladas pontes de grande vão localizadas em regiões de conhecida alta sismicidade com sistemas permanentes de monitoramento estrutural. Tais sistemas são baseados em gatilho e registram as vibrações da ponte durante tremores do solo desde o nível mais moderado até o mais severo. Essas pontes de grandes vãos precisam de bons sistemas de monitoramento de vibrações, sobretudo dos tipos em que se utilizam de comunicação sem fio, já que as redes com fio precisam de muitos cabos coaxiais, sendo bem mais caros e de difícil instalação (Kurata *et al.* 2013),

Ainda com o estudo de Kurata *et al.* (2013), a tecnologia *wireless* é possível haver o monitoramento de grandes estruturas em quaisquer locais, inclusive naqueles remotos, como em grandes pontes, onde sistemas cabeados se tornam mais complexos devido a motivos já ditos. Ainda, é importante ressaltar que, com o uso dessas redes cabeadas, há o risco de deterioração devido às intempéries ao longo do tempo, além do alto custo de instalação e o grande consumo de energia. Assim, a comunicação sem fio tem vantagens, por exemplo, de se

poder utilizar *hardwares* de baixo custo, de se realizar simples manutenção e com economia de energia, mas, por outro lado, perde em segurança, isto é, pode ocorrer perda no envio dos pacotes de dados, faltando assim, informações fundamentais entre o receptor e o transmissor. Acrescenta-se, também, o fato de haver baixa velocidade de transmissão de dados do sistema sem fio em relação ao cabeado.

Assim, pode se observar pelas Figuras 2 e 3, a ponte de Carquinez na Califórnia e o nó sensor instalado na parte de baixo de sua estrutura o que demonstra as vantagens que podem ser obtidas sem os sistemas tradicionais com cabeamento.

Figura 2 - Vista da ponte Carquinez de Crockett, Califórnia.



Fonte: KURATA *et al.*, 2013.

Figura 3 - Nó sensor wireless instalado na superfície inferior da ponte.



Fonte: KURATA *et al.*, 2013.

Com a necessidade de se utilizar comunicação sem fio, diversas empresas aderiram essa tecnologia. Portanto, com as vastas alternativas sem fio, surgiram grandes números de protocolos que, posteriormente, tiveram de ser padronizados.

Com isso, segundo Eler Filho (2014), a IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) organizou o desenvolvimento de um protocolo padrão para a comunicação sem fio, proporcionando, assim, a retificação do problema da comunicação entre produtos de diferentes fabricantes. Denominado padrão IEEE 802.11, esse foi desenvolvido pelo grupo citado anteriormente que considerou a existência de quatro grandes grupos de redes sem fio, desse modo, o foco será a chamada WPAN.

Conforme o estudo do autor referenciado, a WPAN ou *Wireless Personal Area Network*, é uma tecnologia de comunicação sem fio com alcance de 10 a 100 metros, sendo considerada de pequena cobertura. Nela, se enquadram a WiFi (IEEE 802.11b/g) que são as redes mais estudadas e disponíveis no mercado e com grandes aplicações em todo o mundo. Além dessas, existe também tecnologias como o Bluetooth e Zig Bee que possuem seus próprios subgrupos definidos como padrão IEEE 802.15.1 e IEEE 802.15.4, respectivamente.

Para este trabalho, foram consideradas a velocidade de transmissão de dados e a distância alcançada para se ter a melhor eficácia na aplicação ao utilizar módulos XBee que será conceituado a frente. Acerca disso, pode-se observar o Quadro 1 a seguir.

Quadro 1 – Comparativo de redes

Item	Characteristic	Bluetooth	Zigbee	WiFi
1	Data rate	3 Mbps	250 Kbps	200Mbps
2	Range	1-10m, O-100m	1-100m, O-400m	1-32m, O-95m
3	Number of device	8/piconet	56,000	15-20
4	Reliability, availability and resilience	Medium, 2/3 FEC	High, CSMA-CA	Very high, 3/4 FEC
5	Network access and throughput	3s Sleep 2msec	15 msec Sleep 15 msec	No sleep mode
6	Security	128-AES	128-AES	WEP-2
7	Battery life	Days	Years	Short life
8	Network topology	Star	Mesh	Star
9	MAC	79 FHSS	DSSS	DSSS/FHSS
10	Operating frequency	2.4GHz	868/915/2.4GHz	2.4x GHz
11	Complexity	High	Low	Very high
12	Scalability	Below average	High	Low
13	Flexibility	Medium	Above average	Low

Fonte: SHEIKH e AL-MOELLAM, 2011.

2.2.1 IEEE 802.15.4

Segundo Ramos (2013), o IEEE 802.15.4 é um padrão para comunicação sem fio criado pelo IEEE, que visa ao crescimento e à interoperabilidade de tecnologias existentes e aquelas que poderão existir.

Desse modo, as redes padronizadas IEEE 802.15.4 são desenvolvidas para comunicação sem fio com baixa taxa de transmissão para dispositivos de baixa complexidade e com baterias de longa duração, com autonomia para vários meses ou múltiplos anos.

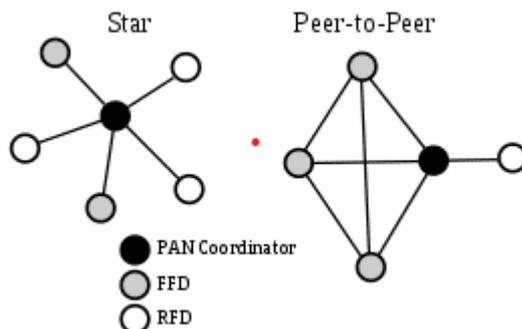
Conforme Ramos (2013), o padrão IEEE 802.15.4 suporta taxas de transmissão de 10kbps até 1Mbps, em faixas de frequência de 169 MHz a 2450MHz. Das três frequências estabelecidas pela ISM, somente a de 2450 MHz pode operar em todo o mundo. Assim, a frequência de 869 MHz é utilizada na Europa, e a 915 MHz é usada tanto na América do Norte como na do Sul. Sobre as distâncias de transmissão, essas variam de 10m a 1Km.

Ainda, o padrão IEEE 802.15.4 define apenas a camada física e a camada de acesso ao meio (MAC). A camada física é responsável por transmitir e receber dados do meio externo e adequá-los para enviar à camada de controle e acesso ao meio (MAC). Nessa camada, técnicas de modulação de sinal são utilizadas para transmitir e demodular o canal. Já a camada de acesso ao meio (MAC), é responsável por toda operação que envolve o canal físico de comunicação fazendo conexão confiável entre duas entidades MAC, segurança dos dispositivos, geração de *beacon*, dentre outros.

2.2.1.1 Topologia de rede

De acordo com Ramos (2013), o padrão IEEE 802.15.4 opera em duas topologias de rede, que são estrela e ponto a ponto ilustrado na Figura 4. A topologia estrela utiliza um nó central com o qual todos os outros nós da rede se comunicam. No caso da topologia ponto a ponto, essa permite que todos os nós se comuniquem diretamente entre si, respeitando o tipo do dispositivo em questão.

Figura 4 – Topologias do padrão IEEE 802.15.4.



Fonte: MELO (2017).

2.2.1.2 Tipos e papéis do IEEE 802.15.4

Dois tipos de dispositivos participam deste padrão, FFD (*Full Feature Device*) e o RFD (*Reduce Feature Device*). O RFD possui uma pilha de tarefas reduzidas, por isso não apresenta a função de rotear dados, e só pode se comunicar com os dispositivos FFD. Já o FFD, possui uma ampla gama de tarefas em uma rede e pode rotear dados, formar redes e se comunicar com os dispositivos RFD.

Quadro 2 – Funcionalidade dos dispositivos

Dispositivo	Tipo de dispositivo físico associado (IEEE 802.15.4)	Função
<i>Coordinator</i>	FFD	Forma a rede, atribui endereços, suporta binding table. Existe apenas um por rede.
Router	FFD	Permite que mais nós se juntem à rede, ao aumentar o seu alcance físico. Pode também efetuar funções de controle ou monitorização. A sua existência é opcional.
<i>Endpoint</i>	RFD	Efetua ação de controle ou monitorização por meio de dispositivo que lhe esteja associado (sensor, controlador, atuador ...)

Fonte: Elaborado com base em SINEM, 2004 *apud* FEITOSA JÚNIOR, FRANCISCO e TREVISANI (2013).

Conhecendo o padrão, IEEE 802.15.4, pode-se utilizar o XBee para a transmissão e a recepção de dados via radiofrequência usando a camada de controle de acesso ao meio (MAC) e a camada física. A seguir são apresentados conceitos sobre o XBee.

2.2.1.3 Módulos Xbee no padrão IEEE 802.15.4

Os dispositivos XBees são módulos de controle de Radiofrequência que suportam padrões de comunicação sem fio e conexão com dispositivos, sensores e atuadores. É uma marca de módulos de comunicação sem fio de baixa potência usados para várias aplicações, como monitoramento remoto, sistemas de controle e redes de sensores sem fio.

Os módulos XBee são fabricados pela Digi International e podem se comunicar uns com os outros e com outros dispositivos habilitados para Zigbee em uma rede usando uma topologia de rede mesh, onde vários nós podem retransmitir mensagens para estender o alcance da rede. Neste estudo, utiliza-se o XBee contendo em seu *firmware* o protocolo IEEE 802.15.4.

Neste estudo, também, conforme explicitado anteriormente, será abordada a topologia ponto a ponto do protocolo IEEE 802.15.4, cujos dispositivos comunicam entre si, transmitindo e recebendo via radiofrequência. É importante salientar que essa topologia é utilizada, principalmente, em redes de pouca complexidade, como no caso deste trabalho.

2.3 Processamento de sinais no Monitoramento de Saúde Estrutural

Há muito tempo, desenvolvem-se muitos estudos e trabalhos para a elaboração de modelos de processamento de sinais obtidos por meio de diversos sensores. O processamento de sinais é uma área da computação que envolve a manipulação, a análise e a interpretação de sinais, que podem ser gerados por uma variedade de fontes, como sensores, dispositivos de comunicação ou processos físicos.

Conforme KURATA et al., (2013), a identificação e o monitoramento de estruturas civis se realizam por diversos métodos, como no caso do Monitoramento de Saúde Estrutural que podem utilizar a análise da resposta vibratória do sistema por meio do uso de acelerômetros. Assim, é possível obter os padrões de vibração de uma estrutura e definir como ela se comporta diante de um impacto. Desse modo, a Transformada Rápida de Fourier é um modelo amplamente disseminado no estudo de estruturas na tentativa de validar o sistema sem fio para obter a função da resposta no domínio da frequência. A seguir será apresentada a importância da Frequência na análise de estruturas.

2.3.1 Frequência na análise de estruturas

Considera-se, neste estudo, a frequência como sendo uma medida da repetição periódica de um evento ou sinal ao longo do tempo. É, geralmente, medida em Hertz (Hz), isto

é, um Hertz representa uma oscilação por segundo, que é a unidade de frequência no Sistema Internacional de Unidades (SI).

Cabe ressaltar que a frequência é uma medida importante em muitas ciências, incluindo a Engenharia, sendo usada para avaliar a dinâmica de sistemas, como estruturas, máquinas e veículos. Conforme Lynch e Loh (2006), a frequência pode ser usada para descrever a velocidade de rotação de um motor, a oscilação de uma mola em relação ao tempo ou de vibração de uma estrutura num certo tempo, por exemplo, de estruturas civis, como as pontes, objeto deste estudo.

Ainda com o autor citado anteriormente, no monitoramento de saúde estrutural, a frequência é usada para descrever a velocidade de vibração da estrutura. Portanto, a análise de sinais de vibração, por meio de frequências modais, conseqüentemente, permite identificar danos estruturais. No caso das frequências modais, essas são determinadas como sendo frequências naturais de vibração de uma estrutura. Cada estrutura tem suas próprias frequências modais que são determinadas pelos aspectos de tamanho, forma, material e condição de carga da estrutura.

Acrescenta-se uma ponderação a respeito de as frequências modais serem importantes porque podem ser usadas para entender a dinâmica da estrutura, além de serem sinais para a identificação de falhas, como rupturas, sobretensões, dilatações e possíveis quedas.

Por sua vez, com base em Abdulkarem *et al.* (2020), a determinação das frequências modais para uma estrutura, por exemplo, pontes, pode ser feita por meio de testes experimentais bem como por análises teóricas. Em geral, os testes experimentais envolvem dois aspectos, primeiro, a aplicação de excitações controladas na estrutura e, depois, a medição das respostas vibratórias. Isso posto, conclui-se, o fato de as vibrações serem utilizadas para identificar frequências modais em estruturas.

Reiterando, a análise de frequências modais é uma importante atividade para o Monitoramento de Saúde Estrutural, a qual proporciona dados para uma ação preventiva e até mesmo corretiva.

2.3.2 Transformada Rápida de Fourier

A Transformada Rápida de Fourier (FFT – Fast Fourier Transform) é definida como sendo um algoritmo matemático que permite a transformação de uma série de dados de tempo em uma representação de frequência. Com base nos fundamentos de frequência e de frequências

modais, a FFT pode ser usada como uma ferramenta para analisar as vibrações conseguindo identificar as frequências modais de uma estrutura (FERNANDES, 2020).

Além disso, Eler Filho (2014) afirma que

[...] esse método é representado como uma forma mais rápida de se executar a DFT (Discrete Fourier Transform), ou Transformada Discreta de Fourier. A DFT é utilizada para se realizar a transformada de Fourier em sistemas discretos, ou seja, onde a amostragem é feita de forma digital. Basicamente, a transformada de Fourier visa transformar uma amostragem no domínio do tempo apresentado sua variação com relação à frequência. Esta transformada baseia-se na série de Fourier descoberta por Jean Baptiste Joseph Fourier no início do século 19. A série de Fourier diz que qualquer função periódica, independentemente de sua complexidade, pode ser representada pela soma de várias funções seno e cosseno com amplitude, fases e períodos determinados.

Ainda com Eler Filho (2014), em se tratando de uso, a DFT é mais complexa e demanda maior quantidade de processamento de máquina para que seu cálculo seja realizado, assim a FFT é utilizada por ser um cálculo simplificado da DFT. No monitoramento de saúde estrutural, a FFT é usada para analisar sinais de vibração e transformá-los em uma representação de frequência. Isso permite identificar as frequências de vibração mais significativas e determinar a intensidade de cada frequência.

Vale ressaltar que, de acordo com o teorema de amostragem de Nyquist-Shannon é possível obter, de forma confiável, apenas informações sobre as frequências menores do que $F_s/2$, onde F_s é a frequência de amostragem do sinal. Assim, se esse teorema não for respeitado, pode haver imperfeições no sinal analisado (FERNANDES, 2020 *apud* BAZAN, 2015; TOLEDO JÚNIOR, 2018).

Neste estudo, é utilizada a FFT que transforma um conjunto de amostras de aceleração obtida pelo sistema desenvolvido, no domínio do tempo para o domínio da frequência, com a vantagem de precisar de um menor poder computacional. Com isso, pode-se comparar a resposta da FFT com as respostas esperadas pelos cálculos teóricos baseados nas especificações da estrutura, e verificar a possibilidade de danos estruturais com a mudança das frequências no espectro.

3. DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo são desenvolvidas as perspectivas a respeito de conceitos explicitados na revisão bibliográfica deste trabalho. Sabe-se que é necessária a aquisição das vibrações e a determinação das taxas de amostragem pelo novo sistema embarcado desenvolvido. Para isso, o sistema foi utilizado para realizar a captação da vibração de uma viga biapoiada com frequências modais previamente conhecidas. Além disso, o novo sistema transmite via radiofrequência as vibrações que são analisadas em um programa computacional.

Os parâmetros – vibrações e a taxa de amostragem – utilizados no processamento de dados realizados pelo computador foram obtidos por meio de um choque externo em uma barra que se move, permitindo um movimento oscilatório em um período de tempo conhecido. Assim, o novo sistema desenvolvido irá contar com um acelerômetro, um microcontrolador e, por fim, um transmissor de dados sem fio.

Conforme a necessidade do novo sistema de monitoramento de vibrações de uma estrutura, a seguir foram apresentados os componentes específicos para a aplicação.

3.1 Materiais

Os *hardwares* e *softwares* são partes fundamentais para o desenvolvimento do novo sistema. O *hardware* é a parte física de dispositivos eletrônicos. Assim, o *hardware* do sistema desenvolvido, que neste estudo também é chamado de nó sensor, mediu vibrações por meio de um acelerômetro, processa os dados de aceleração por meio de um microcontrolador e transmite esses dados por meio de um módulo de radiofrequência, respectivamente, utilizando um acelerômetro MPU-6050, um microcontrolador PIC18F2550 e um módulo XBee PRO S2. Além disso, foi utilizado um microcomputador para obter e processar os sinais captados pelo nó sensor.

Em se tratando dos *softwares*, esses consistem em um conjunto de instruções ou programas que são executados em um computador ou dispositivo eletrônico, que permitem a execução de tarefas e as operações específicas. Portanto, neste trabalho, os *softwares* são utilizados para programar e gravar o programa no PIC18F2550, programar a comunicação no módulo XBee e programar no computador o processamento de dados para a análise. Os softwares utilizados são, respectivamente, o MPLAB, o XCTU e o MATLAB. Em seguida, serão apresentadas as partes fundamentais para o desenvolvimento do novo sistema.

3.1.1 Hardware

Nesta subsecção é feita a descrição dos *hardwares* utilizados para o desenvolvimento do sistema de monitoramento de vibrações, bem como suas especificações e funcionalidades.

3.1.1.1 MPU-6050

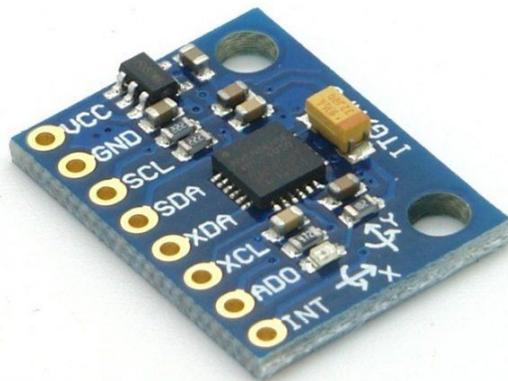
De acordo com a plataforma da empresa Arduino, a definição da GY-521 como sendo uma placa que tem um acelerômetro MEMS MPU-6050 integrado a ela mesma possuindo todo o circuito necessário para seu funcionamento. É usada para mensurar a aceleração proveniente das vibrações emitidas por uma estrutura. A placa GY-521 é ilustrada na Figura 5.

Ainda com base na plataforma da empresa Arduino, o MPU-6050 é um circuito integrado que combina um acelerômetro e um giroscópio de três eixos (x, y e z) a um processador digital de movimento, além de um sensor de temperatura integrado.

As principais especificações do MPU-6050, segundo a Arduino são:

- Acelerômetro de três eixos com saída digital e com uma faixa de medição programável de $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$;
- Um conversor analógico-digital de 16 bits integrado;
- Corrente operacional normal de $500\mu A$;
- Modo de baixo consumo de corrente: $10\mu A$ a 1.25Hz, $20\mu A$ a 5Hz, $60\mu A$ a 20Hz, $110\mu A$ a 40Hz;
- Detecção da orientação com uma sinalização automática.

Figura 5 – Placa GY-521 com MPU-6050 integrado.



Fonte: Plataforma da empresa Arduino.

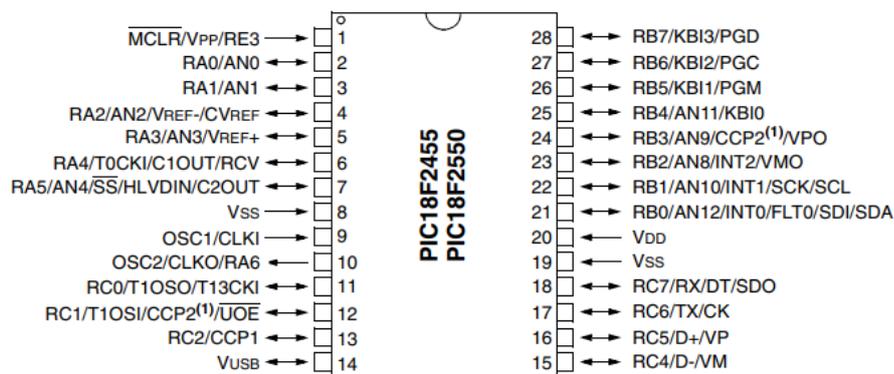
3.1.1.2 Microcontrolador PIC18F2550

Conforme o manual da Microchip Technology Inc (2006), o PIC 18F2550 é um microprocessador de alto desempenho, desenvolvido pela Microchip Inc.©, com a capacidade de interface com um computador por meio de uma comunicação serial via porta USB, além da tradicional interface padrão ICSP (para programação em protoboards). Sua programação pode ser realizada com as linguagens Assembly ou C.

Ainda segundo o manual da Microchip Technology Inc. (2006), as especificações técnicas do PIC 18F2550 incluem:

- **Processador:** O PIC 18F2550 é baseado em um microprocessador de 8 bits com arquitetura Harvard;
- **Memória:** Possui 32 KB de memória flash programável para armazenar o código e 2 KB de EEPROM para armazenar dados não voláteis. Além disso, ele possui 1 KB de RAM para armazenar variáveis e dados temporários;
- **Comunicação USB:** O PIC 18F2550 possui uma interface USB integrada, permitindo que ele seja conectado diretamente a um computador para transferência de dados e programação;
- **Periféricos integrados:** Possui uma ampla gama de periféricos integrados, incluindo conversores analógicos-digitais (ADCs), temporizadores, comunicação serial (UART, I2C e SPI), entre outros;
- **Frequência de clock:** Máxima de 48 MHz, permitindo uma grande quantidade de processamento por segundo;
- **Alimentação:** O PIC 18F2550 é alimentado com uma tensão de 5 volts e possui recursos de proteção contra sobretensão e curto-circuito;
- **Pinagem:** Possui 28 pinos, incluindo pinos de entrada/saída, alimentação, comunicação e outros pinos para acesso aos periféricos integrados, conforme a Figura 6 que mostra o diagrama de pinos para o PIC18F2550;
- **Seus terminais** são agrupados em 4 “portas”, identificadas pelas letras A, B, C e E.

Figura 6 – Diagrama de pinos.



Fonte: Manual da Microchip Technology Inc.© (2006).

3.1.1.3 Módulos XBee-PRO

O XBee é um módulo de transmissão de dados que se utiliza do protocolo ZigBee já embarcado no microcontrolador, possuindo uma boa área de comunicação e abrangência. Esse módulo foi desenvolvido pela empresa ©Digi International Inc., fabricante de dispositivos de comunicação sem fio e fundada em 1985.

A empresa possui dois modelos básicos: o XBee e o XBee Pro. Sobre as funcionalidades e as características desses modelos, pode-se afirmar que há muitas semelhanças, mas diferenciam-se pela potência de transmissão, que se faz maior no XBee Pro S2. Segundo o manual da empresa ©Digi International Inc. as especificações do XBee Pro S2:

- Frequência: 2,4 GHz ou 900 MHz;
- Alcance: Até 1600 m em áreas externas;
- Taxa de transmissão: Até 250 Kbps;
- Fonte de alimentação: 3,0 a 3,4 Volts;
- Interface: Serial UART, SPI ou I2C;
- Corrente na recepção: 55 mA;
- Criptografia: criptografia AES-128;
- Firmware atualizável: Sim;
- Temperatura de operação: -40°C a +85°C.

Neste trabalho é utilizado um XBee Pro que recebe os dados, conectado a um computador, e um segundo XBee Pro acoplado no sistema embarcado, utilizando um arranjo do tipo ponto a ponto, enviando os dados captados.

3.1.1.4 PICKit 2

O PICKit2 é uma ferramenta de desenvolvimento de baixo custo com uma interface fácil de usar para programação e depuração de famílias da Microchip de microcontroladores. Ele é composto por uma interface USB e um adaptador de socket para conectar o microcontrolador ao computador. Com o PICKit 2, é possível programar e depurar o PIC usando o *software* MPLAB da empresa Microchip Technology. Logo, neste trabalho, é utilizado o PICKit 2 para a gravação do arquivo com extensão do tipo .hex desenvolvido no MPLAB.

3.1.2 Software utilizados

Nesta subseção, pode se observar os *softwares* a serem utilizados para o sistema de monitoramento de vibrações, no qual tem o objetivo a configuração dos parâmetros para o bom funcionamento dos *hardwares* utilizados, e o processamento dos dados lidos pelo nó sensor desenvolvido. Assim, podendo analisar as dinâmicas estruturais.

3.1.2.1 Processamento de dados no MATLAB

Por meio do *software* MATLAB, é desenvolvido um programa com o objetivo de processar os dados obtidos pelas vibrações, criando um ambiente agradável ao observador humano por meio da visualização de gráficos. Sendo mais específico, o dado que é recebido pelo XBee acoplado no computador é importado para o MATLAB acarretando duas situações. A primeira diz respeito à geração imediata de um gráfico no domínio do tempo, já a segunda refere-se à aplicação do cálculo da Transformada Rápida de Fourier (FFT), o que, conseqüentemente, gera um gráfico no domínio da frequência.

3.1.2.2 MPLAB

O MPLAB é um *software* com um ambiente de desenvolvimento integrado (do inglês, IDE - *Integrated Development Environment*) e disponibilizado pela empresa Microchip Technology Inc. . O MPLAB permite ao código ser escrito, compilado, simulado, depurado, em tempo real, além de possibilitar a gravação do código em microcontroladores PIC da Microchip.

Esse *software* é usado no projeto para construir um código programado em C, utilizando as bibliotecas já disponíveis e desenvolvendo as configurações necessárias para o

bom funcionamento do PIC. Esse código gera um arquivo com extensão do tipo .hex que, em seguida, é gravado no microcontrolador PIC18F2550 por intermédio do PICKit 2.

3.1.2.3 XCTU

Segundo o *site* da Digi.com, XCTU é uma ferramenta de *software* desenvolvida pela Digi International que é usada para configurar, testar e solucionar problemas de dispositivos de comunicação sem fio da Digi. Esses dispositivos incluem Zigbee, 802.15.4 e outros módulos e *gateways* sem fio.

Ainda com o *site*, o XCTU fornece uma interface gráfica amigável que permite aos usuários configurar facilmente vários parâmetros para seus dispositivos sem fio, como de rede, de segurança e atualizações de *firmware*. Ele também oferece uma variedade de ferramentas de diagnóstico e de teste que ajudam os usuários a solucionar problemas com seus dispositivos, incluindo a intensidade do sinal, a taxa de erro de pacotes e a descoberta de rede.

Para este trabalho, o programa XCTU é utilizado na configuração dos módulos XBee para a transmissão e a recepção dos dados utilizando a topologia ponto a ponto, sendo um configurado como *Coordinator*, e o outro *End Device*. Seguidamente, será apresentada a configuração dos módulos.

3.2 Metodologia

Neste Trabalho de Conclusão de Curso são apresentados os conceitos do Monitoramento de Saúde Estrutural dentre outros estudos que compreenderam o trabalho e como andam suas pesquisas e avanços. Cabe ressaltar que não é objetivo a reprodução de tais conceitos, apenas, mas ir além desenvolvendo um sistema que pode ser usado para monitorar as vibrações dessas estruturas.

Na sequência, foi realizado o estudo das propriedades dos componentes empregados no sistema *wireless* já proposto;

A seguir, é implementado o protótipo deste sistema sem fio para o monitoramento de vibrações de uma estrutura, composto por uma unidade de aquisição/transmissão de dados, ou nó sensor, que fazem a leitura da vibração utilizando o acelerômetro MPU-6050, microcontrolador PIC18F2550 e dois módulos XBee Pro S2 para comunicação via radiofrequência. Na próxima etapa, faz-se a validação do sistema sem fio, nos quais se integram

três componentes, compreendendo: subsistemas de aquisição de dados, comunicação sem fio e algoritmos embutidos em um computador.

Para isso, deve-se captar dados pelo nó sensor que contém o sensor acelerômetro instalados em uma estrutura e enviá-los por meio de comunicação sem fio para um computador, que realiza o processamento dos dados por meio do MATLAB utilizando o algoritmo contendo o cálculo da Transformada Rápida de Fourier que transforma do domínio do tempo para o domínio da frequência. Com esse sistema, é possível analisar, por meio de gráficos no domínio da frequência, os modos da frequência de vibração, podendo analisar a integridade estrutural. Além da comparação dos resultados com o estudo de Eler Filho (2014).

O nó sensor é instalado em uma estrutura que é utilizada para o ensaio de testes. Compreendendo por uma viga biapoiada, utilizando dois bancos maciços de madeira e duas barras pequenas para apoiar bem a viga.

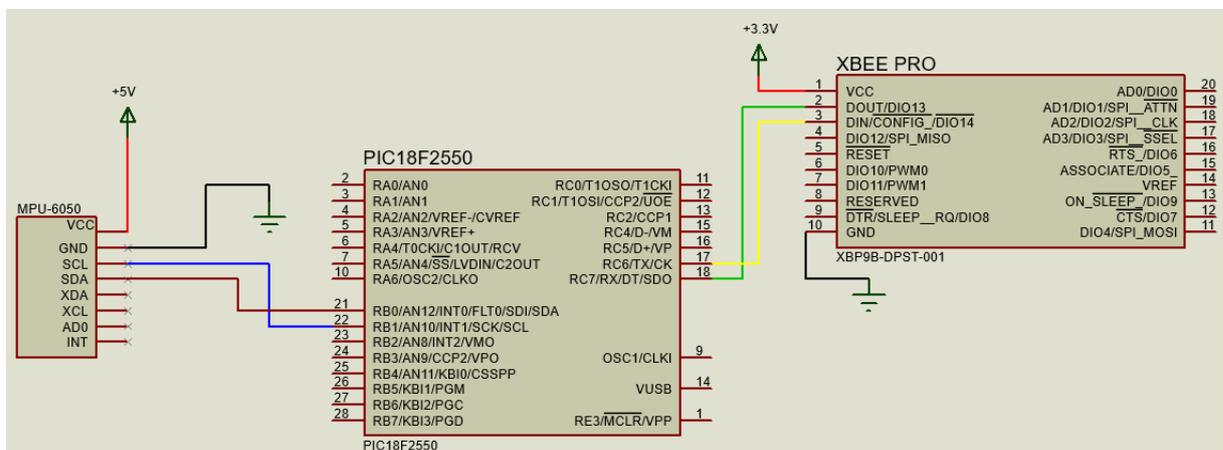
3.3 Desenvolvimento do nó sensor utilizando o PIC18F2550

Para a elaboração do nó sensor, elencam-se os materiais, respectivamente:

1. Uma placa MPU-6050;
2. Um módulo XBee Pro;
3. Um PIC18F2550;
4. Uma fonte de 5 volts;
5. Uma protoboard;
6. Fios variados para ligação dos componentes.

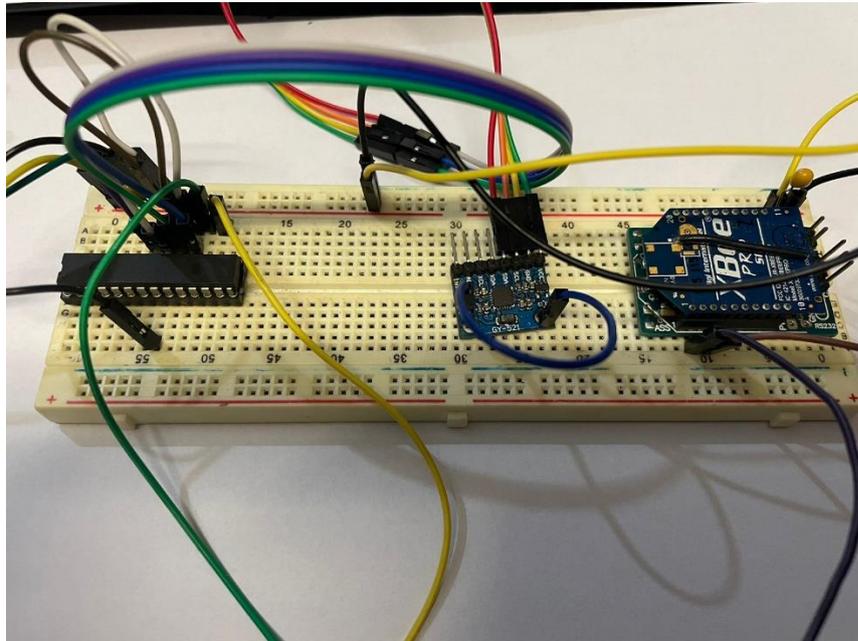
A seguir, a título de ilustração, apresentam-se Figuras 7 e 8, o circuito de um nó sensor e o circuito real montado em uma Protoboard, respectivamente.

Figura 7 – Novo protótipo do nó sensor com seus componentes desenvolvido no PROTEUS.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 8 – Montagem do circuito utilizando para o nó sensor em uma Protoboard.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.4 Desenvolvimento da programação para o microcontrolador PIC18F2550

Nesta subseção, é apresentado a programação para o microcontrolador PIC 18F2550 depurado e escrito a partir do *software* MPLAB. Com esse microcontrolador, será possível a aquisição e transmissão dos dados lidos pelo acelerômetro MPU-6050.

3.4.1 Programando as rotinas no MPLAB:

Após baixado o programa MPLAB, e o inicializar, são inclusas algumas bibliotecas que precisam de configuração para os registradores serem utilizados corretamente. Assim, é preciso atentar-se para o protocolo I2C (Inter-Integrated Circuit) utilizado para comunicação serial do microcontrolador e o MPU-6050.

Primeiramente, o protocolo I2C utiliza dois canais de comunicação serial, sendo um para transmissão e recepção de dados, chamado de *Serial Data* (SDA) ou canal de dados seriais e o outro para sincronização da transmissão e recepção dos dados, chamado *Serial Clock* (SCL) que sincroniza os dispositivos a cada vez que o clock apresentar um certo estado.

Logo, as bibliotecas “I2C.c” e “I2C.h” são utilizadas para iniciar a comunicação I2C do MPU-6050 para a captação dos dados de vibração. As funções criadas nas bibliotecas citadas anteriormente formam um conjunto de instruções que são fundamentais para o

funcionamento da comunicação I2C. A seguir, pode-se verificar as funções disponibilizadas da biblioteca “I2C.h” por meio da visualização do Quadro 3.

Quadro 3 – Funções para a comunicação I2C.

Funções da biblioteca	Função do tipo
I2C_Init_Master	void
I2C_Start	void
I2C_Stop	void
I2C_Restart	void
I2C_Ack	void
I2C_Nack	void
I2C_Read	unsigned char
I2C_Write	void

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na função principal, utiliza-se a função I2C_Init_Master escolhendo o parâmetro I2C_100KHZ que inicializa a comunicação com 100kHz de velocidade. Pode-se notar na Figura 9 a função sendo empregada na biblioteca “I2C.c” com alguns dos registradores endereçados que são necessários para validar a comunicação I2C.

Figura 9 – Função principal para utilizar a comunicação I2C.

```

9   void I2C_Init_Master(unsigned char sp_i2c)
10  {
11      TRIS_SCL = 1;
12      TRIS_SDA = 1;
13      SSPSTAT = sp_i2c;
14      SSPCON1 = 0x28;
15      SSPCON2 = 0x00;
16      if(sp_i2c == I2C_100KHZ){
17          SSPADD = 119;
18      }
19      else if(sp_i2c == I2C_400KHZ){
20          SSPADD = 29;
21      }
22  }

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para a utilização do MPU-6050, precisa-se do mapa de registro que é implementado na biblioteca “mpu6050.h”. Nesse mapa, encontram-se os registradores principais – de 8 bits –

a serem configurados conforme a exposição de especificações no manual da empresa ©InvenSense Inc. . Cabe salientar que para a leitura da aceleração do MPU-6050, o mapa de registro precisa estar configurado conforme o Quadro 4.

Quadro 4 – Mapa de registro configurados para a MPU-6050.

Registrador	Endereçamento
W_DATA	0xD0
R_DATA	0xD1
PWR_MGMT_1	0x6B
PWR_MGMT_2	0x6C
SMPRT_DIV	0x19
CONFIG_R	0x1A
GYRO_CONFIG	0x1B
ACCEL_CONFIG	0x1C
ACCEL_XOUT_H	0x3B
ACCEL_XOUT_L	0x3C
ACCEL_YOUT_H	0x3D
ACCEL_YOUT_L	0x3E
ACCEL_ZOUT_H	0x3F
ACCEL_ZOUT_L	0x40
TEMP_OUT_H	0x41
TEMP_OUT_L	0x42
GYRO_XOUT_H	0x43
GYRO_XOUT_L	0x44
GYRO_YOUT_H	0x45
GYRO_YOUT_L	0x46
GYRO_ZOUT_H	0x47
GYRO_ZOUT_L	0x48

Fonte: elaborado pelo próprio autor com base no manual da empresa ©InvenSense Inc. .

Um dos parâmetros mais importantes para esse mapa de registro é o registrador denominado de ACCEL_CONFIG com seleção de valor de 0x1C para que o range fique de +2g a -2g. Além disso, para realizar a leitura da aceleração do eixo Z, foram os utilizados os registradores ACCEL_ZOUT_H e ACCEL_ZOUT_L. É importante salientar que o eixo Z é perpendicular à placa MPU-6050, sendo mais fácil para posicionar na estrutura a ser mensurada as vibrações. É importante, também, configurar o SMPRT_DIV para 0x19 com uma taxa de amostragem a 1kHz para deixar a velocidade de aquisição de dados da placa em máxima velocidade.

A outra biblioteca “mpu6050.c” disponibiliza as funções de inicialização, de leitura, de escrita e de obtenção das leituras do acelerômetro nos eixos x, y e z. No entanto, utilizam-se

somente as funções de inicialização e a função de captação da aceleração do eixo z do MPU-6050, conforme pode-se observar no Quadro 5 a seguir.

Quadro 5 – Funções utilizadas para MPU-6050.

Funções da biblioteca	Função do tipo
MPU6050_Init	void
MPU6050_Read	void
MPU6050_Write	void
MPU6050_Read_Az	void

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O código principal utiliza-se da função denominada MPU6050_Read_Az() que faz a leitura e conversão dos resultados a +/- 2g (10m/s²), sendo iniciada pela função MPU6050_Init() no programa principal “main”.

É utilizado, também, no programa principal, outras bibliotecas como a "serial.h" que estabelece funções para a porta serial Rx e Tx com o objetivo de transmitir e receber dados para o XBee S2Pro, utilizando-as em rotina “serial.c” que configura seus registradores para a comunicação e os pinos. No Quadro 6 é possível perceber essas funções.

Quadro 6 – Funções utilizadas para a comunicação serial.

Funções da biblioteca	Função do tipo
serial_init	void
serial_tx_str	void
serial_rx_str	char

Fonte: elaborado pelo próprio autor

A “serial_init()” é utilizada para inicialização da comunicação serial. A função “serial_tx_str()” é utilizada para enviar dados pela comunicação serial e a função “serial_rx_str()” recebe os dados pela serial. Lembrando que todos os dados são armazenados em strings, que são vetores de textos tipo char enviados ou recebidos pela serial.

Faz-se importante configurar a biblioteca "configbits.h" onde possibilita a realização de algumas alterações de prescaler, adicionando oscilador de 8MHz, desabilitando o *Watchdog Timer* e outras funções como é ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Biblioteca de configurações do PIC18F2550.

```
#pragma config PLLDIV = 1          // PLL Prescaler Selection bits (Divide by 5 (20 M
#pragma config CPUDIV = OSC1_PLL2 // System Clock Postscaler Selection bits ([Prima
#pragma config USBDIV = 1          // USB Clock Selection bit (used in Full-Speed USB

// CONFIG1H
#pragma config FOSC = INTOSC_HS    // Oscillator Selection bits (XT oscillator, PLL
#pragma config FCMEN = OFF         // Fail-Safe Clock Monitor Enable bit (Fail-Safe C
#pragma config IESO = ON           // Internal/External Oscillator Switchover bit (Os

// CONFIG2L
#pragma config PWRT = OFF          // Power-up Timer Enable bit (PWRT disabled)
#pragma config BOR = OFF           // Brown-out Reset Enable bits (Brown-out Reset di
#pragma config BORV = 3           // Brown-out Reset Voltage bits (Minimum setting 2
#pragma config VREGEN = OFF        // USB Voltage Regulator Enable bit (USB voltage r

// CONFIG2H
#pragma config WDT = OFF           // Watchdog Timer Enable bit (WDT disabled (contro
#pragma config WDTPS = 32768      // Watchdog Timer Postscale Select bits (1:32768)
```

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Após realizados todos esses passos, programa-se o código principal, o chamado “main” e são configuradas as entradas e saídas (IO) e as portas do PIC, bem como os parâmetros do registrador OSCCON (Oscillator Control Register) que selecionam a frequência de 8MHz. Tudo isso pode ser verificado por meio da Figura 11.

Figura 11 – Configuração das IOs e Portas no programa principal

```
23 //TRIS IO
24 TRISA = 0b00000000;
25 TRISB = 0b00000001;
26 TRISC = 0b10000000;
27 //PORT INIT
28 PORTA = 0;
29 PORTB = 0;
30 PORTC = 0;
31 //OSCCON config
32 OSCCONbits.IRCF0 = 1;
33 OSCCONbits.IRCF1 = 1;
34 OSCCONbits.IRCF2 = 1;
```

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Sabe-se que o “main” é responsável por captar a leitura do acelerômetro por meio das bibliotecas do MPU-6050 e da comunicação I2C e suas funções. Também, ocorre o envio das leituras do acelerômetro dentro de um *timer*, sendo transformadas em “string”, pela função `serial_tx_str()`. O *timer* foi implementado para garantir a amostragem dos dados em 38 milissegundos adicionados ao tempo gasto pela comunicação sem fio entre os XBee Pro, conforme observa-se na Figura 12.

Figura 12 – Código implementado para aquisição da aceleração no programa principal.

```
54 I2C_Init_Master(I2C_100KHZ); // Inicializa o protocolo I2C
55 MPU6050_Init(); // Inicializa o sensor MPU6050
56 // Lcd_Init(); // Inicializa o lcd
57 serial_init(); // Inicializa a serial
58 while(1)
59 {
60 CLRWDWT();
61 az = MPU6050_Read_Az(); // Leitura do eixo z do acelerometro
62 }
63 }
64 void __interrupt() ISR_TIMER0(void) {
65 if(INTCONbits.TMROIF == 1){
66 TMR0L = 6;
67 INTCONbits.TMROIF = 0;
68 cont++;
69 if (cont == 38 )
70 {
71 cont = 0;
72 sprintf(buffer_tx, "%6.3f\n",az);
73 serial_tx_str(buffer_tx);
74 }
75 }
76 }
```

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Retomando, a implementação do *timer* foi feita utilizando-se do modo temporizador em 8 bits com um prescaler de 1 para 8 (1:8) e TMR0L com valor de 6. Assim, a interrupção é

acionada a cada 1 milissegundo de acordo com as configurações estabelecidas. Os parâmetros configurados e relacionados aos registradores INTCON e T0CON são apresentados por meio do Quadro 7.

Quadro 7 – Biblioteca de configurações do PIC18F2550

Registrador	Parâmetro	Bit	valor	Função
INTCON	GIE	7	1	Interrupção global iniciada
INTCON	PEIE	6	1	Interrupção por periféricos
INTCON	TMR0IE	5	1	TMR0 habilitado
INTCON	TMR0IF	2	0	Estouro do TMR0
T0CON	TMR0ON	7	1	Habilita Timer0
T0CON	T08BIT	6	1	Timer de 8 bits
T0CON	PSA	3	0	Prescaler habilitado
T0CON	T0PS0	2	0	Valor do Prescaler
T0CON	T0PS1	1	1	Valor do Prescaler
T0CON	T0PS2	0	0	Valor do Prescaler

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Assim, tem-se o nó sensor fazendo a leitura do acelerômetro MPU-6050 para serem enviados para estação de tratamento dos dados. No próximo tópico, será apresentada a desenvolvimento da comunicação sem fio entre os XBee com o objetivo de transmitir os dados da leitura do nó sensor já programado.

3.5 Processo de validação da comunicação entre os XBee Pro utilizados

De forma mais minuciosa, apresenta-se a seguir o procedimento de validação utilizado de forma a tornar o sistema proposto funcional. Para isso, inicia-se uma breve descrição do sistema, buscando ressaltar os detalhes do seu funcionamento.

3.5.1 Processo de configuração do nó

O XBee é utilizado para estabelecer a comunicação sem fio entre o nó sensor e o computador, assim, tem objetivo de recepção e envio dos pacotes de dados disponibilizados pelo PIC 18F2550 na porta serial para um computador. O computador conta com o MATLAB instalado para o recebimento e tratamento desses dados que são apresentados ao longo do desenvolvimento. Sabe-se que o XBee tem que ser configurado no programa XCTU para que haja a comunicação sem fio entre o nó sensor e o computador para processamento dos dados.

Ao inicializar o programa XCTU e procurar pelo XBee conectado na porta USB do computador, consegue-se ter acesso as configurações do módulo transmissor. O primeiro dos XBee utilizados tem o objetivo de receber dados do nó sensor e é localizado no computador que processa e faz o tratamento dos dados, configurado como coordenador conforme o Quadro 8. O segundo XBee está integrado ao nó sensor e tem o objetivo de transmitir os dados para o computador e é chamado de NODE1 como ilustrado no Quadro 9.

Quadro 8 – Configurações do XBee coordenador no programa XCTU

Parâmetros	Configuração	Função
PAN ID	3332	A senha utilizada para comunicação com outro XBee
MAC MODE	802.15.4	Padrão IEEE 802.15.4
<i>Coordinator Enable</i>	<i>Coordinator 1</i>	Função na comunicação
Node Identifier	COORD	Nome do XBee coordenador
Interface Data Rate	57600	Configuração do Baudrate em bits/s

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Já no Quadro 9 a seguir, são apresentados os parâmetros mais importantes para se configurar o XBee NODE1.

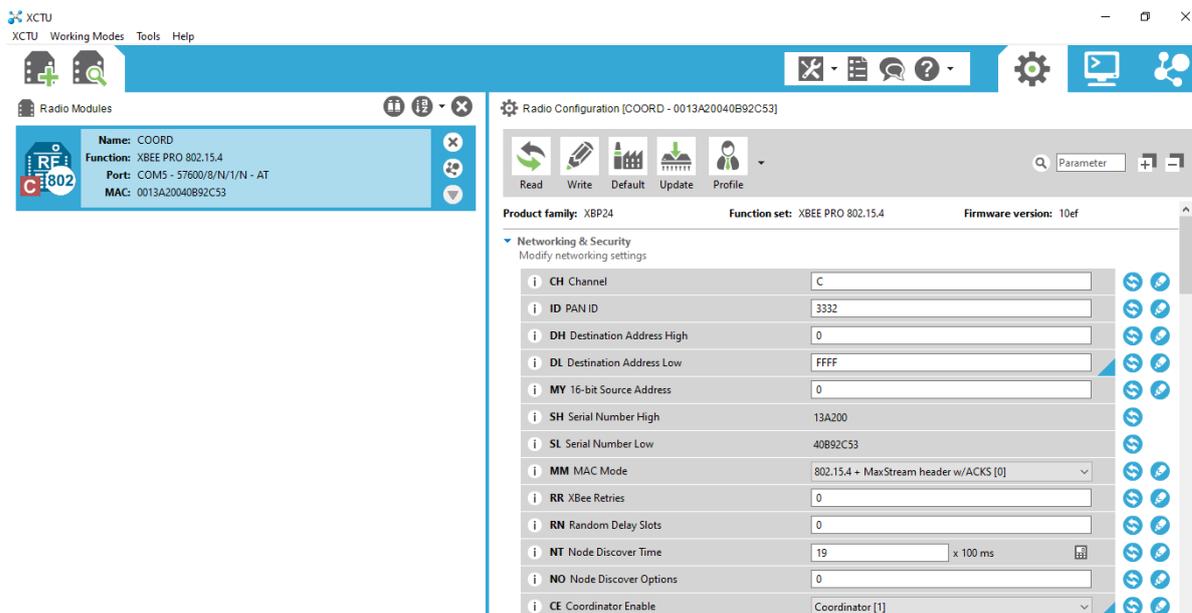
Quadro 9 – Configurações do XBee NODE1 no programa XCTU.

Parâmetros	Configuração	Função
PAN ID	3332	A senha utilizada para comunicação com outro XBee.
MAC MODE	802.15.4	Padrão IEEE 802.15.4
<i>Coordinator Enable</i>	<i>End Device</i>	Função na comunicação
Node Identifier	NODE1	Nome do XBee NODE1
Interface Data Rate	57600	Configuração do Baudrate em bits/s

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

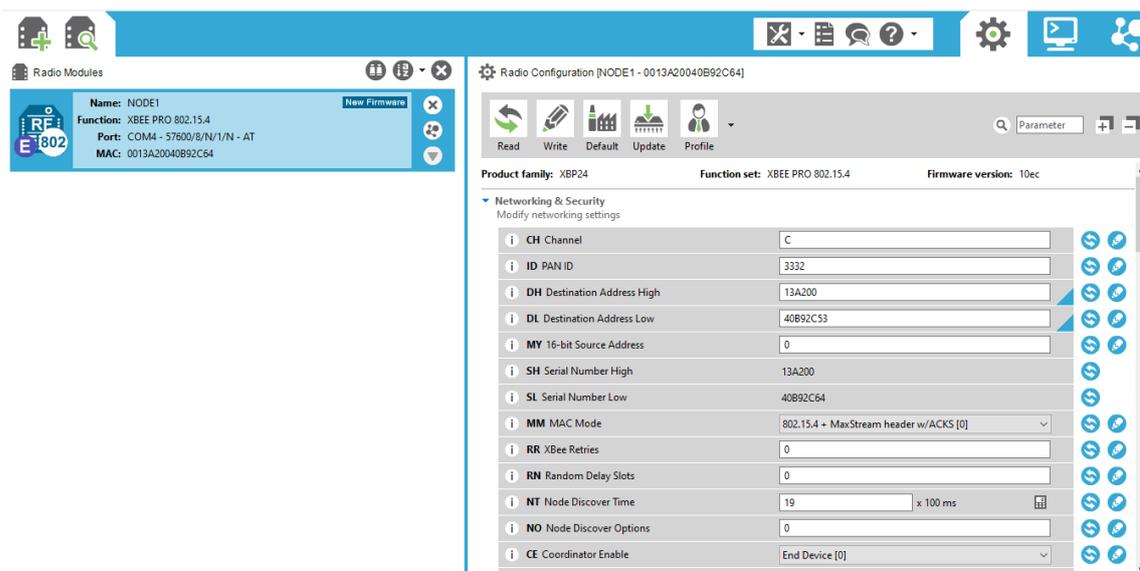
A título de ilustração, pode-se observar, na interface do XCTU, a configuração dos parâmetros usados para o coordenador e o NODE1 demonstrados nas Figuras 13 e 14.

Figura 13 – Configurações do XBee Coordenador no programa XCTU e sua interface.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 14 – Configurações do XBee NODE1 no programa XCTU e sua interface.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Com os parâmetros fundamentais ajustados do XBee Pro S2, pode-se estabelecer uma comunicação entre o Coordenador e o NODE1. Além disso, utilizando a comunicação serial

as leituras do nó sensor são transmitidas por meio do NODE1 e recebidos por meio do Coordenador, validando, desse modo, o sistema sem fio.

3.6 Processamento dos dados pelo computador utilizando o MATLAB

Após a configuração da comunicação entre os XBee Pro S2, as leituras de vibração do nó sensor são recebidas pelo Coordenador e amostradas em um Monitor Serial. Pode-se escolher qualquer *software* que consiga receber dados via comunicação serial. Com isso, o Monitor serial foi utilizado para a coleta dos dados provenientes do nó sensor que, posteriormente, serão inseridos no Excel.

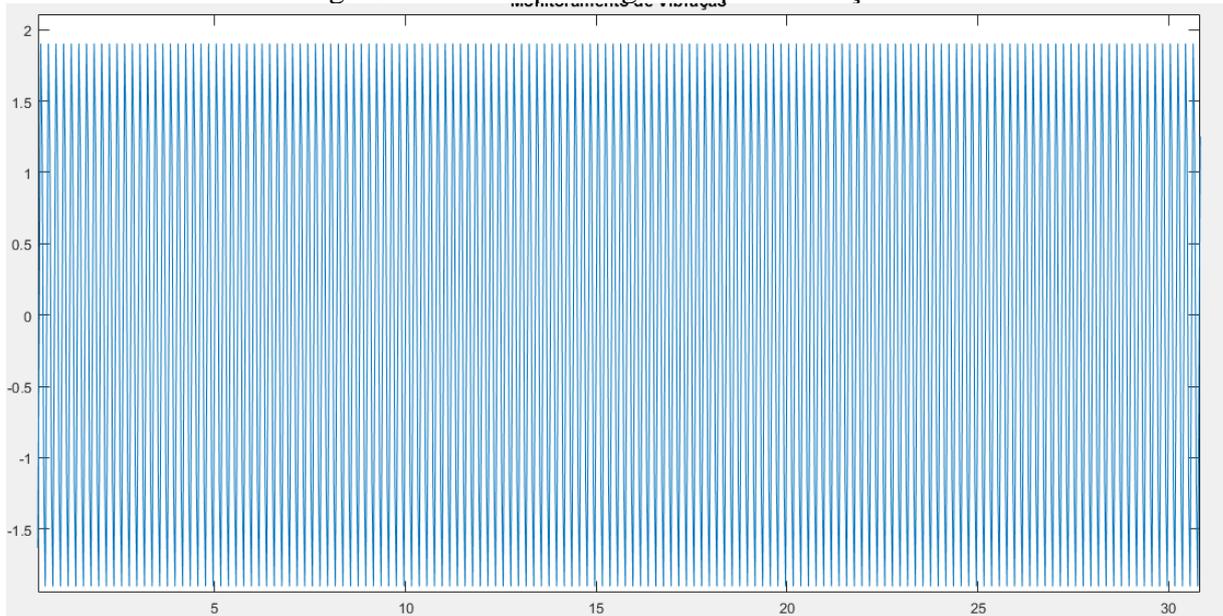
Utilizando-se da função *Timestamp*, o Monitor Serial disponibiliza os dados obtidos da porta serial juntamente com seu tempo de chegada em milissegundos. Fazendo a transição dos dados do Monitor Serial para o Excel, os dados são remanejados em colunas utilizando ferramentas do *software* Excel, sendo o tempo e a leitura do sensor em duas colunas. Logo, os dados de tempo e de leitura de vibração do nó sensor são importados para o MATLAB, sendo processados para gerar dois tipos de gráficos. O primeiro será amostrado no domínio do tempo, já o segundo, no domínio da frequência.

O gráfico no domínio do tempo é obtido por uma função feita como um *script* do MATLAB que usa o comando Plot e configura o tamanho do gráfico e seus títulos. Assim, importando no Workspace, os vetores com as leituras do nó sensor em seu tempo exato de recepção na porta serial, chama-se a função implementada na janela de comando do MATLAB. A seguir, pode-se verificar um exemplo de uma função seno e do gráfico que é gerado usando a função amostras (Tempo, S) pela Figura 15.

Foram usados os seguintes parâmetros:

1. $F_s = 25$;
2. $T_s = \frac{1}{F_s}$;
3. $L = 1000$;
4. $Tempo = (0:L - 1) \times T_s$;
5. Frequência da senoide: $Freq = 5$;
6. Senoide conhecida: $S = 2 \times seno(2\pi \times Freq \times Tempo)$.

Figura 15 – Exemplo de gráfico para a função S.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O gráfico no domínio da frequência é obtido por meio de um código desenvolvido que se aplica o cálculo da Transformada Rápida de Fourier em um conjunto de dados no domínio do tempo. A função que faz o cálculo da Transformada Rápida de Fourier pode ser observada a seguir por meio da Figura 16.

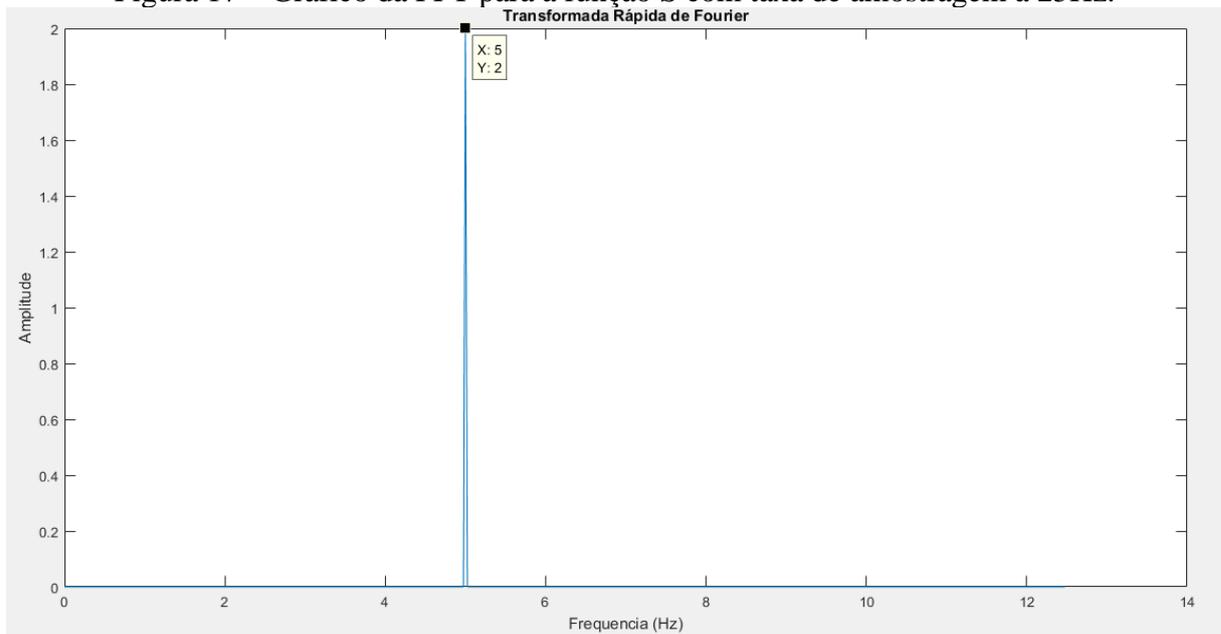
Figura 16 – Função com o cálculo da FFT.

```
1 -  
2 - %Transformada Rápida de Fourier  
3 - function [X , freq] = fftf(x , Fs)  
4 - L = length(x);  
5 - k = 0:L-1;  
6 - T = 1/Fs;  
7 - freq =k/T;  
8 - t=(0:L-1)*T;  
9 - X = fftn(x);  
10 - P1 = 2*(abs(X(1:L/2))/L);  
11 - f = Fs*(0:(L/2)-1)/L;  
12 - %cutoff = ceil(L);  
13 - %X=X(1:cutoff);  
14 - figure;  
15 - xlim([0 30]);  
16 - ylim([0 2]);  
17 - plot(f, P1);  
18 - title('Transformada Rápida de Fourier');  
19 - xlabel('Frequencia (Hz)');  
20 - ylabel('Amplitude');
```

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A partir da função fftf (S, 25), é obtido o gráfico no domínio da frequência para a senoide anterior, como demonstrado na Figura 17.

Figura 17 – Gráfico da FFT para a função S com taxa de amostragem a 25Hz.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Com esses testes, consegue-se verificar a eficácia do código usado para analisar os resultados do monitoramento de vibração para estruturas, tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência.

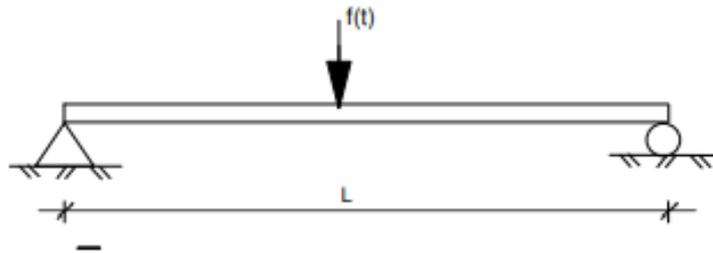
3.7 Realizando um ensaio de vibração

Os resultados do ensaio de vibração são obtidos pelos códigos desenvolvidos no MATLAB. As funções desenvolvidas são chamadas no Comand Window, fornecendo uma interface gráfica por meio dos gráficos de vibração (aceleração x tempo) e suas transformadas (Amplitude x frequência). É necessário que os dados de leitura do nó já tenham sido coletados, lembrando que a aceleração está em g, ou seja, é multiplicado por 10m/s^2 (10 metros por segundo ao quadrado). Utilizou-se uma viga de aço com o nó sensor fixado no meio dessa mesma viga.

Os ensaios consistiram em aplicar um golpe na parte central da viga, durante o processo de monitoramento das vibrações. É importante salientar, que foram feitos vários ensaios para a comparação dos resultados. Primeiramente, houve a coleta dos dados da vibração da viga no estado estacionário, ou seja, sem aplicar qualquer tipo de golpe e, depois, coletou-se os dados da vibração da viga após o golpe com uma ferramenta denominada de martelo de unha, que possui cabo de madeira e com cabeça e unha forjadas em aço.

Para a viga, quanto as suas especificações têm-se: composição em aço e dimensões de 1,496m de comprimento, 0,074m de largura e 0,008m de espessura. Sobre a viga, o cálculo do valor analítico da primeira frequência modal de vibração vertical fornece o resultado de 8,24 Hz conforme Fernandes (2020). O protótipo ensaiado consiste de uma viga biapoiada, conforme esquema apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Exemplo de viga de aço biapoiada utilizada no ensaio.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para a realização do ensaio em laboratório, colocou-se a viga apoiada em dois bancos de madeira maciça. Além disso, entre os bancos de madeira e a própria viga, foram colocadas barras de aço, uma em cada extremidade, com o objetivo de apoiá-la conforme nas Figuras 19 e 20. Justifica-se o uso dessas barras já que, a princípio, sem elas e devido a viga não estar totalmente em condição plana, a movimentação da viga não se dava somente na orientação vertical, desejável, mas também na horizontal, o que comprometia o ensaio. Ademais, houve o posicionamento e a fixação do sensor GY-521 no centro da viga biapoiada, conforme a Figura 21.

Figura 19 – Estrutura para o ensaio de vibrações.



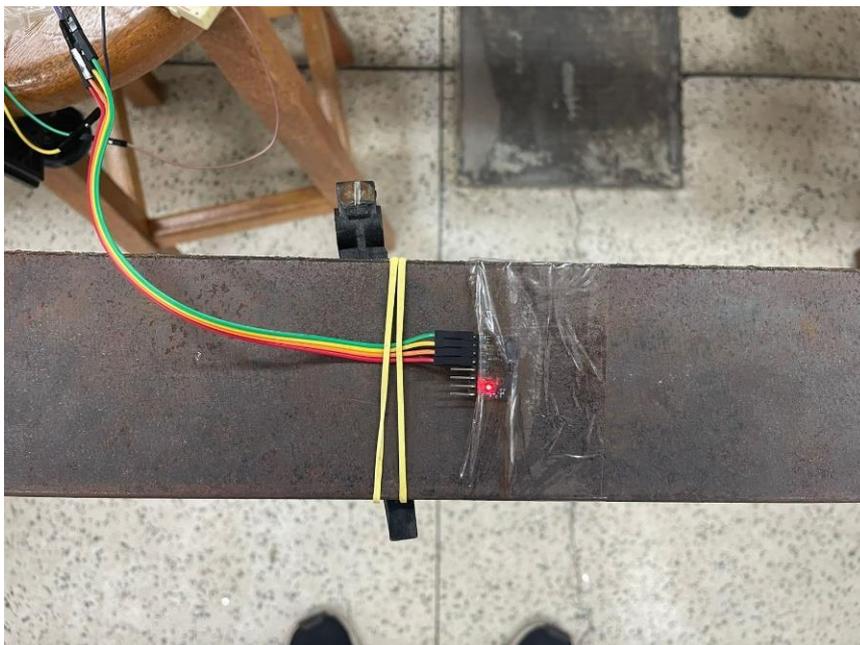
Fonte: acervo pessoal.

Figura 20 – Apoio da viga em uma barra de aço e um banco de madeira maciço.



Fonte: acervo pessoal.

Figura 21 – Fixação do sensor GY-521.



Fonte: acervo pessoal

Os resultados do ensaio de vibração foram analisados com o uso do MATLAB, como são apresentados na próxima seção.

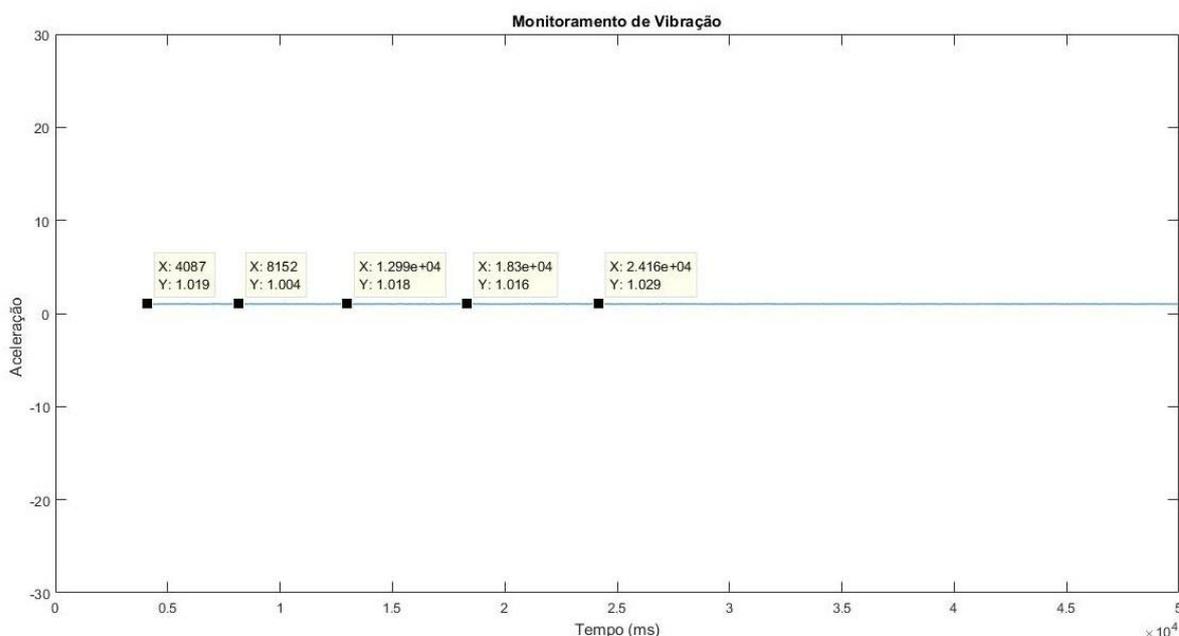
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Sistema de Monitoramento de Vibração Estrutural foi implementado como descrito na seção anterior, sendo composto por um nó sensor para a leitura da aceleração, pelos módulos de recepção e transmissão sem fio, e utilizando *softwares* para processamento dos dados lidos pelo nó sensor. Além disso, com o uso de uma viga biapoiada, detalhada na seção anterior, foi possível obter a frequência do primeiro modo de vibração da viga por meio do cálculo da Transformada Rápida de Fourier.

Conforme a montagem do nó sensor no centro da viga, foram coletados os dados da vibração pelo impacto de um golpe na viga por um martelo, em três tentativas, cada uma delas em um intervalo maior que um minuto, totalizando 1024 leituras e sendo escolhida a tentativa mais eficaz.

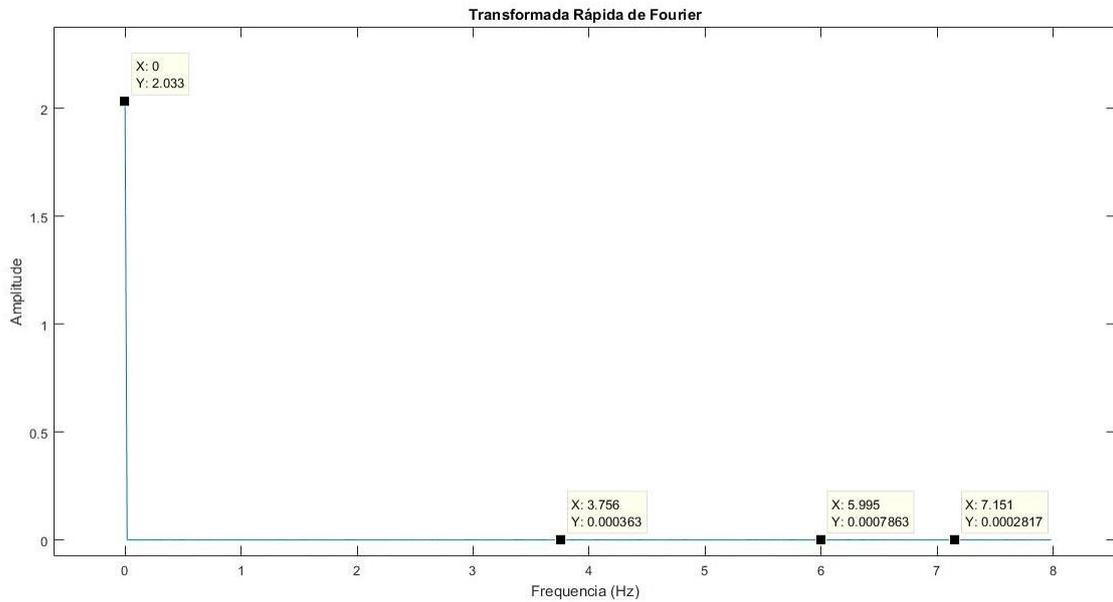
No Sistema desenvolvido, a taxa de amostragem é de 17Hz, visto que foi limitada na própria programação do MPLAB, considerando o tempo gasto também do envio dos pacotes de dados entre a comunicação dos XBee. Conforme os ensaios no laboratório, com a viga em seu regime estacionário visualizam-se os gráficos, um no domínio do tempo e o outro no domínio da frequência, respectivamente, conforme as Figuras 22 e 23.

Figura 22 – Gráfico da resposta do estado estacionário no domínio do tempo.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

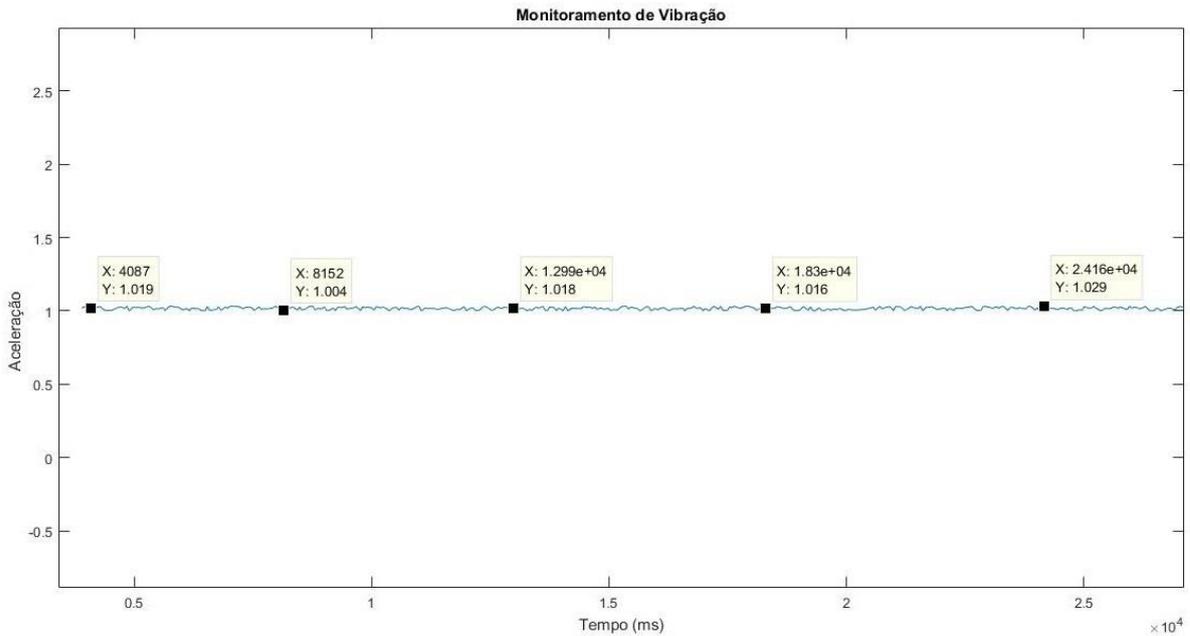
Figura 23 – Gráfico da resposta do estado estacionário no domínio da frequência.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Já utilizando-se da ferramenta de ampliação do gráfico do domínio do tempo, mostrado na Figura 24, é possível observar a variação da aceleração mesmo no estado estacionário.

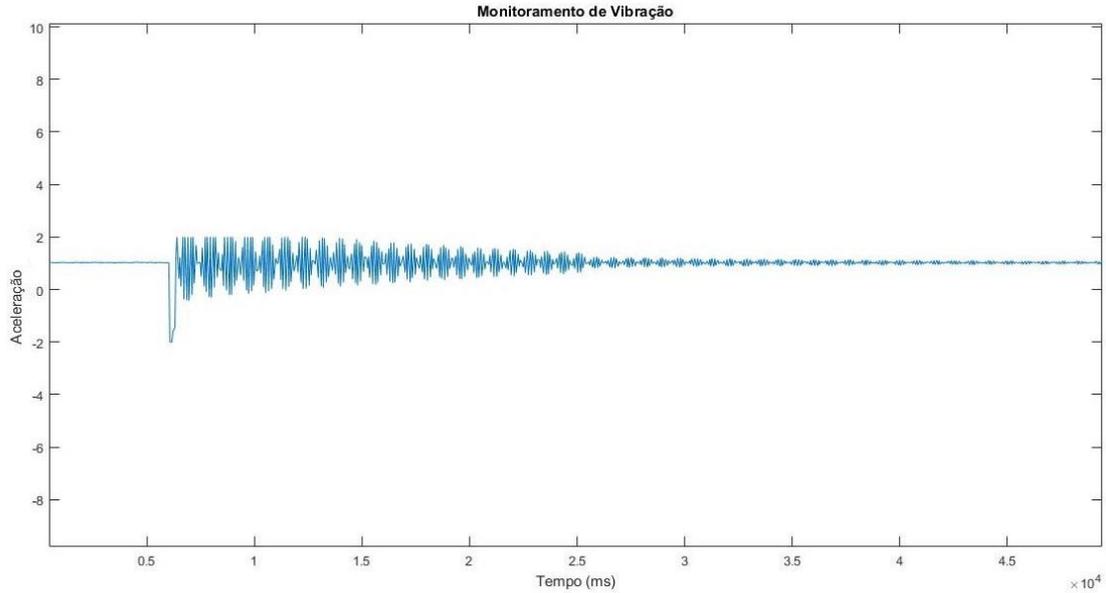
Figura 24 – Gráfico ampliado da resposta do estado estacionário no domínio do tempo.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

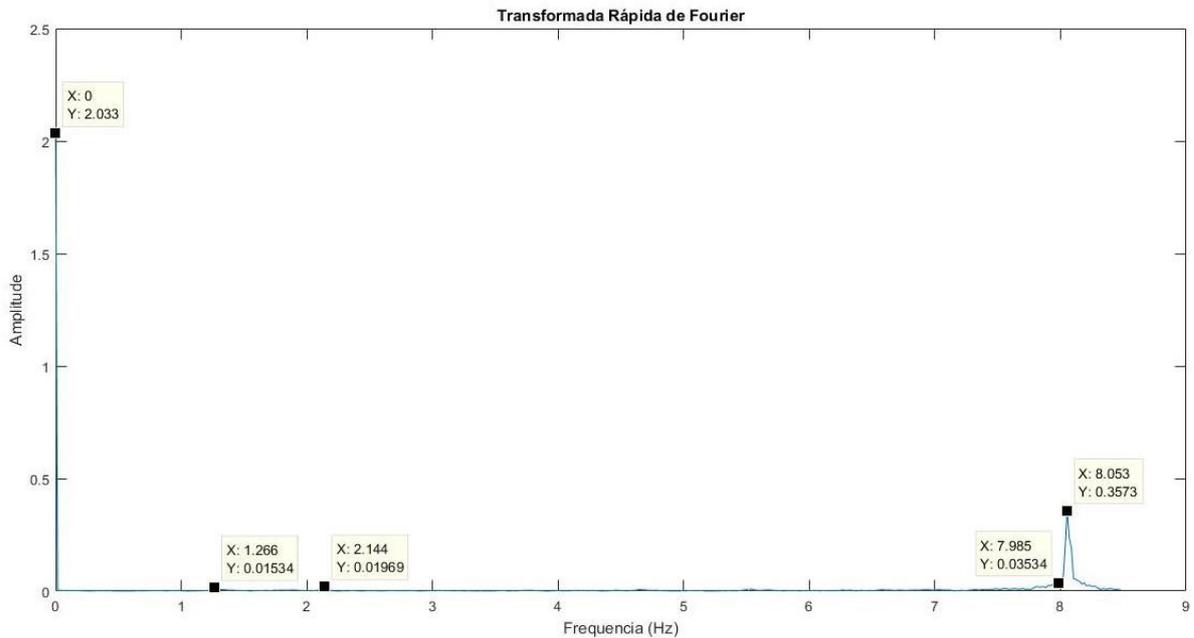
Com a utilização de um martelo, o sistema respondeu conforme as Figuras 25 e 26, respectivamente, no domínio do tempo e no domínio da frequência. Além disso, a Figura 27 apresenta o início do golpe em 6000 milissegundos com o martelo do tipo unha.

Figura 25 – Gráfico da resposta no domínio do tempo com o golpe de um martelo.



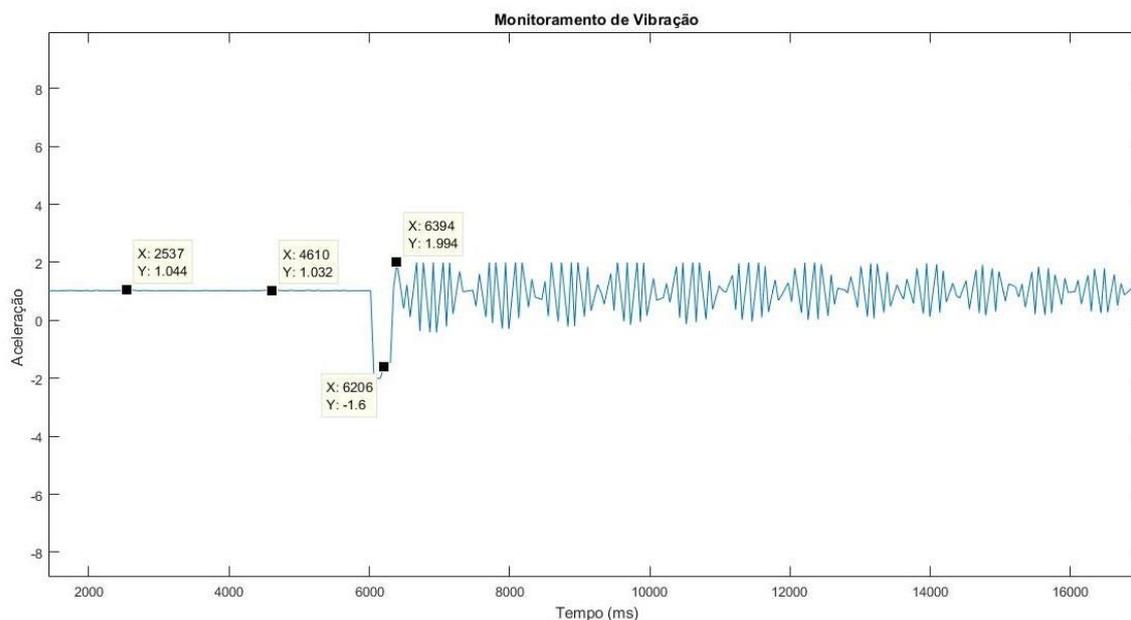
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 26 – Gráfico da resposta no domínio da frequência com o golpe de um martelo.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 27 – Gráfico ampliado da resposta no domínio do tempo com o golpe de um martelo.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Ao analisar os gráficos do domínio do tempo, nota-se que é um sistema subamortecido, o qual, mesmo sofrendo uma perturbação, apresenta oscilações que diminuem gradualmente a amplitude. No entanto, não alcançam um estado estacionário de fato.

Além disso, observa-se que, com o uso do martelo, o tempo de acomodação ocorre a partir dos 40000 milissegundos onde tem-se uma amplitude de 2% da maior atingida. Também, cabe ressaltar o fato de, no início do golpe, a aceleração ir além dos -2g, esse fenômeno aconteceu nas três tentativas do ensaio.

Pode-se observar, também, nos gráficos do domínio do tempo que na forma da onda, sempre há vários picos e vales tendo sua amplitude em nível máximo. No entanto, em um intervalo de tempo, a aceleração é próxima de 1g, mesmo com o sistema vibrando visualmente. Isso pode ocorrer pelo fato da sobreposição de outros sinais, ondas como senos e cossenos, como os de máquinas do laboratório onde foram feitos os ensaios ou devido à má fixação do GY-521. Percebe-se que a frequência dominante do regime estacionário também aparece no ensaio com o golpe do martelo, e fica bastante evidente a sobreposição dos sinais devido essas condições do ambiente (máquinas elétricas do laboratório) ou de montagem.

Analisando os gráficos no domínio da frequência e conhecendo a frequência do primeiro modo da viga que é de 8.24Hz, o resultado obtido com o uso do martelo foi de 8,053

Hz. O resultado apresentou uma frequência modal com um pequeno erro, isso pode ocorrer por três motivos.

O primeiro diz respeito ao fato do teorema de Nyquist-Shannon, provavelmente, não estar sendo respeitado, necessitando que a taxa de amostragem do sistema seja um pouco maior. Assim, como a frequência do primeiro modo da viga (8,24 Hz) é um pouco menor que a metade da frequência de amostragem transmitida pelo nó sensor (8,5 Hz), possivelmente, essa pequena diferença (0,26Hz) pode ocasionar essa menor acurácia ou imperfeição no sinal.

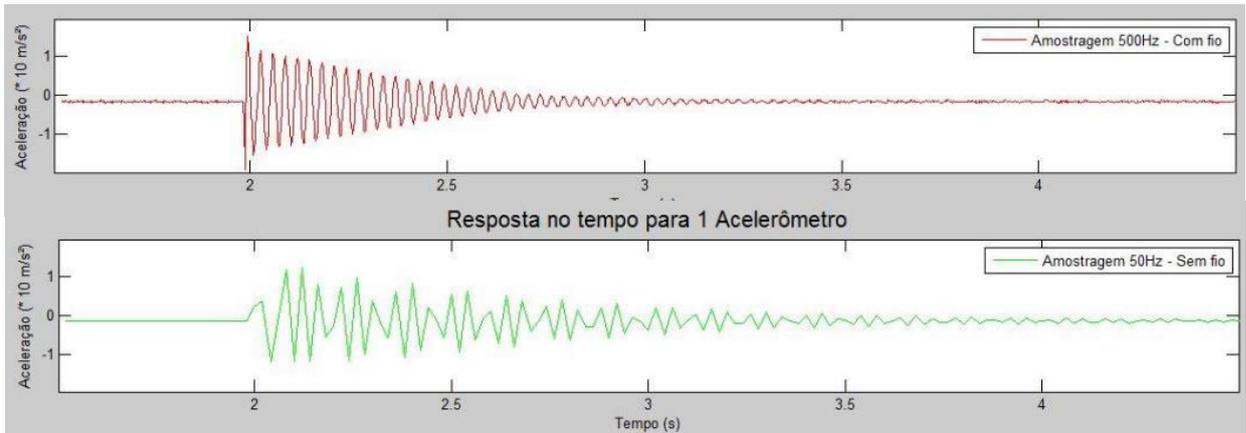
O segundo motivo é pelo arranjo da montagem da estrutura do ensaio - o posicionamento da viga em bancos de madeira maciços, com as barras de aço. Quando a viga é golpeada, o sensor GY-521 mensura a vibração de todo o conjunto que está em movimento, assim tratar-se de um ensaio que está longe de ser o ideal.

O terceiro e último motivo é porque pode haver uma “folga” entre o sensor e a viga, acarretando uma diferença na aferição da vibração da mesma.

A partir da situação verificada, recorreu-se, novamente ao estudo de Eler Filho (2014) para analisar o(s) resultado(s) de seu ensaio. Percebe-se uma diferença de comportamento na taxa de amostragem obtida, já que Eler Filho (2014) compara os resultados de seu ensaio com os de um experimento que possui sensor cabeado e com a frequência de amostragem na faixa de 500 Hz, o que está próximo de um sistema ideal.

Observando esse sistema de monitoramento cabeado como verificado nas Figuras 28 e 29, observa-se que sistemas de baixas taxas de amostragem, como àquele utilizado por Eler Filho (2014), apresentam menos acurácia diante dos resultados da frequência de vibração modal de um sistema cabeado que possui alta taxa de amostragem. Logo, para melhor resolução da frequência, a taxa de amostragem precisa ser aumentada para que os sistemas de monitoramento sem fio apresentem resultados mais próximos do ideal.

Figura 28 – Gráfico da resposta no domínio do tempo para comparar taxas de amostragem.

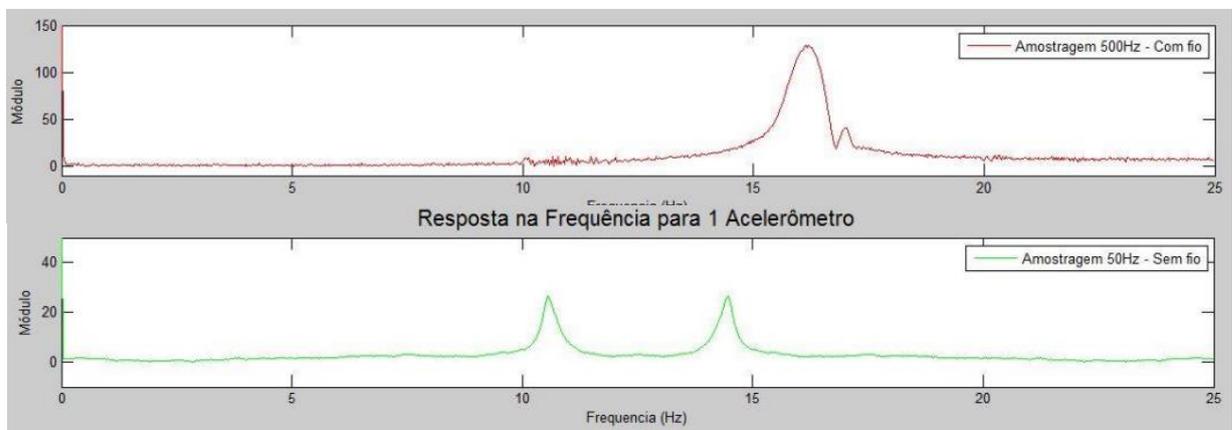


Fonte: elaborado por Eler Filho (2014).

Na Figura 28, pode-se observar como a resolução da onda de vibração em vermelho de uma viga é bem definida e com alta resolução, isso se deve a alta taxa de amostragem de 500 Hz do sistema cabeado. Já na onda de vibração em verde (sem fio de 50 Hz) verifica-se a falta de detalhamento das vibrações em relação ao sistema cabeado.

Na Figura 29, é possível perceber a menor acurácia do sinal ao descartar a primeira onda do sistema desenvolvido por Eler Filho (2014),

Figura 29 – Gráfico da resposta no domínio da frequência para outras taxas de amostragem.



Fonte: elaborado por Eler Filho (2014).

O limite da taxa de amostragem do nó sensor desenvolvido, neste trabalho, se dá porque o microcontrolador gasta muito tempo processando os dados aferidos pelo acelerômetro. O microcontrolador necessita converter esses dados até chegar em aceleração g, ou seja, 10 metros por segundo ao quadrado. Uma das conversões que demanda mais processamento, diz respeito ao número inteiro (tipo int) para o número real (tipo float). Dito isso, o período de amostragem aumenta, na faixa de 58 milissegundos para cada dado ser transmitido entre o nó sensor e o computador que processa os dados. Por fim, pode haver algumas perdas de pacotes

ao serem transmitidos entre os XBee, coordenador e NODE1, podendo ser mais um dos motivos para a taxa de amostragem ter sido limitada.

Assim, vale ressaltar que o sistema para o monitoramento de vibração estrutural sem fio deste trabalho conseguiu obter a primeira frequência modal da viga, no entanto, com um pequeno erro. Em relação as outras frequências modais dessa mesma viga, não foram possíveis de serem detectadas, visto que são maiores que 8,5Hz.

5. CONCLUSÃO

Pelos estudos alcançados neste trabalho de conclusão de curso, pode-se destacar que um sistema de monitoramento de vibração estrutural sem fio é muito viável para analisar a saúde de estruturas, podendo minimizar e até mesmo eliminar danos, acidentes e incidentes em uma estrutura. Esses sistemas vêm evoluindo ao longo dos anos, com estudos que visam conhecer a dinâmica de estruturas.

Esses sistemas de monitoramento de vibração estrutural sem fio são de grande relevância por serem de baixo custo e de pequenas dimensões, capazes de serem facilmente instalados e requerendo um investimento menor se comparados aos sistemas cabeados. Após levantamento bibliográfico, foi possível o desenvolvimento do protótipo, utilizando componentes de baixo custo e de grande disponibilidade no mercado.

O protótipo desenvolvido incluiu o microcontrolador PIC18F2550, que é de baixo custo, consome pouca potência e possui pequenas dimensões. No entanto, é mais desafiador para se programar, visto que se utilizam bibliotecas com diversos parâmetros de registradores para serem configurados.

O sistema desenvolvido teve um pequeno erro entre o valor teórico e o valor obtido pelas leituras do nó sensor. No entanto, para se ter maior confiabilidade e melhorar os resultados obtidos tendo uma maior resolução da onda de vibração de uma estrutura, é preciso de aumentar a taxa de amostragem como foi mostrado na figura 26 com cabeamento a 500 Hz. Também é de grande importância a elaboração de um projeto para arquitetar a distribuição dos transmissores e receptores XBee. Assim, com a construção desse *layout* há a diminuição das interferências para que não ocorra perdas de pacotes de dados ou limites de distância de alcance entre os módulos.

A intenção era obter os dados das leituras dos sensores diretamente na plataforma MATLAB para o processamento dos dados, porém, por um problema na biblioteca da comunicação serial, o conjunto de dados das leituras foi obtido no MATLAB por meio de outros *softwares* - Monitor Serial e Excel – os dados coletados e processados como vetores foram importados pelo MATLAB.

Como propostas de trabalhos futuros, para se ter maior confiabilidade, deve-se aumentar a taxa de amostragem enviando o *raw data* (dados brutos) do acelerômetro para o *software* de processamento de dados que será usado, assim, gastando menor tempo para a

amostragem dos dados. Também, é importante o desenvolvimento de uma sincronização de vários nós sensores para que mais pontos de uma estrutura possam ser monitorados.

Além disso, sugere-se realizar os ensaios experimentais num modelo mais confiável, com ferramentas mais adequadas para apoiar a viga, obtendo assim, as frequências de vibração sem qualquer perturbação ou interferências em um ambiente ideal. Também, é necessário o desenvolvimento de uma placa para o nó sensor e a seleção de uma bateria para sua alimentação. Com a construção da placa, evita-se o mau contato e a má fixação em uma estrutura, além de proporcionar que o dispositivo seja compacto (componentes interligados), pequeno e de fácil instalação. Com a escolha de uma bateria de grande duração, o nó sensor pode ser instalado em lugares remotos e funcionar por um longo tempo sem a necessidade de troca de bateria ou alimentação solar.

Ensaaios para diferentes taxas de amostragem também são de grande importância, visto que, poderia ser comparado a partir de qual taxa de amostragem que as onda de vibração apresentariam uma melhora considerável, com uma boa resolução e que conseguisse chegar a mais frequências modais de uma estrutura.

Outro aspecto relevante é a importação dos dados puros (*raw data*), lidos pelo nó sensor, diretamente para o MATLAB ou outra plataforma de processamento de dados, visto que, dispensa a utilização de *softwares* intermediários para a transição desses dados. Desse modo, com a utilização do *raw data*, seria possível uma maior precisão, alta taxa de amostragem e confiabilidade no sistema de vibração estrutural proposto.

REFERÊNCIAS

ABDULKAREM, M. *et al.* Wireless sensor network for structural health monitoring: A contemporary review of technologies, challenges, and future direction. *Structural Health Monitoring*, SAGE journals, 19, 3, 693-735, julho 2020.

AGNOL, Cleiton Dal. *Comparação entre microcontroladores e aplicação do fpga no controle do conversor boost*. Monografia. Centro Universitário UNIFACVEST, Lages, 2018.

BEZERRA, L. T. V. *Mapeamento de risco e análise de estabilidade de movimentos de massa na comunidade São José do Jacó, Natal/RN*. Dissertação. Universidade Federal de do Rio Grande do Norte, 2019.

ELER FILHO, Edvar Gonzaga. 2014. *Proposta de um sistema sem fio para monitoramento e identificação de características dinâmicas de estruturas civis*. Monografia. Universidade Federal de Ouro Preto, 2014.

ENGST, Adam; FLEISHMAN, Glenn. *Kit do iniciante em redes sem fio: o guia prático sobre redes Wi-Fi para Windows e Macintosh*. 2. ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 2005.

FEITOSA JÚNIOR, Paulo; FRANCISCO, Lucas; TREVISANI, Kleber Manrique. Desenvolvimento de um controlador de dispositivos para automação residencial utilizando tecnologia de rede zigbee. *Colloquium Exactarum*, v. 5, n.1, jan-jun. 2013, p. 57 – 68.

FERNANDES, Fernando dos Santos Alves. *Internet das coisas e monitoramento de vibração: protótipo de um nó sensor*. Dissertação. Universidade Federal de Ouro Preto, 2020.

FIGUEREDO, L. J.; GAFANIZ, A. R.; LOPES, G. S.; PEREIRA, R. *Aplicações de Acelerômetros*, 2008. Monografia. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2008.

IMD, *Prototipagem e Montagem de Placa de Circuito Impresso*. Disponível em: <<https://materialpublic.imd.ufrn.br/curso/disciplina/2/64>> Acesso em: 10 de ago. de 2022.

KOENE, Ivar; KLAR, Ville; VIITALA, Raine. *IoT connected device for vibration analysis and measurement*. (2020) Disponível em: www.elsevier.com/locate/ohx. Acesso em: 23 de jan. 2023.

KURATA, M. *et al.* Internet-Enabled Wireless Structural Monitoring Systems: Development and Permanent Deployment at the New Carquinez Suspension Bridge. *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, 139, 10, 1688-1702, outubro 2013.

LYNCH, Jerome; LOH, Kenneth. A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring. *The Shock and Vibration Digest* v. 38, n. 2, março 2006.

MELO, Paulo. Padrão IEEE 802.15.4 – A base para as especificações Zigbee, WirelessHart e MiWi. *Embarcados*, 2017. Disponível em: <<https://embarcados.com.br/padrao-ieee-802-15-4/>> Acesso em: 23 de fev. de 2023.

MORENO-GOMEZ, A. *et al.* *Sensors Used in Structural Health Monitoring*, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2017. doi: 10.1007/s11831-017-9217-4.

PICKit™2 Eletricamente falando, 2011. Disponível em: <<http://eletricamentefalando.blogspot.com/2011/09/pickit2.html>> Acesso em: 10 de ago. de 2022.

RAMOS, Jadeilson de Santana Bezerra. *Instrumentação eletrônica sem fio: transmitindo dados com módulos Xbee Zigbee e PIC18F877A*. 1º ed. São Paulo: Érica, 20012.

RIPPER NETO, Arthur Palmeira. *Vibrações mecânicas*. Rio de Janeiro: E-papers, 2007

ROCHA, Fábio Saraiva da; MARRANGHELLO, Guilherme Frederico. Propriedades de um acelerômetro eletrônico e possibilidades de uso no ensino de mecânica. *Lat. Am. J. Phys. Educ.* v. 7, n. 1, March 2013.

SANTOS, Leonardo BL; DE CAMPOS-VELHO, H. F.; CHIWIACOWSKY, L. D. Análise de robustez do método híbrido de estimação de dano estrutural. *TEMA (São Carlos)*, v. 12, n. 3, p. 245-252, 2011.

SHEIKH, Asrar UH; AL-MOELLAM, Yousuf D. Wireless networking for monitoring and control system of a steel plant. *Wireless Personal Communications*, v. 66, n. 4, p. 771-788, 2012.

SILVA, Jhonatan Henrique Rios da., MINHONI, Danilo Carlos Rosseto; FLORIAN, Fabiana. Proposta de automação em uma seladora de copos utilizando microcontrolador pic16f628a. *Recima21 - Revista Científica Multidisciplinar*, 2022.

SOUZA, David José de. *Desbravando o pic: ampliado e atualizado para pic 16f628a*. São Paulo: Saraiva, 2003.