



DESENVOLVIMENTO DE ACELERÔMETRO SEM FIO DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO DINÂMICO ESTRUTURAL

Emerson Galdino Toledo Júnior

Juiz de Fora

2018

Universidade Federal de Juiz de Fora
Faculdade de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**DESENVOLVIMENTO DE ACELERÔMETRO SEM
FIO DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO
DINÂMICO ESTRUTURAL**

Emerson Galdino Toledo Júnior

Área de concentração: Estruturas e Materiais

Linha de Pesquisa: Mecânica das Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Abrahão Cury – UFJF

Coorientador: Prof. Dr. Jânes Landre Junior – PUC Minas

Juiz de Fora

2018

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Toledo Júnior, Emerson Galdino.

Acelerômetro sem fio de baixo custo para monitoramento dinâmico estrutural / Emerson Galdino Toledo Júnior. -- 2018.
84 p.

Orientador: Alexandre Abrahão Cury

Coorientador: Jánes Landre Júnior

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, 2018.

1. SHM. 2. Acelerômetro sem fio. 3. Baixo custo. 4. Dinâmica das estruturas. I. Cury, Alexandre Abrahão, orient. II. Landre Júnior, Jánes, coorient. III. Título.

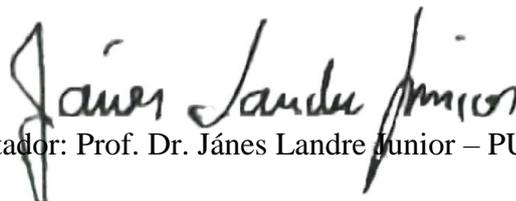
DESENVOLVIMENTO DE ACELERÔMETRO SEM FIO DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO DINÂMICO ESTRUTURAL

Emerson Galdino Toledo Júnior

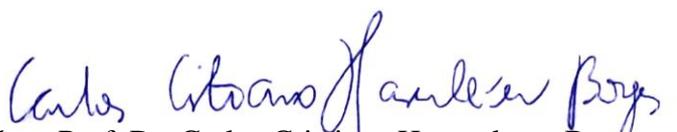
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 05 de novembro de 2018, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Universidade Federal de Juiz de Fora, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Orientador: Prof. Dr. Alexandre Abrahão Cury – UFJF



Coorientador: Prof. Dr. Jânes Landre Júnior – PUC Minas



Membro: Prof. Dr. Carlos Cristiano Hasenclever Borges – UFJF



Membro: Prof. Dr. George Oliveira Ainsworth Junior – UFJF



Membro: Prof. Dr. Francisco de Assis das Neves – UFOP

Dedico este trabalho a todos os professores,
que dedicam a sua vida a pesquisa e ao ensino.

Só teremos verdadeira mudança em nossa realidade
quando os professores e a educação forem tratados com respeito.

Agradecimentos

Meus mais sinceros agradecimentos a todos os professores que estão envolvidos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, vejo que as dificuldades em se iniciar um programa de mestrado são inúmeras, mas a dedicação desses professores tornou o programa um sucesso logo em seu primeiro ano.

Agradeço em especial ao professor Alexandre Cury, o orientador e mestre dessa caminhada, obrigado pelo exemplo. Ao professor co-orientador Janes Landre, que se mostrou disposto a abraçar o trabalho e possibilitou os ensaios experimentais desse trabalho.

A Deus, causa primária de todas as coisas, que nos envolve e nos faz seguir em frente independente das dificuldades e tropeços, nos lembrando sempre do nosso verdadeiro objetivo aqui em vida, a evolução moral e intelectual da humanidade.

Aos meus pais, Emerson e Simone, de onde o apoio é indispensável para uma caminhada tranquila, obrigado pelo apoio emocional e por me ajudarem nessa caminhada, sem vocês eu não estaria aqui. A namorada Letícia por ter ajudado a segurar a barra quando os afazeres ficaram mais pesados do que eu conseguia sozinho, companheira das vitórias e dos momentos difíceis, muito obrigado!

Enfim a minha gratidão a todos que contribuem para que a ciência avance, são esses que sem cessar contribuem para a evolução intelectual da humanidade.

"Um ladrão rouba um tesouro, mas não furta a inteligência.

Uma crise destrói uma herança, mas não uma profissão.

Não importa se você não tem dinheiro, você é uma pessoa rica,

pois possui o maior de todos os capitais: a sua inteligência.

Invista nela. Estude!"

(Augusto Cury)

Resumo

O Monitoramento de Integridade Estrutural (MIE) de estruturas civis é de grande importância prática para a engenharia. Diversas pesquisas têm sido realizadas, como na Ponte Rio-Niterói no Brasil, na antiga ponte Z24 na Suíça, na ponte Millau na França, entre diversas outras. De fato, algumas estruturas são monitoradas 24 horas por dia, 7 dias por semana, para fornecer medições dinâmicas que podem ser utilizadas para a identificação de problemas estruturais, tais como a presença de fissuras, vibração excessiva, identificação de danos, ou mesmo para efetuar análises de ciclo de vida. Sistemas de MIE podem fornecer avaliações automatizadas da saúde estrutural através do processamento de dados provenientes dos sensores ligados à estrutura. O MIE frequentemente utiliza sistemas com fio, que geralmente são caros devido à necessidade de manutenção contínua, e nem sempre adequados para a detecção de estruturas remotas. Por outro lado, os sistemas comerciais sem fio muitas vezes exigem altos investimentos iniciais de implementação. Neste sentido, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de sensores que utiliza o computador de placa única Raspberry Pi, o que reduz significativamente os custos de implementação mantendo a integridade dos dados. A comunicação sem fio é realizada em tempo real através de uma rede sem fio local, responsável por enviar e receber dados. O sistema proposto é validado comparando seus resultados com um sistema comercial com fio, através de ensaios experimentais realizados em laboratório com *shaker* em frequências e amplitudes moduladas. Os resultados obtidos demonstram a viabilidade do sistema proposto para uso em aplicações de monitoramento dinâmico de estruturas.

Abstract

Structural Health Monitoring (SHM) of civil infrastructures has great practical importance for engineers. Several researches have been carried out, such as the Rio-Niterói Bridge in Brazil, the former Z24 Bridge in Switzerland, the Millau Bridge in France, among others. In fact, some structures are monitored 24/7 to supply dynamic measurements that can be used for the identification of structural problems, such as the presence of cracks, excessive vibration, damage identification or even to perform life cycle analyses. SHM systems may provide automated assessments of structural health by processing data from sensors attached to the structure. SHM often uses wired systems, which are usually expensive due to the necessity of continuous maintenance and are not always suitable for sensing remote structures. On the other hand, commercial wireless systems often demand high implementation costs. In this sense, this paper proposes the development of a sensing system that uses the single board computer Raspberry Pi, which significantly reduces implementation costs while keeping data's integrity. The wireless communication is performed in real time through a local wireless network, responsible for sending and receiving data. The proposed system is validated by comparing its results with a commercial wired system through an experimental application performed in laboratory using a shaker.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Unidades de aquisição/transmissão de dados (Eler Filho, 2014).....	8
Figura 2.2 – Sensor Acelerômetro Protótipo (Galdino, 2016)	9
Figura 3.1 – Raspberry Pi 3	12
Figura 3.2 – Interface Gráfica SO Raspbian.....	12
Figura 3.3 – Consumo energético para cada protocolo (Lee et al, 2007).....	20
Figura 3.4 – Comparação do consumo energético normalizado (Lee et al, 2007)	20
Figura 3.5 – Uso de acelerômetros para sensoriamento de impacto	21
Figura 3.6 – Acelerômetro MEMS simplificado (Mouser Eletronics, 2018).....	22
Figura 3.7 – Modulação por largura de pulso (PWM)	24
Figura 3.8 – MPU-6050.....	27
Figura 3.9 – GY-521.....	28
Figura 3.10 – CJMCU-10DOF	29
Figura 4.1 – Processo de aquisição de dados em sistemas tradicionais cabeados.....	30
Figura 4.2 – MX1601B – Parte Frontal (HBM, 2018)	32
Figura 4.3 – Sistema tradicional com fio esquematizado	32
Figura 4.4 – Acelerômetro CCDL 4507B	33
Figura 5.1 – Interface gráfica Raspbian.....	36
Figura 5.2 – Terminal Raspbian Lite.....	36
Figura 5.3 – Acesso Remoto do Terminal - Putty	38
Figura 5.4 – Acesso remoto aos arquivos – FileZilla.....	39

Figura 5.5 – Advanced IP Scanner	40
Figura 5.6 – Acrylic Wi-Fi	40
Figura 5.7 – Fluxograma de funcionamento.....	43
Figura 6.1 – Disposição dos Acelerômetros.....	44
Figura 6.2 – <i>Shaker</i> instrumentado.....	45
Figura 6.3 – Keysight 33210A	45
Figura 6.4 Calibrador PCB 394C06	46
Figura 6.5 – Ensaio em Repouso	48
Figura 6.6 – Histogramas do Ruído em Repouso.....	49
Figura 6.7 – Calibrador 159,2 Hz 1,0g - FFT.....	51
Figura 6.8 – Ensaio 2,5 Hz e 0,02g – FFT.....	53
Figura 6.9 – Ensaio 2,5 Hz e 1g – FFT.....	53
Figura 6.10 - Ensaio 20 Hz e 0,2g – FFT	54
Figura 6.11 - Ensaio 95 Hz e 1g – FFT	55
Figura 6.12 - Calibrador 159,2 Hz 1,0g.....	56
Figura 6.13 - Ensaio 2,5 Hz 0,02g – Tempo	60
Figura 6.14 - Ensaio 2,5 Hz 1g - Tempo	60
Figura 6.15 - Ensaio 20 Hz 0,2g – Tempo	61
Figura 6.16 - Ensaio 95 Hz 1g – Tempo	61

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Evolução de Hardware Raspberry Pi (Raspberry Pi, 2018)	13
Tabela 3.2 – Comparação de Protocolos (Lee et al, 2007).....	18
Tabela 3.3 – Parâmetros para os protocolos sem fio (Lee et al, 2007).....	19
Tabela 3.4 – Consumo de energia para cada protocolo (Lee et al, 2007)	19
Tabela 4.1 – Especificações Técnicas 4507B.....	33
Tabela 6.1 – Comparação da Faixa de Ruído.....	50
Tabela 6.2 – Ensaio Realizados Frequência x Amplitude	52
Tabela 6.3 – Acelerações Máximas com Calibrador.....	57
Tabela 6.4 – Fatores Mutiplicativos para MPU-6050	58
Tabela 6.5 – Fatores Mutiplicativos para MPU-9250	59

Lista de Abreviaturas e Siglas

A/D	Analógico/Digital
CPU	Unidade Central de Processamento (<i>Central Processing Unit</i>)
DFT	Transformada Discreta de Fourier (<i>Discrete Fourier Transform</i>)
DOF	Graus de Liberdade (<i>Degrees of Freedom</i>)
E/S	Entrada/Saída
FFT	Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
FTP	Protocolo de Transferência de Arquivos (<i>File Transfer Protocol</i>)
GPU	Unidade de Processamento Gráfico (<i>Graphics Processing Unit</i>)
I2C	Circuito Inter-Integrado (<i>Inter-Integrated Circuit</i>)
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
MEMS	Sistemas Microeletromecânicos (<i>Microelectromechanical systems</i>)
MIE	Monitoramento de Integridade Estrutural
PWM	Modulação de Largura de Pulso (<i>Pulse Width Modulation</i>)
RAM	Memória de Acesso Aleatório (<i>Random Access Memory</i>)
SBC	Computador de Placa Única (<i>Single Board Computer</i>)
SFTP	Protocolo de Transferência de Arquivos SSH (<i>SSH File Transfer Protocol</i>)
SHM	Monitoramento de Integridade Estrutural (<i>Structural Health Monitoring</i>)
SoC	Sistema Embarcado (<i>System-on-a-chip</i>)
SRAM	Memória Estática de Acesso Aleatório (<i>Static Random Access Memory</i>)

SSH

Secure Shell

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa do Trabalho	2
1.2	Objetivo Geral	2
1.3	Objetivos Específicos.....	3
1.4	Metodologia Proposta	3
1.5	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3	INSTRUMENTAÇÃO SEM FIOS	10
3.1	Computador de Placa Única - Raspberry Pi.....	10
3.1.1	Hardware	12
3.1.2	Processador.....	13
3.1.3	RAM.....	14
3.1.4	Rede.....	14
3.1.5	Periféricos.....	15
3.1.6	Temporização	15
3.1.7	Sistema Operacional.....	15
3.2	Redes sem fio.....	15
3.2.1	Métodos de Transmissão	16
3.2.2	Protocolo Wi-Fi - IEEE 802.11a/b/g.....	17
3.3	Sensores de aceleração	21
3.3.1	Tipos de acelerômetro	22
3.3.2	Especificações	23
3.3.3	Saídas.....	25
3.3.4	Sensores utilizados	27

4	INSTRUMENTAÇÃO TRADICIONAL COM FIO	30
4.1.1	QuantumX MX1601B	31
4.1.2	Acelerômetro CCLD 4507B	32
5	MATERIAIS E MÉTODOS	34
5.1	Protótipo construído.....	34
5.2	Software.....	35
5.2.1	Raspbian Lite	35
5.2.2	Python	37
5.2.3	Putty.....	37
5.2.4	FileZilla	38
5.2.5	Softwares Adicionais	39
5.3	Métodos	41
5.3.1	Teorema de amostragem de Nyquist-Shannon.....	41
5.3.2	Transformada rápida de Fourier – FFT	41
5.3.3	Ensaio sem fio	42
6	ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	44
6.1	Comunicação <i>Wireless</i>	47
6.2	Ruído em Repouso	47
6.3	Domínio da Frequência	50
6.4	Domínio do Tempo	55
7	CONCLUSÕES.....	63
7.1	Sugestoes para trabalhos futuros	64
	REFERÊNCIAS	65
	APÊNDICE A – ENSAIOS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	67
A.1	Ensaio em 2,5 Hz	67

A.2	Ensaaios em 5 Hz	70
A.3	Ensaaios em 10 Hz	73
A.4	Ensaaios em 20 Hz	76
A.5	Ensaaios em 49 Hz	78
A.6	Ensaaios em 95 Hz	79
ANEXO A – CERTIFICADO DO CCLD 4507B		81
ANEXO B – CERTIFICADO DO CALIBRADOR UNIVERSAL.....		82
ANEXO C – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS SENSORES.....		83
A.1	Especificações do MPU-6050	83
A.2	Esquemático GY-521	83
A.3	Especificações do MPU-9250	84
ANEXO D – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS MX1601B.....		85

1 Introdução

As análises experimentais de vibração realizadas em sistemas estruturais têm uma grande importância prática para Engenharia Civil. Muitos trabalhos têm sido publicados na literatura mostrando diferentes tipos de sistemas de instrumentação estrutural e sistemas de aquisição de dados. Estes sistemas são muitas vezes utilizados como uma ferramenta para realizar o monitoramento dinâmico em estruturas de grande importância, como a Ponte Rio-Niterói (Battista et al., 2000) no Brasil, a Ponte Z24 (Reynders et al. 2009) na Suíça, e a ponte Millau (Gautier et al., 2005) na França.

Inúmeras pesquisas têm sido realizadas utilizando monitoramento de longo prazo (Soyoz et al 2009; Cardini et al., 2009). Por uma questão de necessidade, algumas estruturas são monitoradas 24 horas por dia, 7 dias por semana, a fim de fornecer medições dinâmicas que podem ser utilizadas para a identificação de problemas estruturais, tais como a presença de fissuras (Lu et al., 2009), vibrações excessivas (Darus et al., 2005), identificação de danos (Cury et al., 2010), entre outros. Além disso, através de uma análise dinâmica estrutural, é possível realizar uma avaliação estrutural bastante extensa sobre a sua confiabilidade, a vulnerabilidade ou mesmo seu ciclo de vida (Torres et al., 2007).

O Monitoramento de Integridade Estrutural (*Structural Health Monitoring*, SHM, em inglês) pode fornecer avaliações automatizadas sobre integridade estrutural através do processamento de dados de sensores ligados à estrutura. Para isso, o SHM faz uso de diferentes tipos de sensores para monitorar estruturas: sensores de deslocamento, *strain gages*, acelerômetros, entre outros. Este trabalho, entretanto, concentra-se em um sistema baseado em acelerômetros. Medidas de acelerômetros, como o nome sugere, são as acelerações da superfície sobre as quais eles estão instalados. Do ponto de vista da engenharia estrutural, acelerômetros são caracterizados por vários parâmetros de desempenho, dentre os quais destacam-se: sensibilidade, que sugere a menor aceleração mensurável expressa em g (aceleração da gravidade); faixa de frequência, que indica a frequência máxima que o dispositivo é capaz de medir e é expressa em Hz ; e o ruído, que é medido como um valor quadrático médio das amplitudes ou é expresso como uma função da frequência de vibração (Xu et al., 2004).

1.1 Justificativa do Trabalho

O SHM frequentemente utiliza sistemas com fios que geralmente são caros, devido à necessidade de manutenção contínua e que nem sempre são adequados para a utilização em estruturas remotas. Além disso, restrições de energia e fiação impostas por esses sistemas podem aumentar o custo de aquisição desses equipamentos, impor atrasos significativos de implantação e limitar o número e a localização dos sensores. Assim, a rede de sensores sem fio é uma opção para sistemas de monitoramento de integridade estrutural, uma vez que permitem uma densa rede para sensoriamento *in situ* e ainda simplificam a instalação da instrumentação (Sindhu et al., 2015; Pandey et al. 2016).

O número de estudos que buscam o desenvolvimento de novos sensores para a aquisição de dados dinâmicos está crescendo continuamente. Paralelamente, observa-se a inovação em relação ao uso de redes sem fio, propiciando melhores resultados quando se trata da diminuição da presença de ruído em sinais e, ao mesmo tempo, dos custos de manutenção.

Particularmente, as redes de sensores sem fios começam a ser utilizadas como uma maneira de facilitar a transmissão de dados. A aquisição sem fio é vantajosa para permitir a instrumentação em lugares de difícil acesso, reduzindo os custos de instalação e manutenção, enquanto expande seu uso para situações em que a estrutura seria grande o suficiente a ponto de sistemas com fio não serem viáveis.

Desta forma, o presente trabalho busca contribuir para o desenvolvimento do sensoriamento estrutural sem fio, assim como para com a análise dinâmica de estruturas. Mais especificamente, busca-se tornar o acesso e a utilização desses novos equipamentos menos custosos, contribuindo para que mais pesquisadores possam colaborar para o avanço do monitoramento de integridade estrutural e da detecção de danos.

1.2 Objetivo Geral

Neste sentido, este trabalho propõe o planejamento, programação, execução e avaliação de um acelerômetro sem fio de baixo custo baseado no computador de placa única Raspberry Pi. Esta plataforma reduz significativamente os custos de implementação, ao mesmo tempo que mantém a integridade dos dados. A comunicação sem fio é realizada através de uma rede local por ondas de rádio, responsável por veicular os dados enviados. O sistema proposto é validado

comparando seus resultados com um sistema com fio comercial através de ensaios experimentais realizados em laboratório com *shaker* em frequências e amplitudes moduladas.

1.3 Objetivos Específicos

- Estudo das possibilidades de hardware e software para a escolha da que melhor atenda às necessidades do projeto;
- Construção de um protótipo que forneça de forma sem fio os dados de aceleração de uma estrutura remota;
- Implementação do protótipo em uma estrutura para que possa ser instrumentada junto com um acelerômetro comercial cabeado em análise de vibrações;
- Análise e comparação dos resultados obtidos, com o objetivo da validação ou não do protótipo proposto inicialmente.

1.4 Metodologia Proposta

Primeiramente, será realizado um estudo do panorama das pesquisas em andamento na área de instrumentação sem fio de baixo custo, assim como os equipamentos que já foram avaliados, seguido por um estudo de viabilidade dos *hardwares* e *softwares*.

A fim de se criar um acelerômetro sem fio confiável e robusto, é necessário que certos pré-requisitos sejam minimamente cumpridos para atingir um desempenho de instrumentação adequada. Os requisitos mais importantes podem ser resumidos como:

- Autonomia do sensor;
- Aquisição e transmissão de dados em tempo real;
- Baixo custo;
- Confiabilidade dos dados.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em 8 capítulos. O primeiro capítulo é voltado para a introdução ao tema, assim como os principais objetivos e a motivação que leva esse trabalho a contribuir para estudo da dinâmica das estruturas, além da apresentação das metodologias sobre as quais o trabalho está pautado.

O segundo capítulo apresenta o panorama dos estudos voltados ao sensoriamento sem fio de baixo custo que estão em andamento, tornando possível o posicionamento desse trabalho em um cenário global de desenvolvimento.

No terceiro capítulo, apresenta-se o sensoriamento sem fio, fazendo o estudo de cada componente e tecnologia necessárias para que o protótipo possa funcionar eficientemente. Nesse capítulo será estudado inicialmente os computadores de placa única, tendo como foco principal os modelos Raspberry Pi. Em seguida, o estudo sobre as redes sem fio, que é um dos principais desafios encontrados, abordando o envio de dados, métodos de transmissão, tipos de rede e protocolos. E por último, o estudo dos sensores de aceleração, os acelerômetros, abordando o que são sensores, quais os tipos de acelerômetro, e o que significam as especificações dos acelerômetros.

O quarto capítulo é voltado ao estudo dos sistemas cabeados de acelerômetros já existentes e consolidados no mercado de instrumentação, que já são utilizados amplamente por fornecerem resultados satisfatórios e confiáveis.

No quinto capítulo, apresentam-se os hardwares e os softwares escolhidos para compor o protótipo que será apresentado nesse trabalho, assim como os detalhes específicos desses componentes. Seguido pela apresentação dos métodos utilizados como base para esse trabalho e as técnicas utilizadas para tratar os dados recebidos do acelerômetro para que possam ser refinados e transformados em parâmetros comparáveis.

O sexto capítulo é dedicado aos ensaios realizados em laboratório, mostrando detalhadamente o processo de instrumentação, assim como a execução dos ensaios com as respectivas comparações. O sétimo capítulo é dedicado às conclusões e a avaliação dos resultados, com a validação ou não do protótipo proposto nesse trabalho.

2 Revisão Bibliográfica

O sensoriamento sem fio é uma tecnologia que vem atraindo a atenção de pesquisadores em todo o mundo. A transmissão sem fio de dados é um grande avanço tecnológico para todas as áreas de sensoriamento. Tornar viável o sensoriamento remoto abre um leque de aplicações que não seriam possíveis com sistemas tradicionais cabeados, como o caso de aeronaves, onde se deseja saber em terra o estado da aeronave em voo (Bai, 2005). Com essa motivação, muitos estudos foram desenvolvidos, contribuindo para o avanço dessa tecnologia.

Xu et al (2004) mostram que os sensores sem fio possuem um potencial ainda não explorado para o monitoramento estrutural. O desenvolvimento da engenharia estrutural depende da disponibilidade de equipamentos que gerem dados capazes de dar suporte aos novos métodos de detecção e localização de dano.

Geralmente, o sistema consiste em um único equipamento que suporta um determinado número de canais de comunicação, sendo cada canal conectado a um único sensor. Os dados adquiridos são um conjunto de informações que englobam a resposta estrutural, as vibrações ambientais, as vibrações forçadas, e também os ruídos do equipamento.

Ainda em seu trabalho, Xu et al (2004) consideram que as redes sem fio possuem um grande potencial para substituir definitivamente os sistemas tradicionais cabeados de instrumentação. Os sensores possuiriam a liberdade em não usar cabos, possibilitando uma instrumentação muito mais flexível à particularidade de cada estrutura.

Por outro lado, alguns fatores dificultam a implementação definitiva das redes de sensoriamento sem fio, apresentando desafios que buscam ser superados. Como exemplo, tem-se o fornecimento de energia limitado, visto que não existem cabos para conduzir energia para o funcionamento do sistema. Outros desafios incluem as limitadas bandas de frequência de comunicação, as elevadas perdas de dados em ambientes de interferência e a dificuldade de sincronização de múltiplos sensores.

Algumas soluções para esses desafios são encontradas na literatura, sendo que a maioria delas ainda se encontra em desenvolvimento. Pandey et al. (2016) sugerem a geração de energia para os sensores através do aproveitamento da vibração da própria estrutura. A implementação de pequenas placas solares também é uma solução inteligente para algumas aplicações. Porém, para ambientes com baixa incidência solar, esta alternativa pode não ser a mais satisfatória.

Assim, para que esses sensores sem fio possam ser utilizados em estruturas reais, e aparecerem como potenciais substitutos aos sistemas tradicionais cabeados, os autores (Pandey et al, 2016; Sindhu et al, 2015; Xu et al, 2004) sugerem pré-requisitos de desempenho para uma instrumentação adequada.

- **Autonomia do sensor:** a escolha dos componentes eletrônicos adequados é de grande importância para definir a autonomia do sensor. Utilizar módulos com baixo consumo de energia e uma plataforma que permita formas variadas de alimentação, como por exemplo o uso de bateria externa e sistemas energéticos sustentáveis;
- **Aquisição e transmissão de dados em tempo real:** necessário em muitos casos de SHM, quando o usuário envia o pedido de leitura remotamente através de um módulo de aquisição de dados, o sistema deve ser capaz de receber as ordens do usuário a partir do módulo remoto e enviar dados de aquisição em tempo real para que o usuário possa caracterizar o que está acontecendo naquele instante na estrutura em interesse, e possa assim tomar decisões;
- **Baixo custo:** os componentes físicos devem estar consolidados no mercado, com preços acessíveis, e assim como os softwares devem ser preferencialmente de distribuição gratuita;
- **Confiabilidade dos dados:** abrange vários fatores como o ruído, a perda de dados, a sensibilidade, a faixa de frequência e a duração da aquisição de dados. O ruído pode variar de acordo com a qualidade do acelerômetro, a forma de aquisição de dados, e até mesmo do envio, pela forma como os dispositivos são conectados e o formato com que os dados são enviados. Apesar da diminuição do ruído com a remoção dos cabos, a perda de dados acontece especialmente em comunicações sem fios. A perda de dados pode ocorrer caso os equipamentos não estejam devidamente sincronizados, ou caso haja alguma incompatibilidade entre os dispositivos, ou existência de interferências, entre outros fatores. É interessante notar que a frequência de amostragem e a duração do ensaio sejam definidas pelo usuário antes da tomada de dados, visando atender às inúmeras possibilidades de instrumentação que pedem diferentes parâmetros de amostragem. Dessa forma, para garantir a confiabilidade dos dados, é necessário que o usuário respeite o teorema de amostragem de Nyquist-Shannon para a definição da frequência de amostragem e o tempo de aquisição.

Abdelgawad et al (2017) apresenta a importância do conceito *Internet of Things* para sistema de Monitoramento de Integridade Estrutural com base na conectividade dos sensores a rede mundial de computadores. Para isso propõe a utilização de um protótipo baseado em Raspberry Pi 2 visando a detecção de danos em placas de alumínio. O sensor utilizado não foi o acelerômetro para a detecção de danos, e sim um sensor de pulsos para avaliar através do método *pulse-echo*. O modelo proposto foi capaz de diferenciar a presença de dano da não existência com 0% de erro, com 1,03% de erro na localização do dano, e 8,43% de erro ao mensurar o dano. Porém, os resultados do protótipo proposto não foram comparados com os resultados de um acelerômetro convencional.

Varanis et al (2016) propõe a análise de vibrações mecânicas no domínio do tempo e no domínio da frequência utilizando a plataforma Arduino. O trabalho possui validar a utilização para fins educacionais, sendo que em seu trabalho comparou os resultados experimentais com os resultados obtidos através da modelagem, utilizando três casos, uma viga engaste-livre, uma viga engaste-apoio, e uma viga engaste-engaste. O acelerômetro utilizado foi o MPU-6050, e os resultados se mostraram suficientes para o uso educacional, levando em consideração a sua acurácia e o baixo custo.

Afsana et al (2018) propõe uma rede sem fio de sensores para detecção de fissuras em estruturas de concreto. Para isso sugere a utilização do Raspberry Pi 3 Model B, juntamente com um sensor de vibração não especificado. Chama a atenção o fato de utilizar um modem GSM para realizar a comunicação remota com o usuário, fazendo o *upload* dos dados de sensorialmente em uma página *web*. O trabalho não possui resultados de ensaio, e se baseia apenas na indicação das peças para montagem de um protótipo, sendo que muitos trabalham atualmente caminham nessa direção, como é o caso de Shachi et al (2015) e Chandankhede (2017).

Eler Filho (2014) apresenta “uma proposta de sistema sem fio de baixo custo para análise de integridade de estruturas civis que se enquadrem nas necessidades e perspectivas brasileiras”. A finalidade da proposta é amostrar dados provenientes de acelerômetros instalados em uma estrutura e enviá-los através de uma rede *wireless* para uma central, onde os dados são tratados pelo usuário com algoritmos de identificação estrutural.

Microcontroladores são utilizados individualmente em cada nó de instrumentação como forma de realizar a coordenação dos componentes locais, como sensor e antena, e a

comunicação com os componentes remotos. A plataforma escolhida no trabalho foi o Arduino Nano, principalmente pelo seu tamanho reduzido.

Dessa forma, o protótipo foi montado sobre um microcontrolador Atmel ATmega 328. O sensor acelerômetro MPU-6050 foi utilizado juntamente com a placa GY-521, que possui regulador de tensão e condicionador de sinal para facilitar a implantação do sensor. O módulo XBee foi utilizado para a comunicação sem fio, que utiliza o protocolo ZigBee para a transmissão dos dados. Todos os componentes foram soldados em uma única placa, as unidades de aquisição e transmissão prontas são mostradas na Figura 2.1.

O trabalho de Eler Filho (2014) encontrou como barreira em seu protótipo a baixa taxa de amostragem, que resultaram em frequências mal identificadas, e a baixa confiabilidade dos dados, com perda significativa de dados durante o envio.

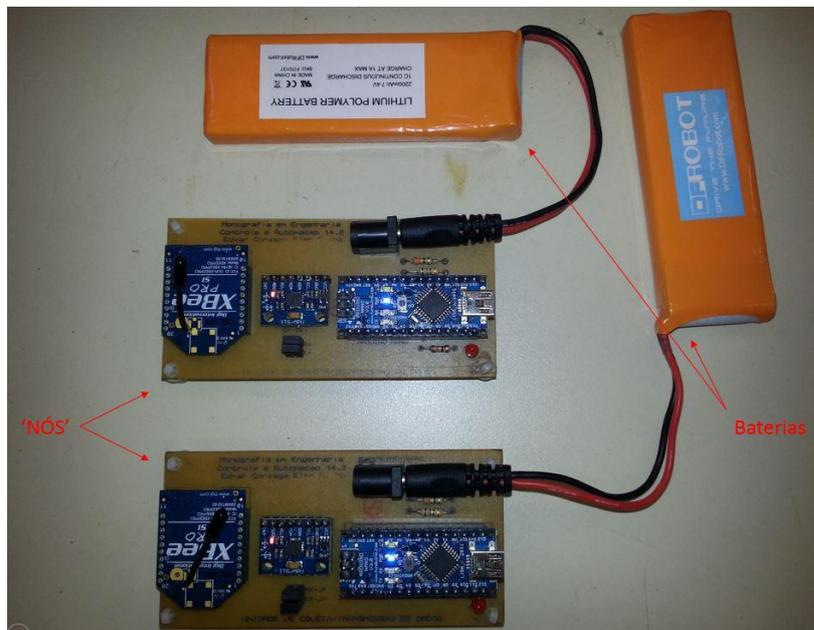


Figura 2.1 – Unidades de aquisição/transmissão de dados (Eler Filho, 2014)

Galdino (2016) apresentou um sistema de aquisição com a proposta de substituir a plataforma Arduino Nano por outra que fosse mais robusta, com o objetivo de contornar a limitação da taxa de aquisição. A robustez foi aprimorada ao utilizar a plataforma Arduino DUE, conforme mostra a Figura 2.2, e o sensor escolhido foi igualmente o MPU-6050.

O modelo proposto foi avaliado através da comparação com um acelerômetro comercial, e os resultados mostraram a sua potencialidade. O custo real de todo o sistema ficou em R\$450, enquanto o acelerômetro comercial utilizado para comparação estava na faixa de R\$3.000-R\$5.000.

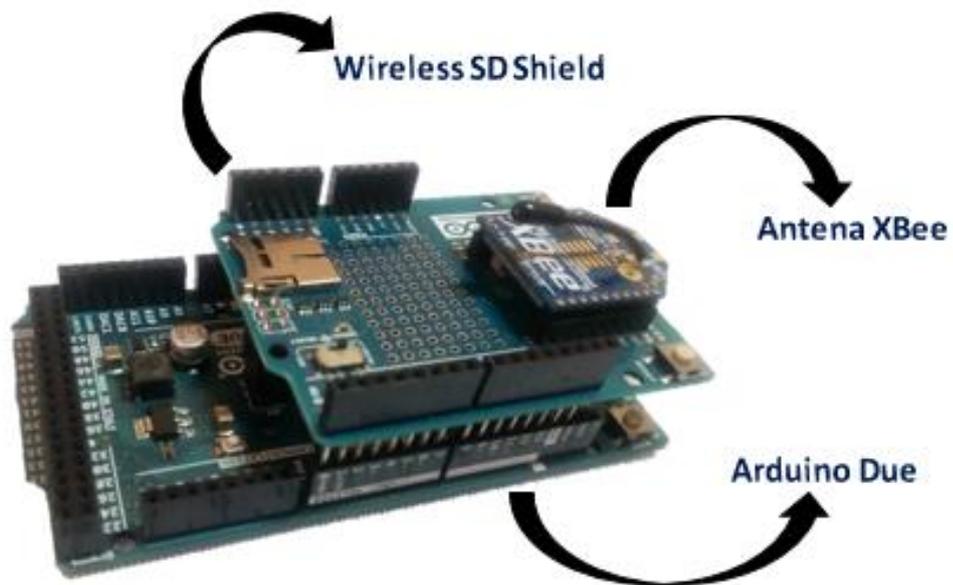


Figura 2.2 – Sensor Acelerômetro Protótipo (Galdino, 2016)

Ainda segundo o autor, o sistema proposto ainda precisaria receber melhorias como forma de otimizar o produto final. Em termos de robustez, a plataforma Arduino DUE foi suficiente para a aplicação em monitoramento estrutural. Entretanto, o protocolo escolhido (ZigBee), mostrou-se um limitador na transmissão sem fio dos dados quando trabalhando com frequências maiores que 100 Hz. Tal limitação seria pior quanto maior o número de sensores na estrutura, o que seria um grande problema para aplicações em monitoramento estrutural, nas quais geralmente são utilizados múltiplos sensores.

3 Instrumentação sem fios

A instrumentação sem fios surge como uma forma de revolucionar o modo como os sistemas de instrumentação são implementados. Como referido anteriormente, essa forma de transmissão de dados possibilita vencer barreiras físicas que antes não eram possíveis, como paredes e áreas de difícil acesso. Os dispositivos de sensoriamento sem fio começam a ser encontrados cada vez mais no mercado, mostrando a tendência da substituição dos cabos pela comunicação *wireless*. Concomitantemente, acontece a evolução das tecnologias de transmissão de dados sem fio com equipamentos mais robustos, novos protocolos e a otimização de protocolos já existentes.

Para o caso dos acelerômetros *wireless*, é necessário estabelecer os equipamentos que devem estar na estrutura junto com o sensor para que ele funciona remotamente. Os sensores não possuem autonomia para administrar todo o processo de aquisição, conversão, armazenagem e transmissão. Assim, torna-se necessária a presença de um equipamento para coordenar cada uma dessas etapas.

É indispensável, também, a presença do sensor propriamente dito, que transforme as variações físicas do ambiente em grandezas elétricas. Assim como é preciso que exista um conversor A/D no protótipo, para que o sinal analógico do sensor seja convertido em sinal digital antes do envio sem fio. Outro componente do sensor é o módulo de comunicação sem fio (uma antena, por exemplo), peça responsável pela conectividade entre a estrutura e o usuário.

Desta forma, o presente capítulo apresenta uma descrição detalhada dos componentes e tecnologias empregadas na concepção do protótipo (acelerômetro sem fio) desenvolvido neste trabalho, a saber: computador de placa única (Raspberry Pi), redes sem fio e sensores de aceleração.

3.1 Computador de Placa Única - Raspberry Pi

Um computador de placa única (SBC – *single-board computer*) é um computador completo construído em uma única placa de circuito, com microprocessador, memória, entrada/saída (E/S) e outros recursos necessários para um computador funcional. Os computadores de placa única foram feitos como sistemas de demonstração ou desenvolvimento,

para sistemas educacionais ou para uso como controladores de sistemas embarcados. Muitos tipos de equipamentos domésticos (*e.g. smart TVs*) ou computadores portáteis (*e.g. smartphones*) integram todas as suas funções em uma única placa de circuito impresso.

Ao contrário de um computador pessoal de mesa, os computadores de placa única geralmente não dependem de *slots* para funções periféricas ou expansão e são autossuficientes em hardware para seu funcionamento. Computadores de placa única foram criados usando uma ampla gama de microprocessadores. Projetos simples, geralmente usam RAM estática (SRAM) e processadores de 8 ou 16 bits de baixo custo.

Os computadores de placa única foram possíveis graças ao aumento da densidade dos circuitos integrados. Uma configuração de placa única reduz o custo total de um sistema, reduzindo o número de placas de circuito exigidas e eliminando conectores e circuitos que de outra forma seriam usados. Ao colocar todas as funções em uma única placa, um sistema menor pode ser obtido. Os conectores são uma fonte frequente de problemas no sistema, de modo que um sistema de placa única elimina essa possibilidade.

O Raspberry Pi se propõe a ser uma série de computadores de placa única desenvolvido para promover o ensino da informática básica nas escolas e nos países em desenvolvimento. Começou a ser desenvolvido no Reino Unido pela *Raspberry Pi Foundation* e o modelo original se tornou mais popular do que era esperado, sendo utilizado em aplicações que extrapolavam a sua pretensão inicial, como por exemplo, a robótica. De acordo com a fundação que desenvolve o Raspberry Pi, mais de 19 milhões de SBC (*single-board computers*) foram vendidos até março de 2018.

No ano de 2017, a velocidade de processamento variava entre 700MHz e 1,4GHz e a memória RAM entre 256MB e 1GB, sendo que os computadores recebem melhorias ano após ano. O Raspberry Pi 3 Model B, mostrado na Figura 3.1, foi o último a ser lançado e possui as especificações mais robustas se comparado aos seus antecessores. Este modelo será detalhado nas seções posteriores.

Todos os modelos desenvolvidos possuem características únicas. Por outro lado, também possuem especificações que são mantidas e caracterizam o produto. Nesse último aspecto, ressalta-se a proposta “*system on a chip*”, onde o hardware integrado na placa é suficiente para o funcionamento do sistema, o que inclui uma CPU (*Central Processing Unit*) integrada ARM e uma GPU (*Graphical Processing Unit*) que possibilita a utilização de interface gráfica, conforme mostra a Figura 3.2.

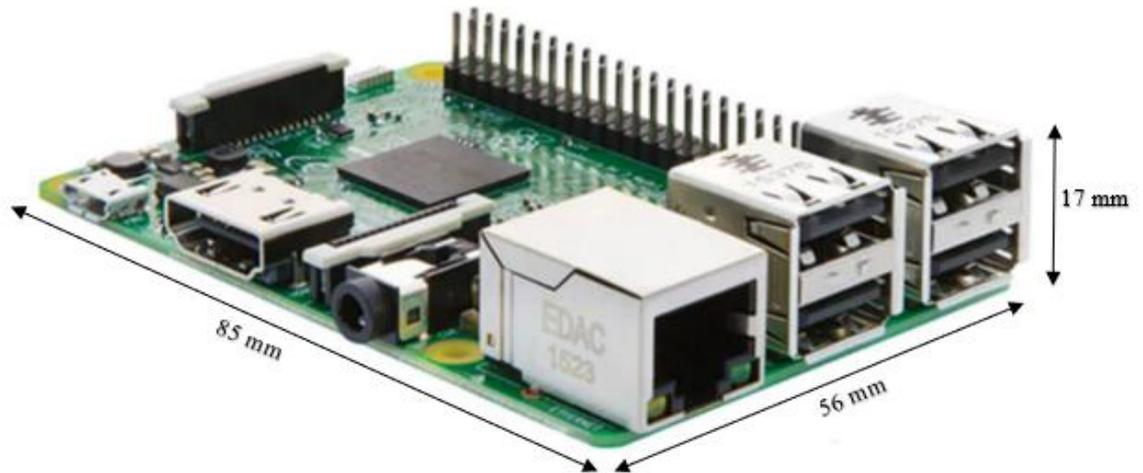


Figura 3.1 – Raspberry Pi 3

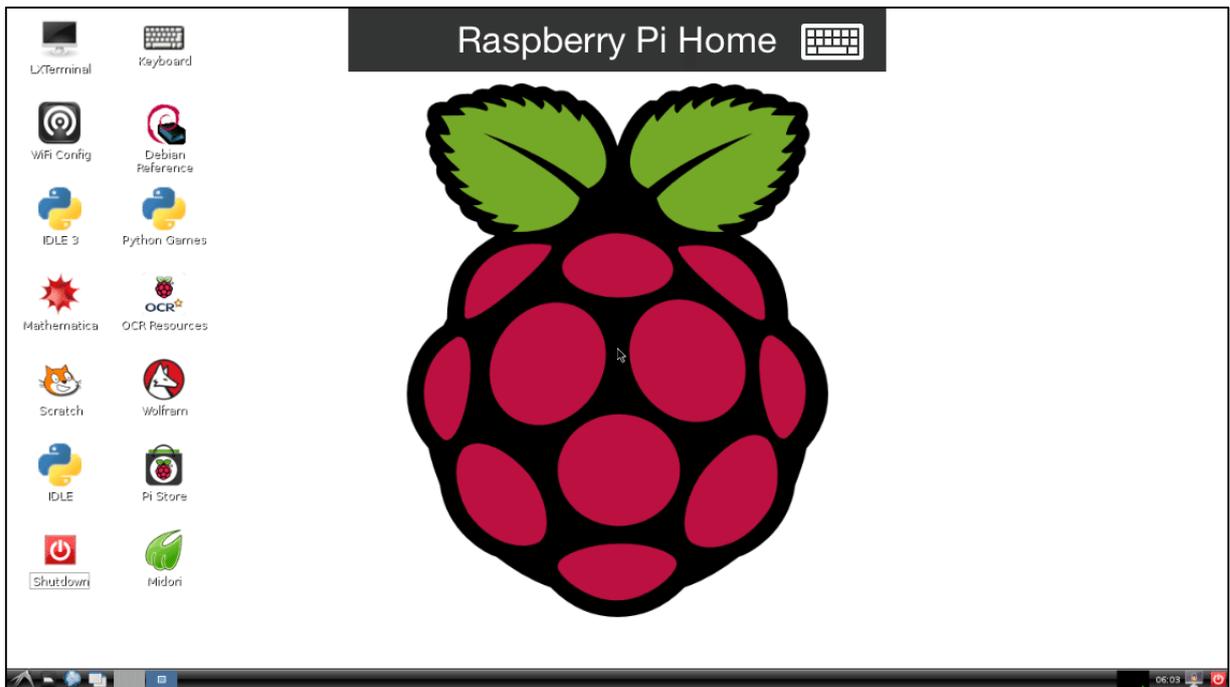


Figura 3.2 – Interface Gráfica SO Raspbian

3.1.1 Hardware

O hardware do Raspberry Pi recebe modificações com o passar do tempo para melhorar a sua performance. Essa evolução acontece principalmente na capacidade de processamento e de memória, além de oferecer suporte para novos periféricos, como por exemplo a adição de 2 portas USB no modelo 2, ou a adição do módulo Wi-Fi no modelo 3. Todas as informações de *hardware* e a evolução dos modelos e gerações podem ser vistas na tabela 3.1.

	Raspberry Pi 1	Raspberry Pi 2	Raspberry Pi 3
Arquitetura	ARMv6Z (32-bit)	ARMv7-A (32-bit) <i>ou</i> ARMv8-A (64/32-bit)	ARMv8-A (64/32-bit)
SoC	BroadcomBCM2835	BroadcomBCM2836 <i>ou</i> BroadcomBCM2837	BroadcomBCM2837
CPU	700 MHz single-core ARM1176JZF-S	900 MHz 32-bit quad-core ARM Cortex-A7 <i>ou</i> 900 MHz 64-bit quad-core ARM Cortex-A53	1.2 GHz 64-bit quad-core ARM Cortex-A53
RAM	256 MB <i>ou</i> 512 MB	1 GB	1 GB
Rede	Sem conexão de rede <i>ou</i> 10/100 Mbit/s Ethernet	10/100 Mbit/s Ethernet	10/100 Mbit/s Ethernet 802.11n wireless Bluetooth 4.1
Corrente	200mA até 700mA	220mA até 820mA	300mA até 1340mA
Consumo	1W até 3,5W	1,1W até 4,1W	1,5W até 6,7W

Tabela 3.1 – Evolução de Hardware Raspberry Pi (Raspberry Pi, 2018)

3.1.2 Processador

A primeira geração foi lançada com um SoC BCM2835, com microprocessador ARM1176JZF-S que possibilitava uma capacidade de processamento de 700 MHz em arquitetura ARMv6. Neste trabalho, não se levará em consideração a GPU e a sua evolução, já que não será necessária uma interface gráfica robusta para o desenvolvimento de uma rede de acelerômetros sem fio.

A segunda geração foi lançada com o BCM2836, com microprocessador ARM Cortex-A7 com capacidade de 900 MHz em arquitetura 32 bits. E, por último, a terceira geração com o BCM2837B0, com um microprocessador ARM Cortex-A53 chegando a 1,4GHz em arquitetura 64 bits.

A capacidade processamento, em uma análise superficial, teria duplicado até a terceira geração. Porém, a terceira geração é descrita como 10 vezes mais rápida quando comparada à primeira e 1,8 vezes mais rápida que a segunda. Isso acontece devido à mudança de arquitetura e também a otimização na distribuição das operações durante o processamento.

A capacidade de *overclock* também sofreu alterações que poderiam aumentar o desempenho. Entretanto, como este trabalho se propõe a uma rede de sensoriamento sem fio que pode estar em funcionamento por dias, de forma ininterrupta, não é interessante levar o fator de *overclock* em consideração por questões de economia de energia.

3.1.3 RAM

A primeira geração dos computadores de placa única Raspberry Pi vinha com 512MB de memória RAM, o que foi melhorado para a segunda geração com 1GB DDR2, e mantido na terceira geração.

É interessante perceber que a memória RAM é de grande importância para o sistema de sensores sem fio de aceleração. Uma leitura de aceleração para cada eixo (vertical, transversal ou longitudinal) ocupa 2 bytes. Durante o processo de aquisição, é interessante que todas as leituras sejam armazenadas na memória RAM para que o processo fique mais rápido, até o momento em que o ensaio seja pausado e os dados sejam enviados via rede *wireless* ou armazenado em um disco rígido. Este último, em termos de velocidade de leitura e de gravação, é consideravelmente mais lento se comparado à memória RAM.

Para que 1GB de memória RAM se torne palpável à aplicação em um sistema de acelerômetros, considere-se o seguinte exemplo: para 24 horas ininterruptas de ensaio, seria possível armazenar 500 milhões de leituras, a uma taxa de amostragem de 1000Hz, registrando-se nos 3 eixos de aceleração e utilizando apenas 50% da memória RAM.

3.1.4 Rede

Esse aspecto é de extrema importância para o que se propõe nesta dissertação, visto que a transferência de dados se mostrou sempre como um limitador de eficiência em outros trabalhos relatados na literatura.

A primeira geração foi lançada com conexão Ethernet. Porém, alguns modelos foram modificados com a retirada dessa porta para redução de tamanho e ganho de desempenho. A segunda geração manteve a porta Ethernet e todos os demais modelos lançados mantiveram a possibilidade de conexão à *internet* por essa via. A terceira geração foi a que mais avançou no quesito de conexão sem fio.

A terceira geração do Raspberry Pi manteve a porta Ethernet e trouxe um módulo de conexão Wi-Fi 802.11 b/g/n/ac (o qual será explicado posteriormente), além de conexão pelo

protocolo Bluetooth 4.2. Essas opções de conexão, sendo duas sem fio, tornam possível que a comunicação dos sensores aconteça de forma múltipla ou escolhida de acordo com a que melhor se adapte à situação de instrumentação.

3.1.5 Periféricos

Todas as gerações de Raspberry Pi são compatíveis com mouse e teclado genéricos com conexão USB, além de possuírem saída de vídeo HDMI. Dessa forma, não apresentam diferenças significativas no processo de configuração inicial do equipamento, não sendo nesse caso um fator de escolha do modelo para a aplicação em rede de sensoriamento se fio.

3.1.6 Temporização

Nenhum dos modelos e gerações do Raspberry Pi possui relógio interno que funcione independentemente de o aparelho estar sendo alimentado por energia. Dessa forma, as informações de data e hora são perdidas sempre que o computador é desligado. Porém, o Raspberry Pi pode ser configurado para recuperar a data e hora via *internet* sempre que for ligado, sendo necessário uma conexão em funcionamento com a rede.

Outra possibilidade é o acoplamento de um módulo em *hardware* para manutenção da data e hora, com bateria externa que seja capaz de manter funcionamento apenas o relógio do módulo.

3.1.7 Sistema Operacional

A *Raspberry Pi Foundation* recomenda o uso do sistema operacional *Raspbian*, que é baseado no sistema operacional Linux. Outros SO são também disponibilizados para serem utilizados como *Ubuntu*, *Windows 10*, *OSMS*, *Libreelec*, entre outros.

Para a proposta desse trabalho, utiliza-se o *Raspbian* por ser o mais otimizado para o *hardware* e o menos automatizado para atualizações e procedimentos internos, evitando que tarefas em segundo plano sobrecarreguem o processador e atrasem as leituras no sensor.

3.2 Redes sem fio

A transferência de dados através de uma rede sem fios envolve três elementos distintos: os sinais de rádio, o formato dos dados e a estrutura da rede. Cada um desses elementos é

independente dos outros dois. Portanto, torna-se necessário definir todos os três quando se for estabelecer uma nova rede.

A estrutura de rede inclui os adaptadores de interface de rede sem fio e as estações de base que enviam e recebem os sinais de rádio. Numa rede sem fios, os adaptadores de interface de rede em cada computador e estação base convertem dados digitais em sinais de rádio, que transmitem para outros dispositivos na mesma rede. Esses últimos recebem e convertem os sinais de rádio de entrada para dados digitais novamente. Cada uma das formas de comunicação sem fios utiliza uma combinação diferente de sinais de rádio, formato de dados e estrutura de rede.

3.2.1 Métodos de Transmissão

Cada rede de dados sem fios opera num conjunto específico de radiofrequências. Por exemplo, a maioria das redes Wi-Fi opera em uma faixa especial de frequências de rádio em torno de 2,4 GHz que foi reservada na maior parte do mundo para serviços de rádio de espectro espalhado, ponto-a-ponto e não-licenciados. Outros sistemas Wi-Fi usam uma banda não-licenciada diferente, em torno de 5 GHz.

O serviço de rádio não licenciado significa que qualquer pessoa que utilize equipamentos que cumpram os requisitos técnicos podem enviar e receber sinais de rádio nessas frequências sem licença de estação de rádio. Ao contrário da maioria dos serviços de rádio, que exige licenças que concedem o uso exclusivo dessa frequência a um tipo específico de serviço e a um ou mais usuários específicos, um serviço sem licença é um serviço gratuito onde todo mundo tem uma igual reivindicação para as mesmas ondas. Em teoria, a tecnologia de rádio de espectro espalhado torna possível que muitos usuários coexistam sem interferências significativas.

Um serviço de rádio ponto-a-ponto opera em um canal de comunicação que transporta informação de um transmissor para um único receptor. O oposto de ponto a ponto é um serviço de *broadcast* que envia o mesmo sinal para muitos receptores ao mesmo tempo.

3.2.2 Protocolo Wi-Fi - IEEE 802.11a/b/g

Wi-Fi é uma tecnologia para redes locais sem fio com dispositivos baseados nos padrões IEEE 802.11. Wi-Fi é uma marca registrada da Wi-Fi Alliance, que restringe o uso do termo Wi-Fi Certified para produtos que passam completamente pelos testes de certificação de interoperabilidade.

Os dispositivos que podem utilizar a tecnologia Wi-Fi incluem computadores pessoais, consoles, smartphones, câmeras digitais, computadores tablets, reprodutores de áudio e impressoras modernas. Os dispositivos compatíveis com Wi-Fi podem se conectar à Internet por meio de uma rede WLAN e um ponto de acesso sem fio. A cobertura de pontos de acesso pode ser tão pequena quanto uma única sala com paredes que bloqueiam ondas de rádio, ou tão grande como muitos quilômetros quadrados alcançados usando múltiplos pontos de acesso sobrepostos.

Comumente a comunicação Wi-Fi acontece nas bandas de rádio de 2,4 GHz UHF e 5 GHz SHF IS. Sem conexões físicas a rede, é mais vulnerável a ataques do que conexões com fio, como a Ethernet. As páginas da Web que usam TLS (*Transport Layer Security*) são seguras, mas o acesso à Internet não criptografado pode ser facilmente detectado por intrusos. Para proteção, o Wi-Fi adotou várias tecnologias de criptografia. A criptografia inicial *Wired Equivalent Privacy* (WEP) provou ser fácil de quebrar. Protocolos de qualidade superior, como *Wi-Fi Protected Access* (WPA, WPA2) foram adicionados mais tarde. Um recurso opcional adicionado em 2007, chamado *Wi-Fi Protected Setup* (WPS), tinha uma falha grave que permitia a um invasor recuperar a senha do roteador em poucos minutos. A Aliança Wi-Fi desde então atualizou seu plano de testes e programa de certificação para garantir que todos os novos dispositivos certificados resistam a ataques.

No âmbito deste trabalho, foca-se apenas no protocolo Wi-Fi, utilizado para a transmissão sem fio de dados, no Raspberry Pi Model 3. Entretanto, outros microcontroladores, microprocessadores e computadores de placa única, tais como modelos Arduino, ESP8266, Waspnote e BeagleBone, existentes no mercado, são compatíveis com uma miríade de protocolos de comunicação.

Dentre esses protocolos, destacam-se: Bluetooth, UWB, ZigBee e Wi-Fi. As informações técnicas sobre protocolos e o material citado nessa seção estão amplamente disponíveis na literatura. Destaca-se, contudo, o trabalho de Lee et al. (2007) que realizaram um estudo comparativo e que é sucintamente descrito a seguir:

Comparativo entre protocolos

A Tabela 3.2 resume as principais diferenças entre os protocolos Bluetooth, UWB, ZigBee e Wi-Fi. Obviamente, o UWB e Wi-Fi fornecem uma taxa de dados mais alta, enquanto Bluetooth e ZigBee fornecem uma menor. Em geral, o Bluetooth, UWB e ZigBee são destinados à comunicação WPAN (cerca de 10 m), enquanto o Wi-Fi é orientado para WLAN (cerca de 100m). No entanto, o ZigBee também pode atingir 100m em algumas aplicações.

Standard	Bluetooth	UWB	ZigBee	Wi-Fi
IEEE spec.	802.15.1	802.15.3a *	802.15.4	802.11a/b/g
Frequency band	2.4 GHz	3.1-10.6 GHz	868/915 MHz; 2.4 GHz	2.4 GHz; 5 GHz
Max signal rate	1 Mb/s	110 Mb/s	250 Kb/s	54 Mb/s
Nominal range	10 m	10 m	10 - 100 m	100 m
Nominal TX power	0 - 10 dBm	-41.3 dBm/MHz	(-25) - 0 dBm	15 - 20 dBm
Number of RF channels	79	(1-15)	1/10; 16	14 (2.4 GHz)
Channel bandwidth	1 MHz	500 MHz - 7.5 GHz	0.3/0.6 MHz; 2 MHz	22 MHz
Modulation type	GFSK	BPSK, QPSK	BPSK (+ ASK), O-QPSK	BPSK, QPSK COFDM, CCK, M-QAM
Spreading	FHSS	DS-UWB, MB-OFDM	DSSS	DSSS, CCK, OFDM
Coexistence mechanism	Adaptive freq. hopping	Adaptive freq. hopping	Dynamic freq. selection	Dynamic freq. selection, transmit power control (802.11h)
Basic cell	Piconet	Piconet	Star	BSS
Extension of the basic cell	Scatternet	Peer-to-peer	Cluster tree, Mesh	ESS
Max number of cell nodes	8	8	> 65000	2007
Encryption	E0 stream cipher	AES block cipher (CTR, counter mode)	AES block cipher (CTR, counter mode)	RC4 stream cipher (WEP), AES block cipher
Authentication	Shared secret	CBC-MAC (CCM)	CBC-MAC (ext. of CCM)	WPA2 (802.11i)
Data protection	16-bit CRC	32-bit CRC	16-bit CRC	32-bit CRC

* Unapproved draft.

• Acronyms: ASK (amplitude shift keying), GFSK (Gaussian frequency SK), BPSK/QPSK (binary/quadrature phase SK), O-QPSK (offset-QPSK), OFDM (orthogonal frequency division multiplexing), COFDM (coded OFDM), MB-OFDM (multiband OFDM), M-QAM (M-ary quadrature amplitude modulation), CCK (complementary code keying), FHSS/DSSS (frequency hopping/direct sequence spread spectrum), BSS/ESS (basic/extended service set), AES (advanced encryption standard), WEP (wired equivalent privacy), WPA (Wi-Fi protected access), CBC-MAC (cipher block chaining message authentication code), CCM (CTR with CBC-MAC), CRC (cyclic redundancy check).

Tabela 3.2 – Comparação de Protocolos (Lee et al, 2007)

O tempo de transmissão depende da taxa de dados, do tamanho da mensagem e da distância entre os dois nós. Porém os parâmetros típicos dos quatro protocolos sem fios desta seção estão listados na Tabela 3.3. Vale ressaltar que a taxa máxima de dados do UWB de 110 Mbit/s é adotada a partir de um padrão 802.15.3a não aprovado pelo IEEE. O tempo de transmissão para o ZigBee é mais longo do que os outros devido à menor taxa de dados (250 Kbit / s), enquanto UWB requer menos tempo de transmissão em comparação com os outros.

Standard	Bluetooth	UWB	ZigBee	Wi-Fi
IEEE Spec.	802.15.1	802.15.3	802.15.4	802.11a/b/g
Max data rate (Mbit/s)	0.72	110*	0.25	54
Bit time (μ s)	1.39	0.009	4	0.0185
Max data payload (bytes)	339 (DH5)	2044	102	2312
Max overhead (bytes)	158/8	42	31	58
Coding efficiency ⁺ (%)	94.41	97.94	76.52	97.18
* Unapproved 802.15.3a.	* Where the data is 10K bytes.			

Tabela 3.3 – Parâmetros para os protocolos sem fio (Lee et al, 2007)

Sobre o consumo de energia, o Bluetooth e ZigBee destinam-se a produtos portáteis, distâncias curtas e pouca bateria. Consequentemente, oferece um consumo de energia muito baixo e, em alguns casos, não afetará de forma significativa a duração da bateria. O UWB é proposto para pequenas distâncias e aplicações de alta taxa de dados, assim como o Wi-Fi para uma conexão mais longa e normalmente utilizado em dispositivos com uma fonte de alimentação substancial.

Os consumos de correntes das condições de transmissão (TX) e de recepção (RX) para cada protocolo são mostrados na Tabela 3.4. Os dados apresentados são para produtos particulares que utilizam os protocolos. Embora sejam amplamente representativos, podem haver variações entre diferentes módulos. O consumo de energia está na unidade mW para cada protocolo.

Standard	Bluetooth	UWB	ZigBee	Wi-Fi
Chipset	BlueCore2	XS110	CC2430	CX53111
VDD (volt)	1.8	3.3	3.0	3.3
TX (mA)	57	~227.3	24.7	219
RX (mA)	47	~227.3	27	215
Bit rate (Mb/s)	0.72	114	0.25	54

Tabela 3.4 – Consumo de energia para cada protocolo (Lee et al, 2007)

Os protocolos Bluetooth e ZigBee consomem menos energia em comparação com o UWB e Wi-Fi, conforme a Figura 3.3. Porém com base na taxa de bits, é possível normalizar esses dados pela divisão com a *Bitrate* respectiva, proporcionando uma comparação do consumo de energia pela quantidade de Mb/s. Desse ponto de vista, o UWB e o Wi-Fi têm uma melhor eficiência no consumo de energia, conforme mostra a Figura 3.4.

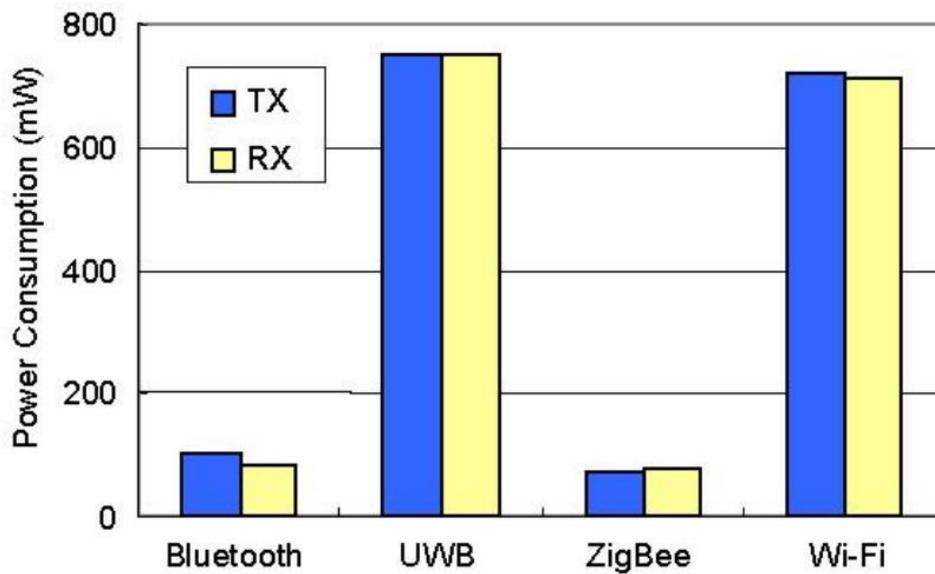


Figura 3.3 – Consumo energético para cada protocolo (Lee et al, 2007)

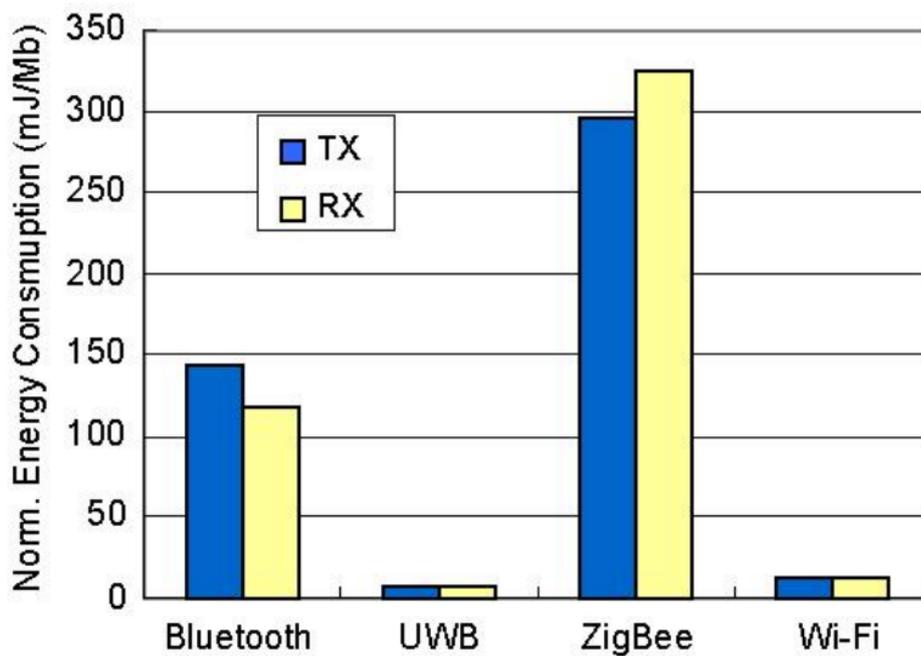


Figura 3.4 – Comparação do consumo energético normalizado (Lee et al, 2007)

Em resumo, o Bluetooth e o ZigBee são adequados para aplicações de baixa taxa de dados e com pouco fornecimento energético, devido ao seu baixo consumo de energia, levando a uma longa vida útil. Por outro lado, para implementações de alta taxa de dados, UWB e Wi-Fi seriam melhores soluções devido aos seus baixos consumos de energia normalizados.

Isto posto, justifica-se, portanto, a adoção do Wi-Fi como protocolo de transmissão sem fios de dados neste trabalho.

3.3 Sensores de aceleração

Sensores/transdutores são elementos físicos capazes de captar variações físicas e transforma-las em sinais ou impulsos elétricos. A escolha dos sensores é parte primordial em um projeto de instrumentação, já que é preciso identificar a aplicação de cada tipo sensor, assim como se a sua precisão atende às especificações de projeto. Nesta seção, foca-se especialmente nos sensores de aceleração (acelerômetros), responsáveis por medir a aceleração de objetos e superfícies.

Na Figura 3.5, é possível ver um ensaio sob grandes acelerações onde diferentes sensores são utilizados, inclusive os acelerômetros. No mercado, dispõe-se de acelerômetros que podem medir a aceleração em um, dois ou três eixos ortogonais simultaneamente. Eles são normalmente usados em um dos três modos:

- Como medida inercial de velocidade e posição;
- Como sensor de inclinação, rotação ou orientação em 2 ou 3 dimensões, referenciado a partir da aceleração da gravidade;
- Como sensor de vibração ou impacto.



Figura 3.5 – Uso de acelerômetros para sensoriamento de impacto

A maior parte dos acelerômetros são sensores microeletromecânicos, ou *Micro-Electro-Mechanical Sensors* (MEMS). O princípio básico da operação por trás dos acelerômetros MEMS é o deslocamento de uma pequena massa de prova implantada na superfície de silício do circuito integrado e suspensa por pequenas vigas flexíveis, como mostra a Figura 3.6. De

acordo com a segunda lei de movimento de Newton, à medida que uma aceleração é aplicada ao dispositivo, uma força também desloca a massa. As vigas de suporte atuam como uma mola, e o fluido preso dentro do circuito integrado age como um amortecedor, resultando em um sistema massa-mola-amortecedor.

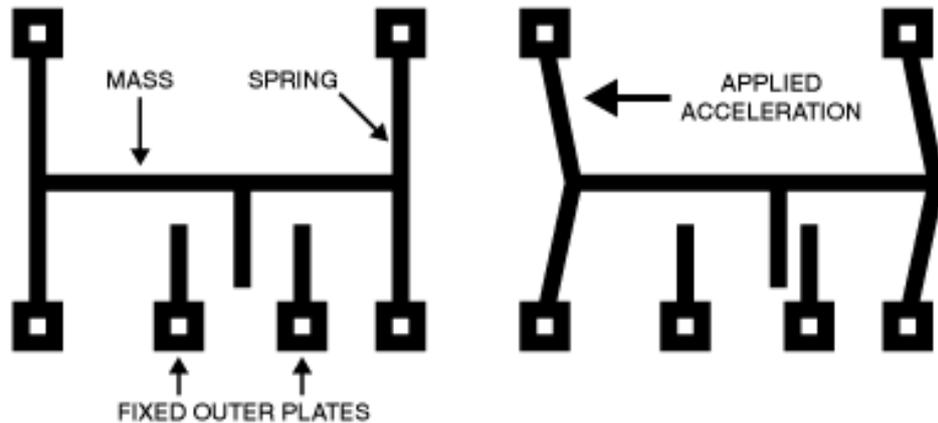


Figura 3.6 – Acelerômetro MEMS simplificado (Mouser Eletronics, 2018)

3.3.1 Tipos de acelerômetro

Existem vários princípios diferentes sobre os quais um acelerômetro analógico pode ser construído. Duas tecnologias muito comuns para detectar o deslocamento da massa de prova, proporcional à aceleração aplicada, são os sensores de aceleração capacitivos e os piezoelétricos.

Capacitivo

Acelerômetros que implementam sensores capacitivos produzem uma tensão dependente da distância entre duas superfícies planas. Uma ou ambas destas superfícies são carregadas com uma carga elétrica, e ao alterar a distância entre as placas, a capacitância elétrica do sistema também é alterada, que pode ser medida como uma saída de tensão. Este método de detecção é conhecido por sua elevada precisão e estabilidade. Os acelerômetros capacitivos são conhecidos por alcançarem grandes faixas de aceleração, que podem chegar até a 1000g, e também por serem aptos a realizar medições estáticas.

Quando certos tipos de cristais são comprimidos, cargas de polaridade oposta se acumulam em lados opostos do cristal, isso é conhecido como efeito piezoelétrico. Dessa forma a detecção piezoelétrica da aceleração é natural uma vez que a aceleração é diretamente

proporcional à força. Em um acelerômetro piezoelétrico a carga acumula-se no cristal sendo traduzida e amplificada para uma corrente ou tensão de saída.

De acordo com Doscher (2015), os acelerômetros baseados em efeitos piezoelétricos são melhor utilizados para medir fenômenos com alta variabilidade de aceleração como vibração ou impacto, em vez de fenômenos como a aceleração da gravidade e acelerações constantes. São conhecidos por alcançarem uma grande faixa de frequência, que chega até a ordem de grandeza de Megaheartz (MHz).

Outros tipos

Os acelerômetros piezo-resistivos, ou acelerômetros de *strain-gage*, funcionam medindo a resistência elétrica de um material quando uma deformação mecânica surge. Eles são preferidos em aplicações de maior amplitude e dessa forma podem medir acelerações de frequências próximas de 0 Hz. No entanto, eles têm uma resposta de alta frequência limitada.

Os acelerômetros de transferência de calor consistem numa única fonte de calor centrada num substrato e suspensa na cavidade. Eles incluem termoresistores igualmente espaçados nos quatro lados da fonte de calor. Eles medem as mudanças internas no calor devido a uma aceleração. Quando houver uma aceleração nula, o gradiente de calor será simétrico. Caso contrário, sob aceleração, o gradiente de calor se tornará assimétrico devido à transferência de calor por convecção.

3.3.2 Especificações

Um acelerômetro geralmente é caracterizado pelos seguintes aspectos e especificações:

Analógico ou digital

A especificação mais importante de um acelerômetro para uma dada aplicação é o seu tipo de saída. Os acelerômetros analógicos produzem uma variação constante de tensão dependendo da quantidade de aceleração aplicada. Os acelerômetros digitais mais antigos produzem uma onda quadrada de frequência variável, um método conhecido como PWM. Um acelerômetro modulado em largura de pulso toma leituras a uma taxa fixa, tipicamente 1000 Hz. O valor da aceleração é proporcional à largura de pulso do sinal PWM, como mostrado na Figura 3.7. Os acelerômetros digitais mais recentes possuem uma forma mais confiável de transmitir os valores usando protocolos digitais multi-fios, como I2C ou SPI.

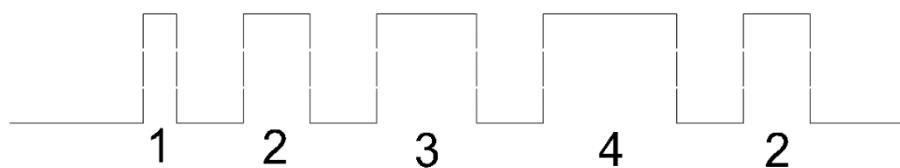


Figura 3.7 – Modulação por largura de pulso (PWM)

Número de eixos

Estão disponíveis no mercado acelerômetros que medem em uma, duas ou três direções. Os acelerômetros mais comuns eram os de um único eixo, porém os acelerômetros de três eixos são cada vez mais comuns e baratos. A vantagem em utilizar acelerômetros com medição em três eixos é diminuir em algumas aplicações o número de sensores na instrumentação, diminuindo em até 1/3 o número de sensores.

Faixa de aceleração

A faixa de aceleração é a aceleração máxima e mínima que o acelerômetro pode medir. Para um sensor de inclinação, ou para medir a aceleração da gravidade, $\pm 1,5g$ seria suficiente. Porém, para a medição de impactos e aplicações gerais, $\pm 5g$ pode ser desejável.

Sensibilidade

A sensibilidade é um indicador da variação do sinal de saída em função da variação de aceleração no ambiente. Em um acelerômetro mais sensível, uma pequena variação de aceleração provocaria uma grande variação no sinal de saída.

Faixa dinâmica

A faixa dinâmica é composta pela menor aceleração em módulo detectável pelo acelerômetro e a maior aceleração em módulo detectada antes dos valores serem distorcidos ou cortados no sinal de saída.

Largura de banda

A largura de banda de um sensor é geralmente medida em Hertz e indica o limite de frequência de resposta do sensor, ou quantas vezes uma leitura confiável pode ser tomada em um segundo caso esteja em Hz.

Os seres humanos não podem criar movimentos corporais muito além da faixa de 10-12 Hz. Por esta razão, uma largura de banda de 24 Hz já seria suficiente de acordo com o teorema de amostragem de Nyquist-Shannon, porém usualmente uma frequência de 40-60Hz seria

adequada para um sensor de movimento humano. Para medição de vibração ou leitura precisa de forças de impacto, a largura de banda deve estar na faixa de centenas de Hertz.

Deve-se notar, também, que para alguns microcontroladores mais antigos, a largura de banda de um acelerômetro pode estender-se para além da frequência dos conversores A/D no MCU, não respeitando o teorema da amostragem de Nyquist-Shannon. Portanto para uma largura de banda maior do que é suportada pelo microprocessador, o sinal digital pode sofrer um processo de *aliasing*. Isso pode ser corrigido com filtragem passiva simples antes da amostragem, ou simplesmente escolhendo um microcontrolador melhor.

Estabilidade de amplitude

A estabilidade de amplitude não é uma especificação propriamente dita, mas uma descrição de diversas especificações. A estabilidade de amplitude do sensor mostra a sensibilidade das especificações anteriores às variações externas de ambiente, que podem surgir na forma de temperatura, o tempo de execução e a forma como foi implantado.

Massa

A massa do acelerômetro deve ser significativamente menor do que a massa do sistema que estiver sendo monitorado de forma que a massa do acelerômetro não modifique as características mecânicas do objeto em estudo.

3.3.3 Saídas

O dado de saída de um acelerômetro é um valor escalar correspondente à magnitude do vetor aceleração. A aceleração mais comum é a aceleração resultante do campo gravitacional da Terra. Essa aceleração é uma referência comum a partir da qual todas as outras acelerações são mensuradas, dando origem à unidade g, ou aproximadamente $9,81 \text{ m/s}^2$.

Saída Digital

Acelerômetros com saída PWM podem ser usados de duas maneiras diferentes. Para resultados mais precisos o sinal PWM pode ser introduzido diretamente no microcontrolador onde o sinal modulado é lido pela entrada PWM e traduzido num valor de aceleração escalonado. Quando um microcontrolador com entrada PWM não está disponível, ou quando outros meios de digitalizar o sinal estão sendo usados, um simples filtro de reconstrução RC pode ser usado para obter um sinal analógico, sendo a tensão proporcional à aceleração. Estando o acelerômetro em repouso absoluto, a tensão de saída não representará aceleração, valores de

tensão mais elevados representarão uma aceleração positiva e valores inferiores indicam aceleração negativa. Essas tensões podem então ser dimensionadas e usadas como se a tensão de saída viesse de saída analógica. Uma desvantagem da saída digital é a necessidade de recursos de temporização do microcontrolador para medir o ciclo de funcionamento do sinal PWM.

Saída Analógica

Quando comparado com a maioria dos outros sensores industriais, acelerômetros analógicos possuem uma comunicação mais simples, usando apenas um conversor A/D no microcontrolador. Tipicamente, o sinal de saída do acelerômetro necessitará de uma calibração, amplificação e filtragem. Para a saída de tensão dos acelerômetros analógicos, o sinal pode ser uma tensão positiva ou negativa, dependendo da direção da aceleração. Além disso, o sinal é contínuo e proporcional à grandeza de aceleração. Tal como acontece com qualquer sensor destinado a um conversor analógico para digital, o valor deve ser dimensionado e/ou amplificado para maximizar o aproveitamento da aquisição. A maioria dos conversores analógico-digitais utilizados adquirem sinais na faixa de 0-5 V.

Os sensores são calibrados para operação a uma temperatura específica, tipicamente temperatura ambiente. Na maioria das aplicações em ambiente fechado e de curta duração, o desvio é relativamente constante e estável, não necessitando ajustamentos. Se o sensor se destina a ser utilizado em ambientes variáveis com diferentes temperaturas, uma função de desvio deve ser suficiente para a calibração analógica do dispositivo. Se a temperatura ambiente estiver sujeita a mudanças drásticas ao longo da instrumentação, a saída de temperatura deve ser analisada cuidadosamente para a calibração. Sensores inteligentes podem levar a temperatura automaticamente em consideração.

A resolução dos dados adquiridos é finalmente determinada pelo conversor analógico-digital. No entanto, é possível que o nível de ruído esteja acima da resolução mínima do conversor, reduzindo a resolução do seu sistema de conversão. Assumindo que o ruído é igualmente distribuído em todas as frequências, é possível filtrar o sinal para excluir todas as leituras que não representam frequências. O filtro necessário em cada caso depende tanto das características da estrutura, quanto do tipo de ruído presente na leitura.

3.3.4 Sensores utilizados

MPU-6050

O sensor InvenSense MPU-6050, mostrado na Figura 3.8, contém um acelerômetro MEMS e um giroscópio MEMS em um único chip. É muito preciso, pois contém hardware de conversão analógico-digital de 16 bits para cada canal. Por isso capta os canais x, y e z ao mesmo tempo. O sensor utiliza o I2C-bus para fazer a interface com o Raspberry Pi. O MPU-6050 não é caro, atualmente custa em média R\$ 25, especialmente dado o fato de que combina um acelerômetro e um giroscópio.

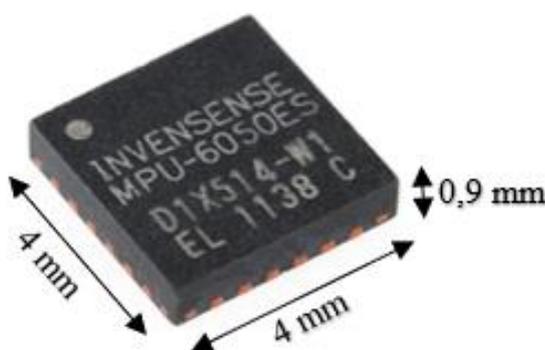


Figura 3.8 – MPU-6050

O MPU-6050 foi o primeiro dispositivo *MotionTracking* projetado para os requisitos de baixo consumo de energia, baixo custo e alto desempenho para smartphones, tablets e sensores portáteis.

Os dispositivos MPU-6050 combinam um giroscópio de 3 eixos e um acelerômetro de 3 eixos na mesma matriz de silício, juntamente com o Digital Motion Processor (DMP), que processa complexos algoritmos MotionFusion de 6 eixos. Isso em um dispositivo de dimensões 4 mm x 4 mm x 0,9 mm, que se refere especificamente ao MPU-6050.

Para abranger uma vasta gama de aplicações de grandes e pequenas acelerações, o dispositivo apresenta uma escala de faixa de medidas dos giroscópios programável pelo usuário de ± 250 , ± 500 , ± 1000 e $\pm 2000^\circ/\text{seg}$ (dps). O acelerômetro também é programável pelo usuário em diversas faixas de frequência, podendo ser $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ e $\pm 16g$. As características adicionais incluem um sensor de temperatura embutido que mede a temperatura de operação do sensor. O MPU-6050 possui uma tensão de entrada de 6-16V, um filtro passa-baixa entre 5-260 Hz, e uma taxa de saída de dados entre 4-1000 Hz. Mais informações podem ser encontradas no Anexo C (A.1).

No protótipo será utilizado apenas o acelerômetro na faixa de frequência de $\pm 2g$, não fazendo uso do giroscópio. Para mais detalhes sobre o MPU-6050, a referência Invensense Inc. (2013) é aconselhada.

Para utilizar o sensor MPU-6050, escolheu-se a placa GY-521, mostrada na Figura 3.9, uma arquitetura replicada por diversos fabricantes que possui todo o circuito necessário para o funcionamento do sensor, incluindo um regulador de tensão e todo o circuito de condicionamento de sinal. A placa GY-521 é uma arquitetura replicada por diversos fabricantes e o modelo esquemático pode ser visto no Anexo C (A.2).

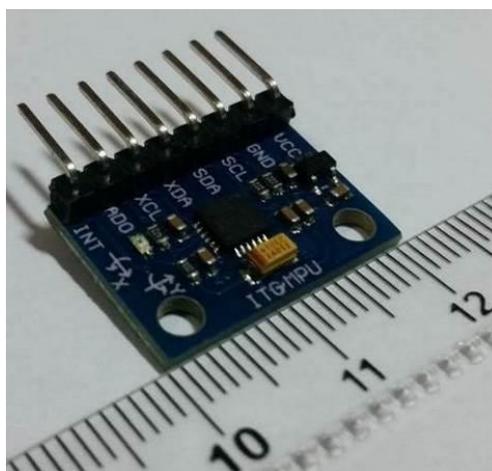


Figura 3.9 – GY-521

MPU-9250

O sensor InvenSense MPU-9250 é também um acelerômetro e giroscópio MEMS em um único *chip*. As suas especificações são muito similares ao MPU-6050 mencionado anteriormente, porém com melhorias que podem ser úteis no monitoramento estrutural.

Para todos os pontos de melhoria recomenda-se a referência InvenSense Inc (2016), porém vale o destaque de dois pontos, que foram os motivos principais para que esse acelerômetro também fosse avaliado nesse trabalho. O primeiro ponto é a promessa de redução no ruído em 25%, conforme é mostrado no Anexo C (A.3) quando comparado com o Anexo C (A.1).

O segundo ponto é o aumento da taxa de amostragem, que anteriormente era de 1000 Hz, e a nova versão traz até 4000Hz, possibilitando uma amostragem nos 3 eixos a aproximadamente 1300 Hz, enquanto o seu antecessor estava limitado a aproximadamente 300 Hz caso os 3 eixos fossem aquisitados, por uma limitação do acelerômetro e não do controlador.

Assim como foi mencionado para o MPU-6050, no protótipo será utilizado apenas o acelerômetro na faixa de frequência de $\pm 2g$, não fazendo uso do giroscópio. Para utilizar o sensor MPU-9250 foi escolhida a placa CJMCU-10DOF, mostrada na Figura 3.10, que possui todo o circuito necessário para o funcionamento do sensor, incluindo um regulador de tensão, condicionamento de sinal, além de um sensor de pressão acoplado que não será utilizado. O modelo de placa GY-9250 é mais parecido com o modelo de placa utilizado anteriormente, porém não está sendo comercializada no Brasil atualmente, então a CJMCU-10DOF é a melhor escolha para fins de comparação.

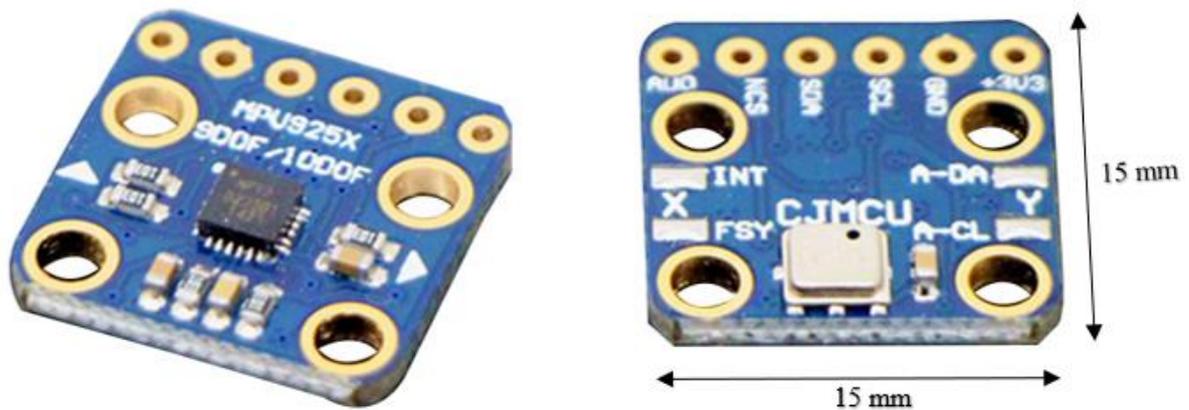


Figura 3.10 – CJMCU-10DOF

4 Instrumentação Tradicional com Fio

Como forma de avaliar o protótipo construído nesta pesquisa, utiliza-se como referência comparativa um sistema de aquisição tradicional com fio, amplamente utilizado em aplicações de monitoramento de estruturas.

Diversos sistemas de instrumentação são comercializados nacional e internacionalmente, por empresas nacionais e estrangeiras. Empresas brasileiras já participam do mercado ativamente, desenvolvendo e comercializando dispositivos para aquisição de dados, como a Lynx Tecnologia (2018).

Os sistemas de aquisição de dados podem ser voltados para diferentes tipos de medições, tais como dados de tensões mecânicas, termometria, extensometria e correntes elétricas.

O sistema de instrumentação deve ser integrado e todas as suas partes devem trabalhar em conjunto e sincronia, de forma a oferecer ao usuário os resultados finais do processo. Geralmente, esses sistemas são compostos por diferentes componentes que realizam papéis específicos durante todo o processo de aquisição e envio dos dados, como mostra a Figura 4.1.

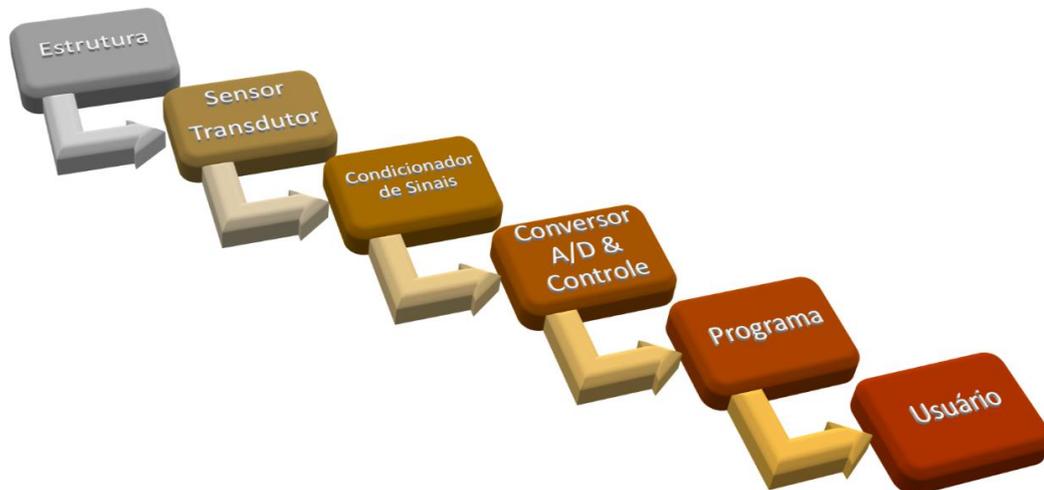


Figura 4.1 – Processo de aquisição de dados em sistemas tradicionais cabeados

Os sensores/transdutores são elementos físicos capazes de captar variações físicas ambientais e transforma-las em sinais ou impulsos elétricos. A escolha dos sensores é parte primordial em um projeto de instrumentação. É preciso identificar a aplicação de cada tipo de sensor, assim como se a sua precisão atende às especificações de projeto. Os mais conhecidos são os acelerômetros, *strain gages*, sensores de pressão, temperatura, torquímetro, células de carga, LVDT (deslocamento), PT100 (temperatura), entre outros.

Os condicionadores de sinal são circuitos eletrônicos responsáveis pela alimentação do sensor, a amplificação/redução do sinal, assim como a filtragem. Os condicionadores preparam o sinal analógico para que possa ser transformado em sinal digital. A amplificação/redução se responsabiliza por ajustar a escala de saída da alimentação dos sensores, assim como a escala de entrada do sinal para que se adeque à faixa de entrada do conversor A/D. Os filtros reduzem os ruídos gerados durante o processo de aquisição analógica antes mesmo de ser transformado em sinal digital, com a função de reduzir o custo computacional do pós-processamento dos dados.

O conversor A/D, analógico-digital, é responsável pela “tradução” do sinal analógico que chega como energia elétrica para um sinal digital, que pode ser representado por *bits*. Com o sinal digital é possível efetuar o armazenamento das leituras por tempo indeterminado, o que não é possível com o sinal analógico, possibilitando o pós-processamento dessas leituras.

A transmissão dos dados se refere ao envio dos sinais digitais para um ambiente onde os sinais serão armazenados. Em sistemas tradicionais cabeados, o envio pode ser realizado através de diferentes formas de conexão. É possível a comunicação através de porta serial RS (RS-232, RS-422, RS-485, entre outros), comunicação USB, comunicação por porta paralela (impressoras, por exemplo), conexão slot do computador (ISA, PCI), e o mais utilizado, a comunicação em rede *Ethernet*.

As gravações dos dados, assim como as leituras, visualização e processamento, são realizadas através de um software geralmente fornecido junto com o equipamento de aquisição, sendo este software individual de cada fornecedor. O programa de aquisição de dados é responsável pelo controle e configuração do sistema, permitindo que o usuário forneça os dados de entrada e receba as saídas do processo através de uma interface simplificada.

4.1.1 QuantumX MX1601B

Neste trabalho, utiliza-se o módulo amplificador universal MX1601B da HBM (Figura 4.2) como o sistema de aquisição de dados de alta performance, registrando dados ao mesmo tempo em que o protótipo proposto. O módulo possui 24 bits de resolução e entradas analógicas universais. O sistema esquematizado pode ser visto na Figura 4.3. O Anexo D agrupa as especificações técnicas do equipamento. Para mais informações sobre o MX1601B, a referência HBM (2018) é recomendada.

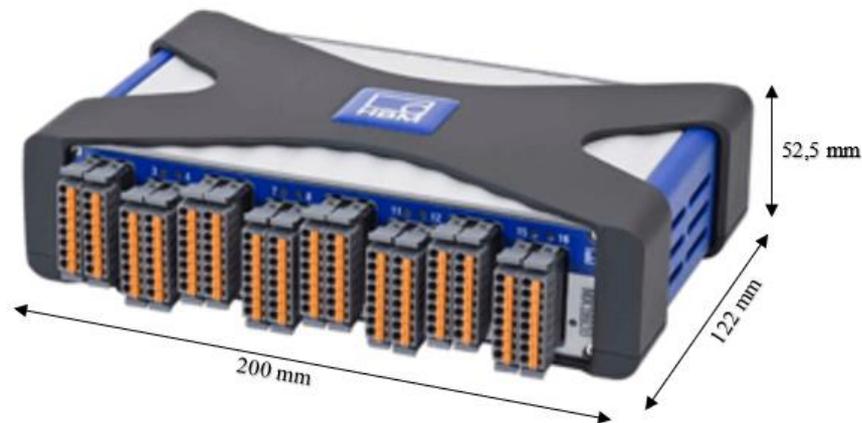


Figura 4.2 – MX1601B – Parte Frontal (HBM, 2018)

O módulo conta com 16 canais de entrada analógica, com isolamento elétrico entre elas, que podem ser configuradas individualmente através do software para diversos tipos de sensores, que podem ser alimentados por voltagem, por corrente ou do tipo IEPE (ICP[®]) que é alimentado por voltagem e corrente. A conexão dos sensores para a entrada do módulo pode ser realizada por adaptadores caso a saída não seja compatível.

A frequência de amostragem máxima fica estabelecida em 20.000 amostras/segundo, muito mais do que é necessário para a grande maioria das aplicações em estruturas de Engenharia Civil. O conversor A/D possui 24 bits de resolução por canal. E a comunicação padrão via rede Ethernet é estabelecida em aproximadamente 50 MByte/s.

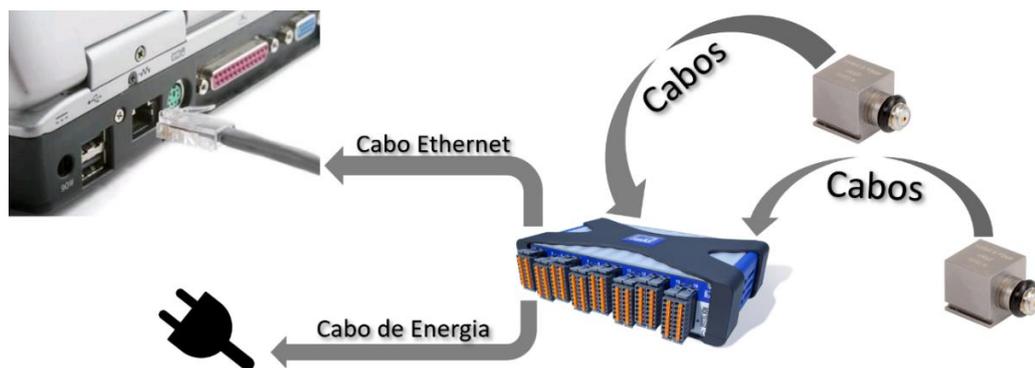


Figura 4.3 – Sistema tradicional com fio esquematizado

4.1.2 Acelerômetro CCLD 4507B

Utiliza-se, neste trabalho, o acelerômetro CCLD tipo 4507B, fabricado pela *Brüel & Kjaer*, apresentado na Figura 4.4. CCLD significa *Constant Current Line Drive*, e também é conhecido por *DeltaTron[®]*, compatível com ICP[®] e IEPE. Basicamente, acelerômetros CCLD

possuem a vantagem de não necessitarem de um amplificador externo, comunicação e alimentação em dois cabos, permitindo o uso de cabo coaxial, além de permitirem a comunicação em cabos mais longos.

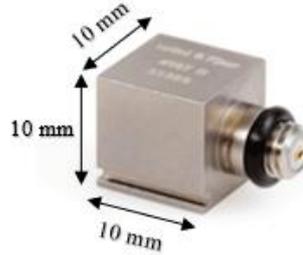


Figura 4.4 – Acelerômetro CCDL 4507B

As especificações técnicas de interesse do acelerômetro estão apresentadas na tabela 4.1. Outras informações podem ser encontradas em Brüel & Kjær (2018) e no Anexo A, onde apresenta-se a ficha de calibração do sensor. Dentre as características técnicas mostradas, vale destacar a faixa frequência de 0,3–6000Hz, a temperatura de operação -54 a 121°C, o peso de 4,8 gramas e, finalmente, a sensibilidade calibrada de 96,22mV/g. Para a faixa de frequência de trabalho, permite-se um erro de leitura de aceleração de até 10%.

Sensibilidade	100mV/g
Tolerância na Sensibilidade	±5%
Faixa de Frequência (±10%)	0,3 – 6 kHz
Faixa de Fase (±5°)	2 – 5kHz
Impedância de Saída	< 30Ω
Alimentação	13±1V
Ruído	< 35μV < 350μg
Sensibilidade Térmica	0,09%/°C
Tolerância de Umidade	100%

Tabela 4.1 – Especificações Técnicas 4507B

5 Materiais e Métodos

5.1 Protótipo construído

Os componentes de hardware do protótipo foram escolhidos de forma a satisfazer os pré-requisitos já explicados anteriormente: baixo consumo energético, aquisição e transmissão de dados em tempo real, baixo custo, e confiabilidade dos dados. Suas especificações devem observar as especificações do projeto e devem ser compatíveis uns com os outros. De modo a montar o sistema sem fio proposto neste trabalho, vários componentes são utilizados.

Conhecer as informações técnicas de hardware do protótipo é conhecer a sua potencialidade e as suas limitações.

Em geral, o ganho de desempenho tem como contraponto o aumento do consumo de energia. Esse é um aspecto muito importante para a instrumentação sem fio e, ao mesmo tempo, difícil de ser prevista, pois inclui fatores como a temperatura do ambiente e a frequência de amostragem utilizada, por exemplo.

Dentre as especificações apresentadas na Seção 3, três características de *hardware* do Raspberry Pi 3 Model B foram cruciais para a sua escolha. A primeira é o aprimoramento com o *system-on-chip*, mais potente graficamente e com maior capacidade de processamento, o Broadcom BCM2837 64-bit quad-core ARM Cortex-A53 1,2GHz, o que trouxe um grande avanço de desempenho quando comparado com o seu predecessor.

A segunda e terceira mudanças giram em torno da conectividade com o usuário. Nesse modelo, houve uma melhoria com a adição de um módulo embarcado (*onboard*) de comunicação Wi-Fi 802.11n 2,4GHz. Além disso, um módulo de conexão Bluetooth 4.1 de baixo consumo de energia foi adicionado. A facilidade de não precisar de um módulo externo de comunicação evita que o sistema entre em conflito com o dispositivo Wi-Fi ou Bluetooth, ou a presença de mau-contato em sua conexão. Possuir esses módulos embarcados aumenta a confiabilidade no equipamento, o que é pré-requisito para a confiabilidade dos dados coletados.

Por todas estas razões, o Raspberry Pi 3 foi escolhido como o computador de placa única para compor o sistema de aquisição sem fio deste trabalho.

5.2 Software

A escolha de softwares adequados para programar e controlar o protótipo é de extrema importância, uma vez que um dos pontos mais importantes do protótipo é efetuar com eficiência a comunicação entre o usuário remoto e o acelerômetro. Além disso, considerando um sistema de baixo custo, a preferência foi dada aos softwares de distribuição gratuita e de código livre. No caso do Raspberry Pi, ainda é crucial a escolha correta do sistema operacional, que será determinante para o bom funcionamento do equipamento de acordo com as necessidades do sistema de sensoriamento. Os softwares utilizados são apresentados nas seções a seguir.

5.2.1 Raspbian Lite

Raspbian é um sistema operacional gratuito baseado no Debian e otimizado para o *hardware* do Raspberry Pi. O sistema operacional é composto por um conjunto de programas básicos e utilitários que permitem a inicialização e o uso inicial do aparelho. O sistema está em constante atualização e a versão *November 2017* foi utilizada nesse trabalho.

O Debian é um sistema operacional gratuito para computadores que engloba um pacote de programas e utilitários para o funcionamento da máquina. A sua reputação gira em torno de ser um sistema operacional de alta qualidade, estável e escalável. Ser escalável indica a capacidade do sistema em aumentar a sua performance de acordo com o acréscimo de recursos, por exemplo, *hardwares* mais potentes.

Devido ao fato de o Raspbian ser uma adaptação do Debian, existe uma ampla variedade de bibliografia e documentação, já que ambos foram exaustivamente explorados por usuários de diversas aplicações. Para mais informações a referência Raspbian (2018) é recomendada.

O sistema operacional Raspbian propriamente dito é oferecido através de uma interface gráfica, como mostra a Figura 5.1. O uso da interface gráfica acaba gerando um custo computacional que não gera retorno para o sistema de sensoriamento remoto. Assim, é interessante que o equipamento tenha como prioridade apenas a aquisição e o processamento dos dados de aceleração.

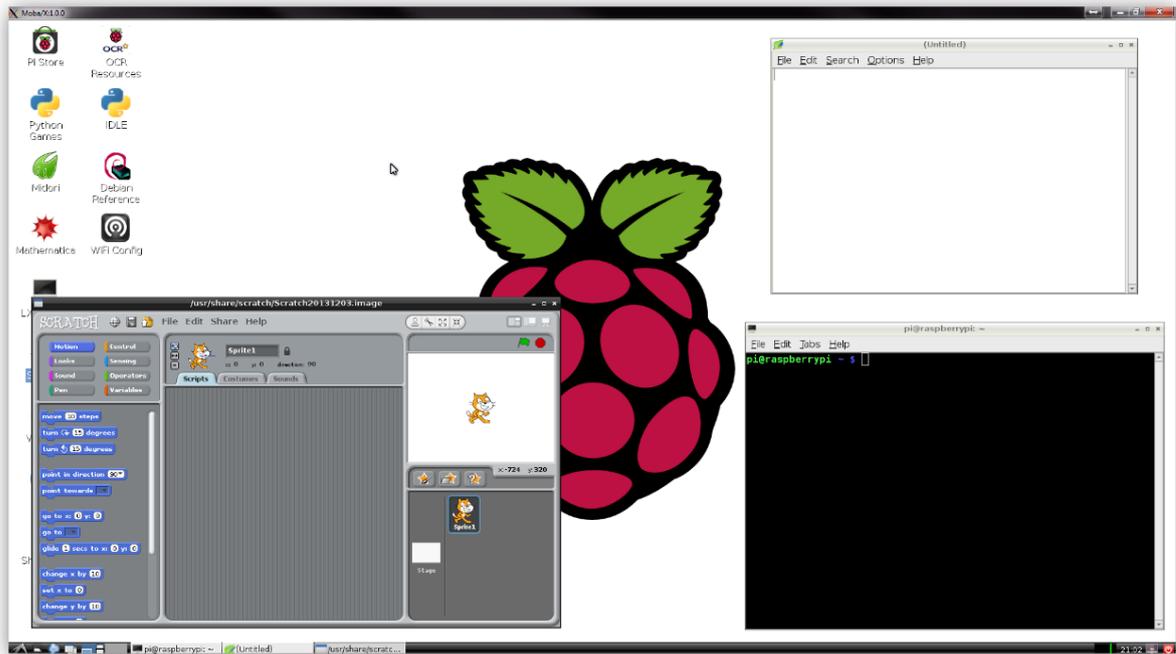


Figura 5.1 – Interface gráfica Raspbian

O Raspbian Lite é uma variação do sistema Raspbian com as mesmas funcionalidades operacionais, porém sem a interface gráfica. Toda a configuração do aparelho, assim como o seu uso e acompanhamento, é realizada através do terminal do sistema a partir de linhas de comando (vide Figura 5.2). Com isso, o equipamento é “aliviado” em processamento e pode ser utilizado em sua função como sensor.

```


Starting /etc/rc.local Compatibility...
Starting getty on tty2-tty6 if dbus and logind are not available...
Starting LSB: Start NTP daemon...
Starting System Logging Service...
Starting Permit User Sessions...
[ OK ] Started Permit User Sessions.
My IP address is 192.168.3.41
[ OK ] Started getty on tty2-tty6 if dbus and logind are not available.
[ OK ] Started /etc/rc.local Compatibility.
Starting Getty on tty6...
[ OK ] Started Getty on tty6.
Starting Getty on tty5...
[ OK ] Started Getty on tty5.
Starting Getty on tty4...
[ OK ] Started Getty on tty4.
Starting Getty on tty3...
[ OK ] Started Getty on tty3.
Starting Getty on tty2...
[ OK ] Started Getty on tty2.
Starting Getty on tty1...
[ OK ] Started Getty on tty1.
Starting Serial Getty on ttyAMA0...
[ OK ] Started Serial Getty on ttyAMA0.
[ OK ] Reached target Login Prompts.
[ OK ] Started LSB: Start NTP daemon.
[ OK ] Started System Logging Service.
[ OK ] Reached target Multi-User System.
[ OK ] Reached target Graphical Interface.
Starting Update UTMP about System Runlevel Changes...
[ OK ] Started Update UTMP about System Runlevel Changes.

Raspbian GNU/Linux 8 minibian tty1
minibian login: _

```

Figura 5.2 – Terminal Raspbian Lite

5.2.2 Python

Considerando que o Raspberry Pi 3 esteja com o sistema operacional Raspbian Lite, todo o procedimento relativo à coordenação do sensor é feito por linhas de comando executadas de forma coordenada. Para isso, existe a necessidade de um algoritmo que possa gerenciar o sistema de forma analítica com uma sequência finita de regras, raciocínios e operações. Neste trabalho, optou-se pela utilização da linguagem de programação Python.

Python é uma linguagem interpretada de programação de alto nível. Interpretada porque a linguagem é executada através de um *software* chamado interpretador, que transforma as linhas de comando em ações executáveis pelo processador ou sistema operacional, isso sem a necessidade de compilar o código. De alto nível, pelo seu nível de abstração elevado, utilizando termos de linguagem naturais à linguagem humana, tornando-se mais intuitiva no processo de programação, e eliminando a necessidade de o usuário conhecer características do processador, por exemplo.

O fato de a linguagem ser interpretada traz vantagens que foram analisadas e incentivaram a sua escolha, mas também algumas desvantagens que podem estimular uma mudança de linguagem para trabalhos futuros. Dentre as vantagens, destaca-se a aceitação da comunidade de usuários de Raspberry Pi pelo uso dessa linguagem, gerando diversas bibliotecas e soluções em questões de incompatibilidade e otimização. Como desvantagem, cita-se a perda de eficiência no uso da memória e processador, não conseguindo extrair o máximo do *hardware*, por se tratar de linguagem de programação de alto nível.

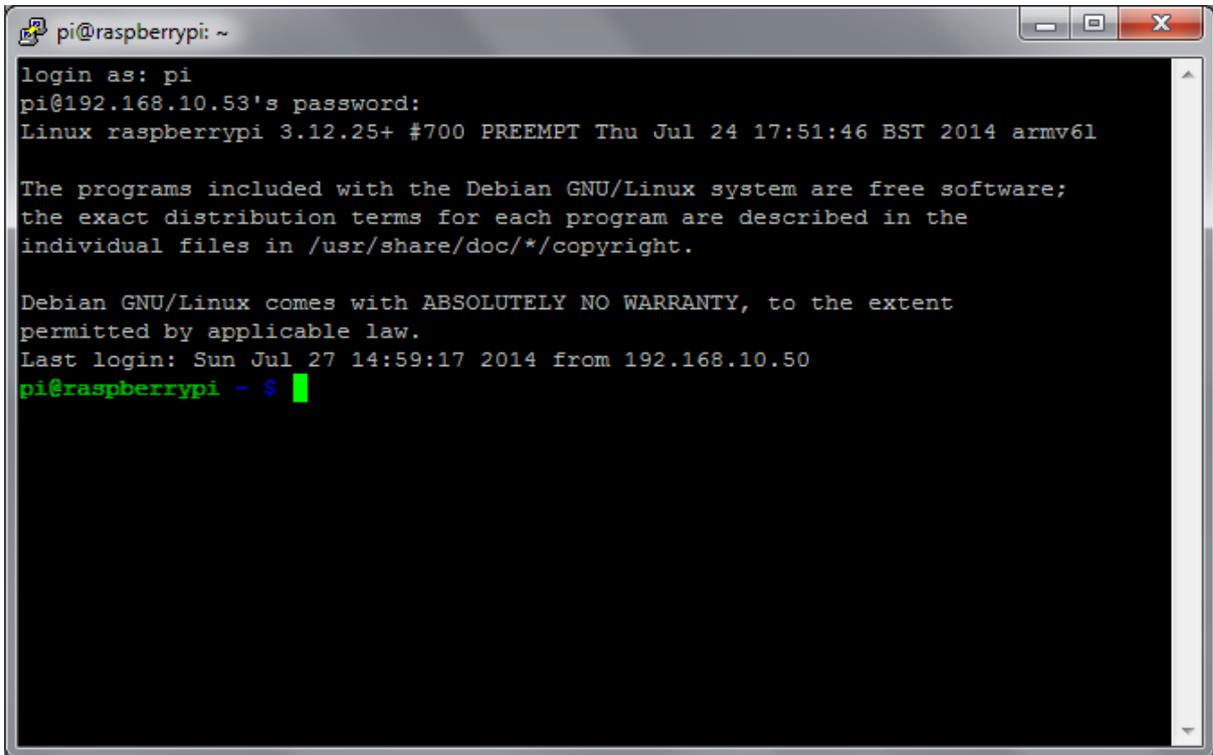
5.2.3 Putty

O Putty é um cliente de comunicação SSH desenvolvido originalmente por Simon Tatham, um programa *open source* e que atualmente é desenvolvido e aprimorado por um grupo de voluntários.

A sua utilidade é conseguir acessar de forma remota o terminal de qualquer Raspberry Pi que estiver conectado na mesma rede Wi-Fi que o usuário. Ou seja, o usuário consegue reprogramar qualquer sensor do sistema de forma remota, tendo acesso ao terminal do coordenador do acelerômetro, no caso, o Raspberry Pi.

SSH é uma sigla para *Secure Shell* que é uma ferramenta de rede criptográfica, utilizada em redes inseguras para operar de forma segura sem interceptação de dados. O principal uso dessa ferramenta é justamente o acesso remoto de computadores em uma rede, tendo acesso ao

terminal deles. A Figura 5.3 mostra a interface do Putty quando está acessando um Raspberry Pi remotamente. Para mais informações, a referência Putty (2018) é recomendada.



```
pi@raspberrypi: ~
login as: pi
pi@192.168.10.53's password:
Linux raspberrypi 3.12.25+ #700 PREEMPT Thu Jul 24 17:51:46 BST 2014 armv6l

The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Sun Jul 27 14:59:17 2014 from 192.168.10.50
pi@raspberrypi ~ $
```

Figura 5.3 – Acesso Remoto do Terminal - Putty

5.2.4 FileZilla

O FileZilla é um *software* que se propõe a ser uma solução gratuita para transferências de arquivos utilizando o protocolo FTP e seus variantes. O programa é *open source* e distribuído de forma gratuita.

No sistema de sensoriamento sem fio, os acelerômetros trabalham de forma remota. Isso significa que o computador não precisa estar conectado ao sistema durante toda a duração do ensaio. Depois de automatizado, o sistema funciona até que o usuário peça para ele parar ou então configure um parâmetro de fim do ensaio.

Durante o ensaio, os acelerômetros podem enviar instantaneamente as suas leituras ou guardar o conjunto de dados em sua memória *flash*. Assim, o FileZilla surge para possibilitar o processo de transferência de arquivos, com segurança, entre o sensor remoto e o usuário.

FTP é uma sigla para *File Transfer Protocol* que é um protocolo padrão de rede utilizado para transferir arquivos digitais entre cliente e servidor em uma rede de computadores. Esse

protocolo puramente não é considerado seguro. Assim, a variação utilizada nesse trabalho é o SFTP, que é o protocolo FTP com autenticação SSH explicado anteriormente.

Para que o usuário se conecte aos sensores e possa recuperar os dados de aceleração, basta que esteja conectado na mesma rede Wi-Fi e que conheça o endereço de IP do sensor. A Figura 5.4 mostra a interface do programa FileZilla enquanto acessa o Raspberry Pi remotamente. Para mais informações, a referência FileZilla (2018) é recomendada.

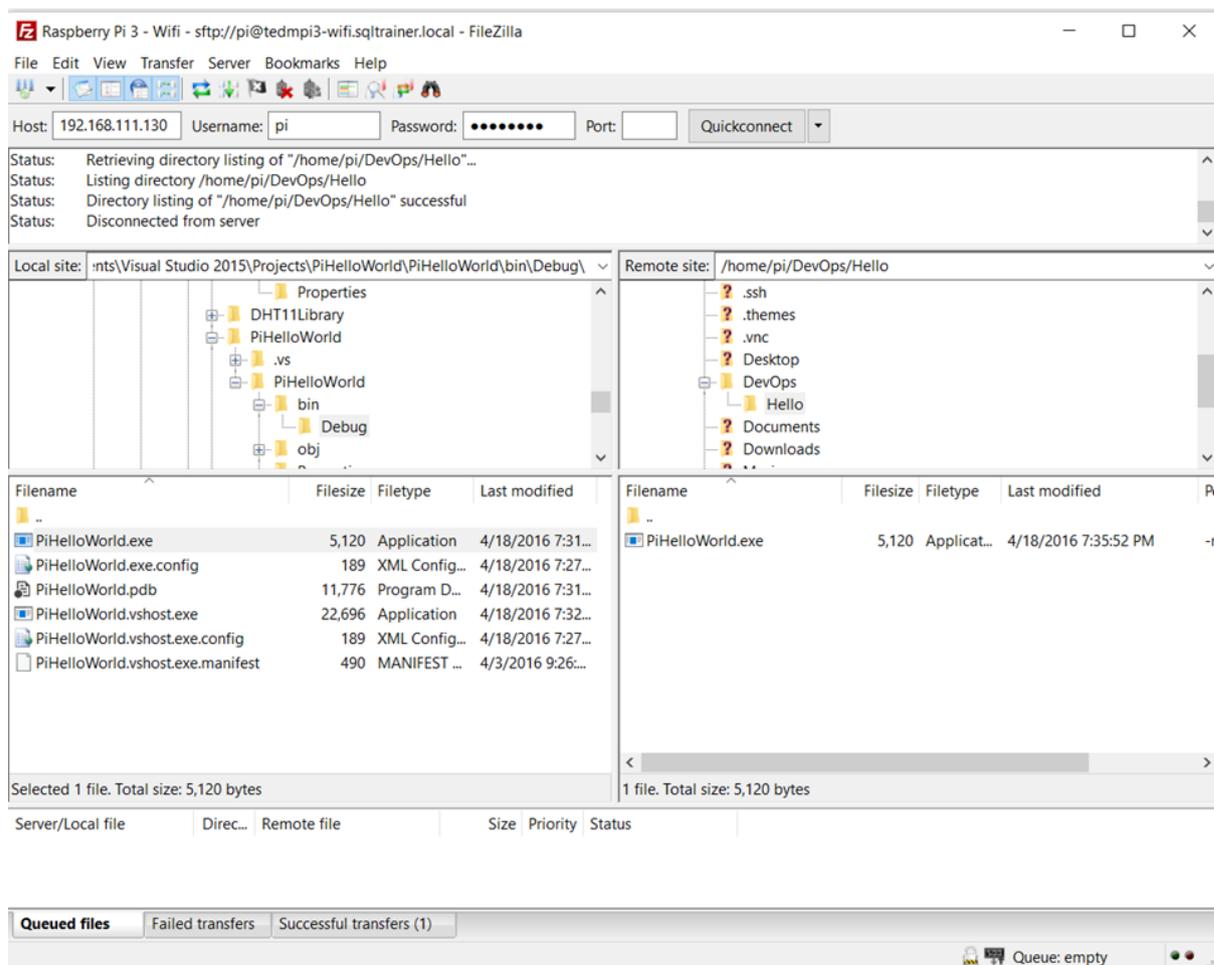


Figura 5.4 – Acesso remoto aos arquivos – FileZilla

5.2.5 Softwares Adicionais

Apesar de não serem estritamente indispensáveis, outros dois *softwares* foram utilizados para a configuração da rede.

O programa Advanced IP Scanner foi utilizado para reconhecer todos os dispositivos conectados na rede Wi-Fi, como mostra a Figura 5.5. Com ele, é possível detectar se algum sensor foi desconectado. Além disso, é possível adicionar etiquetas a cada dispositivo na rede

para identificação e ainda tomar conhecimento do número de IP de cada um para poder realizar a comunicação utilizando os dois últimos softwares apresentados.

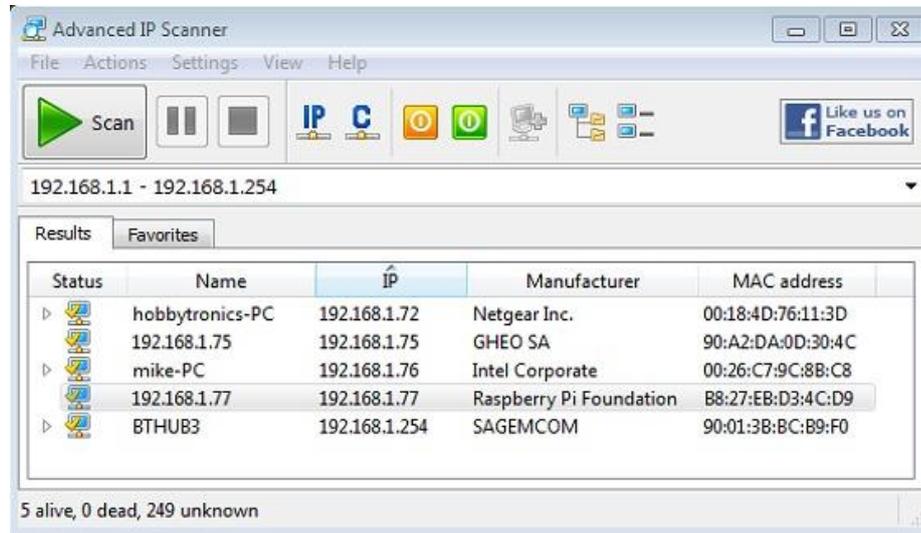


Figura 5.5 – Advanced IP Scanner

O programa Acrylic Wi-Fi é utilizado para a verificação de interferências e melhor configuração da rede. O programa permite visualizar outras redes Wi-Fi que existem naquela localidade e os canais utilizados por elas, como mostra a Figura 5.6. Assim, é possível evitar os canais congestionados e obter uma rede com melhor desempenho, com menor perda de dados e, conseqüentemente, maior velocidade de transmissão.

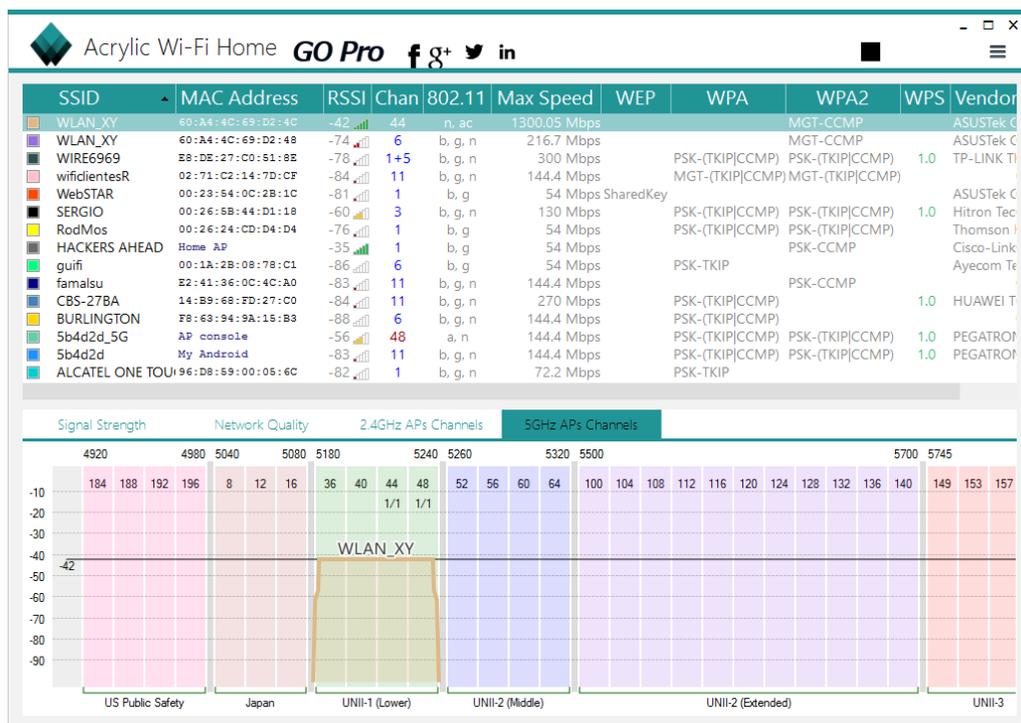


Figura 5.6 – Acrylic Wi-Fi

5.3 Métodos

Para a correta determinação dos parâmetros modais de uma estrutura, i.e., frequências naturais, taxas de amortecimento, e modos de vibração, é necessário que o processo de aquisição dos sinais respeite o teorema de amostragem de Nyquist-Shannon, como forma de garantir a integridade dos dados registrados.

Além da preocupação com a correta amostragem e representação dos sinais de aceleração no domínio do tempo, procura-se, também, avaliar as respostas dinâmicas no domínio da frequência. Para tanto, a técnica da Transformada Rápida de Fourier (FFT) será utilizada.

5.3.1 Teorema de amostragem de Nyquist-Shannon

No campo do processamento de sinais digitais, o teorema de amostragem é uma ponte fundamental entre os sinais de tempo contínuo (sinais analógicos), e os sinais de tempo discreto (sinais digitais). Ele estabelece uma condição suficiente para uma taxa de amostragem que permite que uma sequência discreta de amostras capture todas as informações de um sinal de tempo contínuo de faixa de frequência finita.

O teorema de amostragem introduz o conceito de uma taxa de amostragem que é suficiente para que nenhuma informação real seja perdida no processo de aquisição dos dados. O teorema estabelece que, para uma dada taxa de amostragem f_s , é possível garantir uma reconstrução perfeita para um limite de faixa de frequência de $f_s/2$. Quando esse valor mínimo não é respeitado, a reconstrução exibe imperfeições conhecidas como *aliasing*.

5.3.2 Transformada rápida de Fourier – FFT

A transformada rápida de Fourier (FFT) é um algoritmo que executa computacionalmente a Transformada Discreta de Fourier (DFT) de uma sequência, ou de sua inversa. A análise de Fourier converte um sinal de seu domínio original, geralmente no tempo, para uma representação no domínio da frequência e vice-versa. Uma FFT calcula essas transformações através da fatoração da matriz DFT em produtos de fatores próximos de zero. Como resultado, a FFT reduz a complexidade $O(n^2)$ da computação da DFT aplicada diretamente para $O(n \log n)$, onde n é o número de dados.

A FFT é utilizada amplamente em várias aplicações de engenharia. A ideia básica foi popularizada em 1965, mas os primeiros algoritmos começaram a surgir por volta de 1805. Em 1994, Gilbert Strang descreveu a Transformada Rápida de Fourier como “o algoritmo numérico mais importante da atualidade”, sendo incluída na lista dos 10 maiores algoritmos do século 20 pela revista IEEE de Computação em Ciência e Engenharia.

A DFT é obtida através da decomposição de uma sequência de valores em componentes de diferentes frequências, conforma a equação 7.1. Essa operação é útil em muitos campos de estudo, mas a computação direta da definição desse método é muito lenta na maior parte dos casos para que se torne um método praticável. A DFT é definida pela fórmula abaixo onde a sequência de N números complexos $(x_0, x_1, \dots, x_{N-1})$ é transformada em uma sequência periódica de N números complexos.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi kn/N} \quad k = 0, \dots, N - 1 \quad (7.1)$$

A FFT é uma forma de chegar ao mesmo resultado de uma forma mais rápida, sendo que a diferença de velocidade será tanto maior quanto maior a quantidade de dados. Os algoritmos de FFT mais conhecidos dependem da fatoração de N , porém existem algoritmos que estendem o uso da FFT para qualquer valor de N , inclusive para N sendo um número primo.

5.3.3 Ensaio sem fio

O processo se inicia com a preparação do ambiente para o funcionamento do sistema, com a instalação de uma rede local Wi-Fi, escolhendo o melhor canal como forma de evitar interferências durante a comunicação sem fio.

Em seguida o Raspberry Pi 3 Model B é preparado com a instalação do sistema operacional Raspbian Lite, a configuração para conexão automática a rede local com senha de acesso, e a habilitação das interfaces SSH e I2C, que são desativadas por padrão inicial no sistema operacional aqui proposto. Seguida pela instalação das ferramentas I2C Tools e Python SMBUS, com a programação em Python de um código que controle as atividades de sensoriamento que deve ter como parâmetros basicamente a taxa de amostragem, o parâmetro para início de ensaio, o parâmetro para fim de ensaio, e um método de armazenamento ou envio automático dos dados.

No método utilizado nesse trabalho, o parâmetro de início do ensaio é enviado por um computador conectado na rede, esse parâmetro é um comando enviado para todos os

equipamentos conectados na rede local, após o recebimento desse comando todos os protótipos começam a realizar as leituras a 600 Hz, tendo como parâmetro de fim de ensaio a duração do ensaio, que é de 90 segundos. Os dados são armazenados em uma matriz de duas colunas, coluna tempo e coluna aceleração, e ao final do ensaio essa matriz é armazenada no cartão de memória em formato *txt*, em modelo de formatação que já possui compatibilidade com *softwares* onde são realizados os tratamentos de dados.

É possível realizar o tratamento dos dados pelo protótipo, ou seja, processar os dados antes de enviar ao usuário, utilizando seu potencial de processamento. Porém no caso aqui apresentado existe o interesse em analisar os dados de ensaio sem tratamento, e assim avaliar a sua qualidade.

Dessa forma os ensaios em arquivo *txt* ficam armazenados internamente até que o usuário remotamente acesse pela rede Wi-Fi os arquivos do sistema e transfira os arquivos de ensaio, que são identificados pela sua data e hora de início, com precisão de segundos.

A Figura 5.7 esquematiza o processo de instrumentação em forma de fluxograma.

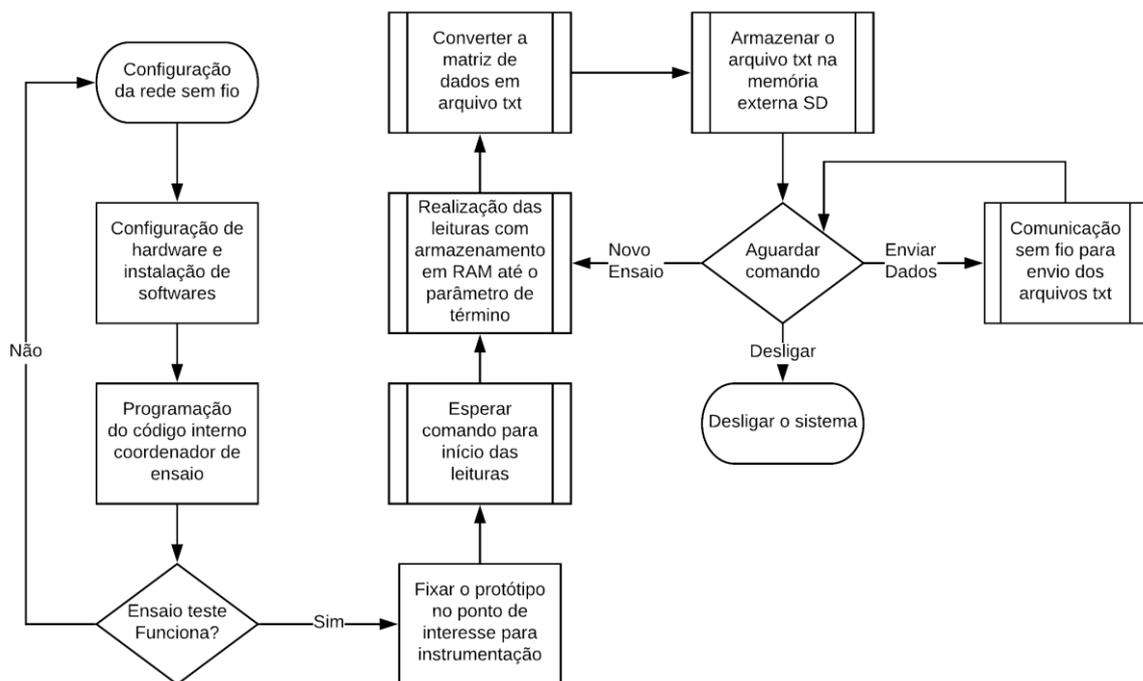


Figura 5.7 – Fluxograma de funcionamento

6 Ensaios experimentais

A fim de avaliar a eficácia e a robustez do sistema de aquisição sem fio proposto, uma aplicação experimental é realizada. A ideia principal é fixar 3 acelerômetros em um *shaker* com amplitudes e frequências moduladas, conforme Figura 6.1. O acelerômetro número 1 é o CCLD 4507B, apresentado na seção 4.1.2, conectado através do sistema de aquisição QuantumX MX1601B; este *setup* representa a instrumentação tradicional com fio e constitui-se como referência de comparação, tendo como garantia o certificado de calibração apresentado no Anexo A.

O acelerômetro de número 2 é o MPU-6050 conectado a um Raspberry Pi 3 Model B, sendo uma proposta de evolução em relação aos trabalhos anteriores que utilizaram o MPU-6050 com placas Arduino (Galdino, 2016). Dessa forma, é possível entender como que troca do Arduino Due pelo Raspberry Pi 3 Model B influencia nos resultados.

O acelerômetro de número 3 é o MPU-9250 conectado a um Raspberry Pi 3 Model B, sendo uma proposta de substituição do MPU-9250 para o possível uso em monitoramento estrutural. Esse último acelerômetro tem como parâmetro o acelerômetro número 2, em relação ao qual a única mudança é a troca do sensor.

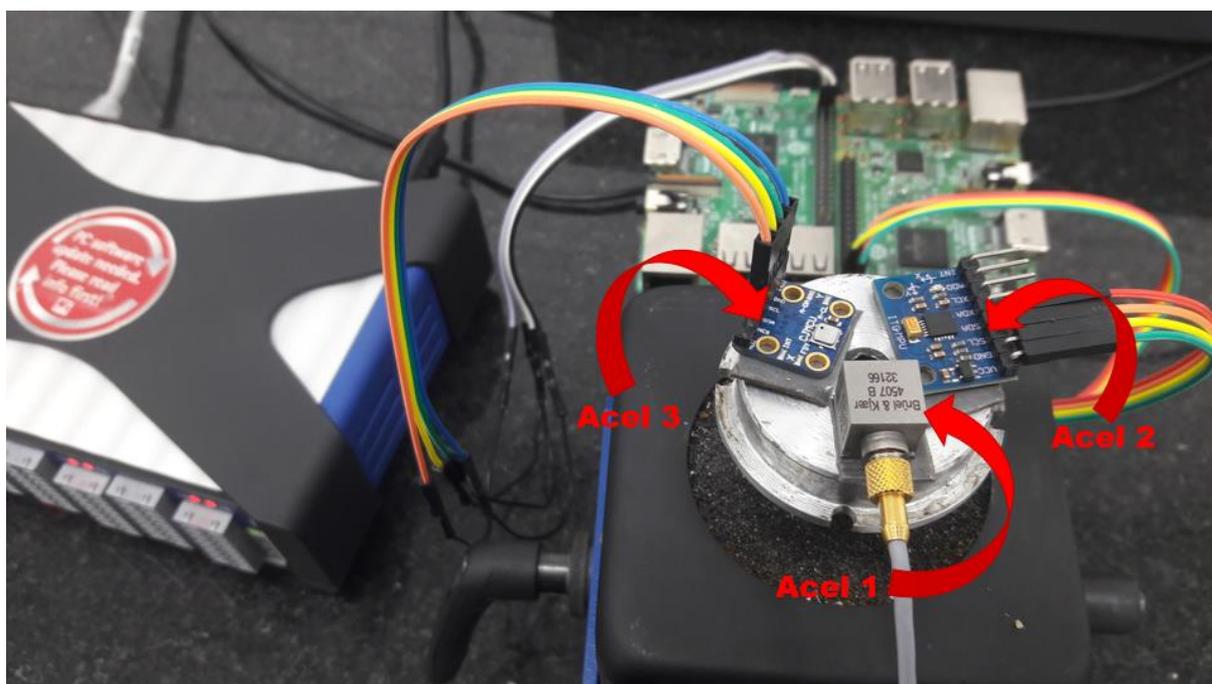


Figura 6.1 – Disposição dos Acelerômetros

A comunicação do acelerômetro 1 é inteiramente realizada por cabos, ao passo que para os acelerômetros 2 e 3, a transmissão dos dados é realizada inteiramente por uma rede Wi-Fi local estabelecida no laboratório sem conexão à *Internet*. Todos os ensaios foram realizados com uma taxa de aquisição constante de 600Hz, levando-se em consideração o teorema de Nyquist-Shannon que limita as frequências ensaiadas a 300Hz.

Dois conjuntos de ensaios são realizados utilizando-se dois *shakers* distintos, separadamente. O primeiro é um *shaker* ModalShop 2004E de frequência e amplitude modulada, mostrado na Figura 6.2 (já instrumentado). Para modular a frequência e amplitude, utilizou-se um gerador de funções e formas de ondas arbitrárias Keysight 33210A, mostrado na Figura 6.3. O gerador escolhido é digital, como forma de oferecer maior controle e estabilidade ao sistema.



Figura 6.2 – *Shaker* instrumentado



Figura 6.3 – Keysight 33210A

O experimento modulado é o experimento realizado com o ModalShop 2004E de frequência e amplitude moduladas. Nesse processo, os dados de aceleração foram obtidos simultaneamente com os 3 acelerômetros e, em seguida, comparados. Cada ensaio foi realizado durante 100 segundos, incluindo o repouso inicial, a estabilização do *shaker*, e o desligamento do *shaker* nos últimos segundos. Para a análise de cada ensaio, foram extraídos 50 segundos a partir do momento em que o *shaker* já estivesse estabilizado e o usuário estivesse afastado do sistema para não interferir nos dados de aquisição.

O segundo *shaker* utilizado é conhecido como “calibrador universal”, ou “calibrador de acelerômetros”, mostrado na Figura 6.4. Esse equipamento é capaz de gerar uma onda senoidal pura, sem harmônicos, em uma frequência e amplitude predefinidas em sua fabricação. O modelo PCB 394C06 funciona em uma frequência de 159,2Hz com uma aceleração pico de 1,00g, ou 9,81m/s². Nesse caso, como existe uma constância de frequência e amplitude de aceleração, o ensaio com três acelerômetros simultâneos não é uma necessidade, podendo ser realizado um após o outro, de forma consecutiva.



Figura 6.4 Calibrador PCB 394C06

6.1 Comunicação *Wireless*

A comunicação *wireless* através do protocolo *Wi-Fi* se mostrou suficiente e promissora. Todas as informações de ensaio foram gravadas em um diretório do Raspberry Pi, sendo possível acessar remotamente os arquivos. Além disso, foi possível fazer o *download* dos arquivos durante as pausas entre os ensaios, e até mesmo durante um ensaio, sem perda de performance a uma taxa de aquisição de 600Hz. O acesso ao Raspberry Pi para recuperar os dados foi realizado através de uma rede local, validando-se, também, a possibilidade de se conectar através da *internet*, em uma condição onde não se tenha acesso a rede local. Por fim, foi possível alterar remotamente as linhas de código que coordenam o ensaio, sendo possível fazer ajustes de taxa de amostragem, por exemplo, sem o acesso via cabo.

A comunicação SFTP mostrou-se suficiente para as aplicações. Entretanto, é possível vislumbrar algumas melhorias que podem ser desenvolvidas no próximo trabalho. Em situações com muita interferência de sinal, e casos onde os arquivos de ensaios alcancem grandes proporções, como *gigabytes*, a transferência SFTP pode ser interrompida durante o processo de transferência, e nesse caso deve ser reiniciada desde o início do arquivo. A solução estaria na implementação de uma comunicação *peer-to-peer*, por exemplo, onde a transferência poderia ser retomada de onde foi interrompida.

Em resumo, é possível vislumbrar aperfeiçoamentos na comunicação *wireless*, porém ao contrário do que foi visto na revisão bibliográfica, onde a comunicação *wireless* se mostrou o grande limitador pelo efeito gargalo do protocolo *ZigBee*, o protótipo aqui apresentado não obteve qualquer dificuldade em transmitir os arquivos de ensaio, e se mostrou promissor para a utilização em redes complexas de sensoriamento, com agilidade e confiabilidade no processo de transferência. Dessa forma a comunicação *wireless* deixa de ser um limitador de performance do protótipo aqui apresentado.

6.2 Ruído em Repouso

O ruído em repouso foi comparado entre os três acelerômetros apresentados anteriormente. Segundo as especificações apresentadas no Anexo A e Anexo C, espera-se que o acelerômetro comercial apresente ruídos menores quando comparado ao MPU-6050. Espera-se, também, que o MPU-9250 apresente menos ruído que o MPU-6050.

O ensaio em repouso teve duração de 15 segundos. A Figura 6.5 ilustra o comportamento durante o estado de repouso entre os instantes 7.3s e 7.7s. Não houve a aplicação de qualquer filtro, além daqueles já embutidos no próprio *hardware* do sistema cabeado, o que não acontece no sistema sem fio.



Figura 6.5 – Ensaio em Repouso

Percebe-se, claramente, que as expectativas quanto ao ruído foram confirmadas, estando o 4507B com os menores níveis de ruído. Os outros dois acelerômetros possuem níveis similares, porém é possível notar um comportamento um pouco melhor para o MPU-9250.

A Figura 6.6 ilustra os histogramas obtidos para cada um dos sinais registrados. Os dados de cada acelerômetro foram divididos em 1000 classes uniformes, sendo possível visualizar a distribuição do ruído em repouso para cada um. O desvio-padrão para cada sinal também foi calculado.

A distribuição dos ruídos não respeita rigorosamente uma distribuição normal, sendo a hipótese de distribuição normal refutada por dois testes estatísticos, o de Anderson-Darling e o Jarque-Bera. Por esse motivo não é possível utilizar conceitos estatísticos que se aplicam a distribuições normais.

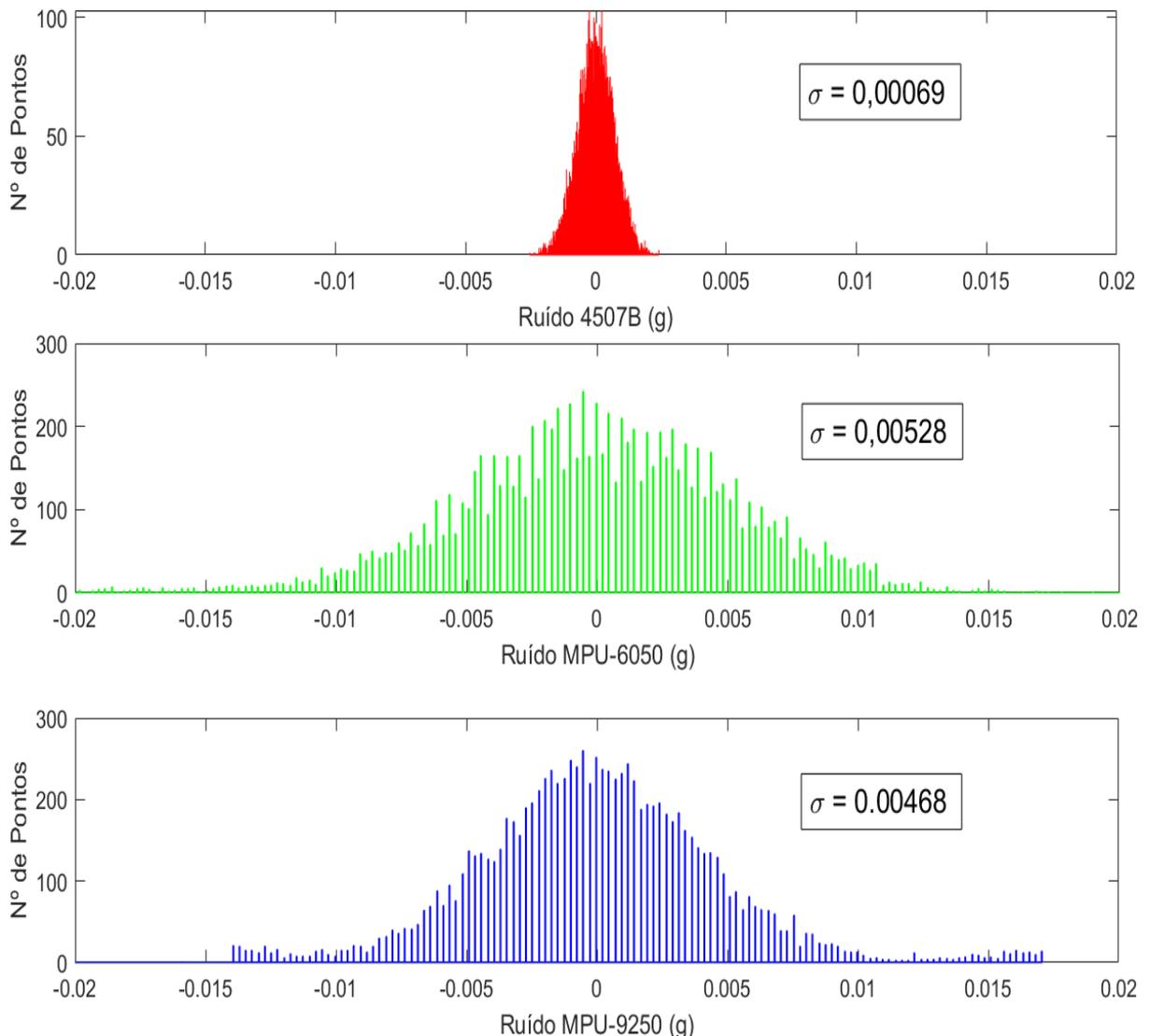


Figura 6.6 – Histogramas do Ruído em Repouso

Nota-se que o desvio-padrão do sinal do MPU-6050 para o ensaio em repouso é 765% maior do que o do 4507B, enquanto o do MPU-9250 é 678% maior. Assim, o ruído do MPU-9250 é 11,4% menor que o do MPU-6050.

É possível analisar, ainda, a faixa de ruído dos três acelerômetros. Para tanto, serão retiradas 5% das leituras que mais se distanciam da média dos ensaios, que nesse caso é a aceleração zero, como forma de evitar pontos que não representem o comportamento usual dos acelerômetros. Os 95% das leituras mantidas representam uma faixa de ruído que o acelerômetro possui internamente mesmo estando em repouso. Essas faixas de aceleração são mostradas na tabela 6.1.

	Ruído em Repouso (g)		
	Mínimo	Máximo	Faixa Média
4507B	-0,0014	0,0013	$\pm 0,00135$
MPU-6050	-0,0105	0,0100	$\pm 0,01025$
MPU-9250	-0,0095	0,0095	$\pm 0,00950$

Tabela 6.1 – Comparação da Faixa de Ruído

De acordo com a tabela 6.1, é possível notar as diferenças entre os ruídos em repouso, sendo mantidas algumas das relações apresentadas anteriormente. A faixa de ruído em repouso do MPU-6050 é 759% maior do que o acelerômetro comercial, enquanto o MPU-9250 é 704% maior. Ao analisar a redução da faixa de ruído do MPU-6050 para o MPU-925, encontrada-se uma redução de 7,3%.

É possível perceber, ainda, que apesar de as diferenças percentuais serem grandes, as diferenças absolutas podem ser pouco significativas a depender da aplicação que se deseja para os sensores. Caso a aplicação exija uma sensibilidade de 0,001g, o acelerômetro comercial aqui utilizado seria o mais recomendado. Por outro lado, aplicações que permitam uma incerteza de 0,01g nas medições, tanto o MPU-6050 quanto o MPU-9250 poderiam atender as exigências de ruído em repouso com menor custo.

É importante ressaltar que o ruído em repouso, como o nome constata, não representa em totalidade o erro de leitura existente quando a estrutura está em aceleração, mas sim a partir de qual aceleração mínima da estrutura é possível diferenciar o que é aceleração real da estrutura do que é ruído de repouso. Para continuar a validação do protótipo é necessário seguir para a validação do domínio da frequência e no domínio do tempo.

6.3 Domínio da Frequência

No domínio da frequência, trabalhos anteriores mostraram o potencial do MPU-6050 para identificação de frequências (Galdino, 2016). Neste trabalho, além da repetibilidade dos resultados positivos, almeja-se a experimentação em frequência controladas, como forma de ter um melhor parâmetro de avaliação na identificação de frequências pelos três acelerômetros em estudo.

Para tal, serão utilizados o ensaio realizado com o calibrador universal, como garantia de uma frequência de excitação igual a 159,2 Hz; e ensaios modulados realizados com o *shaker* ModalShop 2004E de frequência e amplitude moduladas.

O resultado do ensaio usando calibrador é mostrado na Figura 6.7.

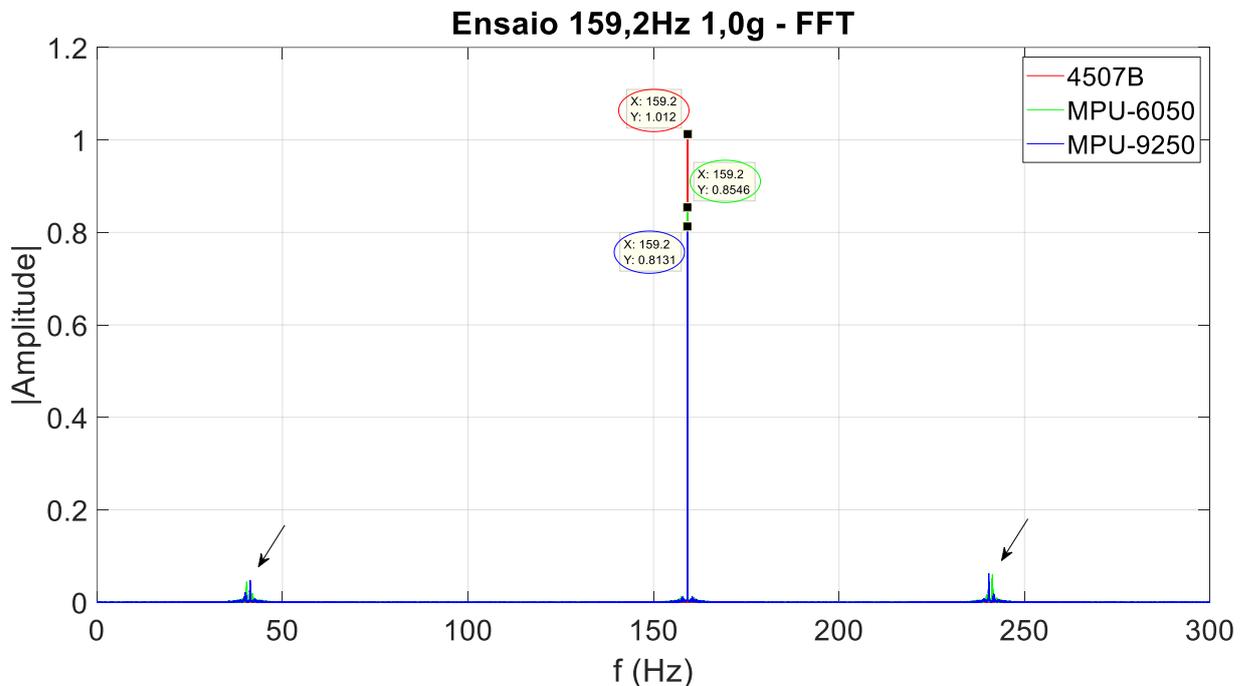


Figura 6.7 – Calibrador 159,2 Hz 1,0g - FFT

É possível perceber que as frequências estão exatamente determinadas em 159,2 Hz. A diferença do valo de pico no eixo Y diz respeito às divergências no domínio do tempo, e será abordado na próxima seção. Além disso, outras frequências, indicadas pelas setas, foram encontradas apenas pelos MPU-6050 e MPU-9250, com amplitudes proporcionais aos ruídos detectado nos sinais. Estas frequências, ditas espúrias, não são representativas, dada a discrepância das amplitudes em relação às da frequência principal.

Os ensaios com frequências e amplitudes moduladas foram realizados a 2,5 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 49 Hz e 95 Hz, em amplitudes de aceleração de 0,02g, 0,05g, 0,1g, 0,2g, 0,5g, 1g e 1,5g. Algumas combinações entre frequência e amplitude não foram possíveis por uma limitação do sistema utilizado no *shaker*. É importante destacar que o *shaker*, ao gerar a frequência desejada, acaba originando alguns de seus harmônicos (ainda que em menores amplitudes). Entretanto, tal ocorrência não causou problema na análise de nenhum dos três acelerômetros aqui apresentados.

As combinações entre frequências e amplitudes de aceleração possíveis e ensaiadas estão listadas na Tabela 6.2. Ao se analisar as diferentes frequências, é possível avaliar a faixa de frequência na qual o protótipo trabalha com maior confiabilidade. Por outro lado, ao se variar a amplitude aceleração, é possível aumentar ou diminuir a relação sinal/ruído, facilitando ou dificultando a determinação de frequências.

		Amplitude de aceleração						
		0,02 g	0,05 g	0,1 g	0,2 g	0,5 g	1 g	1,5 g
Frequências	2,5 Hz	X	X	X	X	X	X	
	5 Hz		X	X	X	X	X	X
	10 Hz		X	X	X	X	X	X
	20 Hz				X	X	X	X
	49 Hz					X	X	X
	95 Hz						X	X

Tabela 6.2 – Ensaios Realizados Frequência x Amplitude

A Figura 6.8 mostra o resultado no domínio da frequência do ensaio realizado na amplitude de 0,02g para a frequência de excitação de 2,5 Hz, ou seja, o caso mais desfavorável, com menor relação sinal/ruído. Neste cenário, todas as frequências identificadas pelo 4507B também o foram pelos outros dois acelerômetros. É interessante perceber a tendência de encontrar as frequências múltiplas de 2,5 Hz até a frequência de 95 Hz, com exceção de algumas que não apareceram para nenhum dos três acelerômetros.

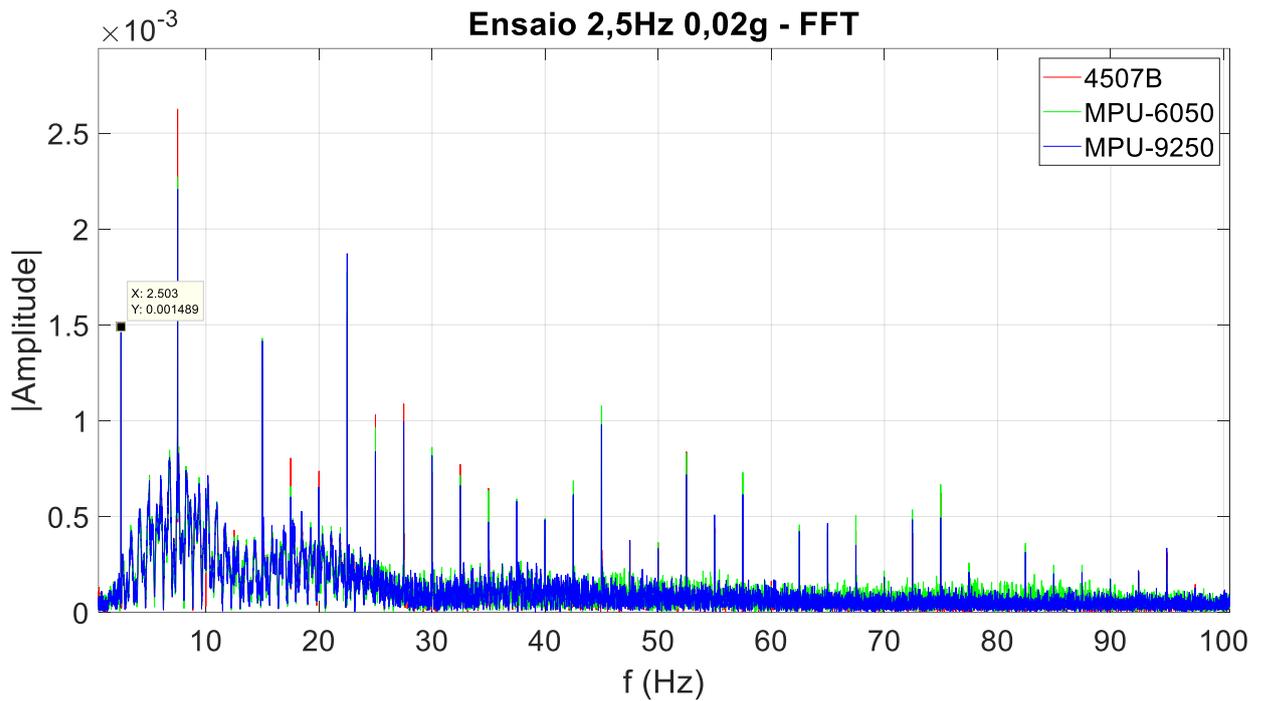


Figura 6.8 – Ensaio 2,5 Hz e 0,02g – FFT

Em uma situação mais favorável, como é o caso de um ensaio com amplitude de 1g, mostrado na Figura 6.9, todas as frequências identificadas pelo 4507B também o foram pelos outros dois acelerômetros. Os demais ensaios a 2,5 Hz encontraram resultados igualmente compatíveis com aqueles apresentados nessa seção e são apresentados no Anexo A.

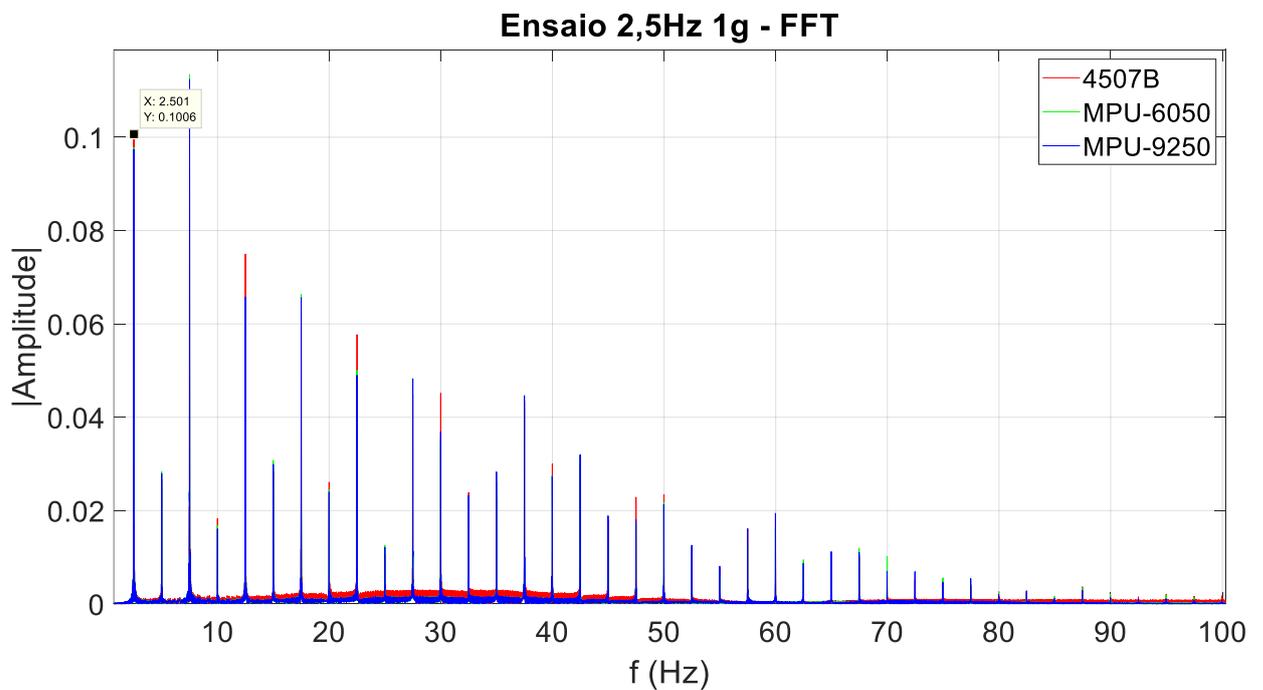


Figura 6.9 – Ensaio 2,5 Hz e 1g – FFT

Pensando-se em um cenário de sinal/ruído mais desfavorável, apresentam-se os resultados para as frequências de 20 Hz e 95 Hz, que representam uma média e uma alta frequência dentre aquelas que foram ensaiadas.

Para a frequência de 20 Hz, a situação mais desfavorável é a de amplitude de aceleração de 0,2 g e o resultado é mostrado na Figura 6.10. É possível perceber novamente que, no domínio da frequência, os resultados não foram afetados.

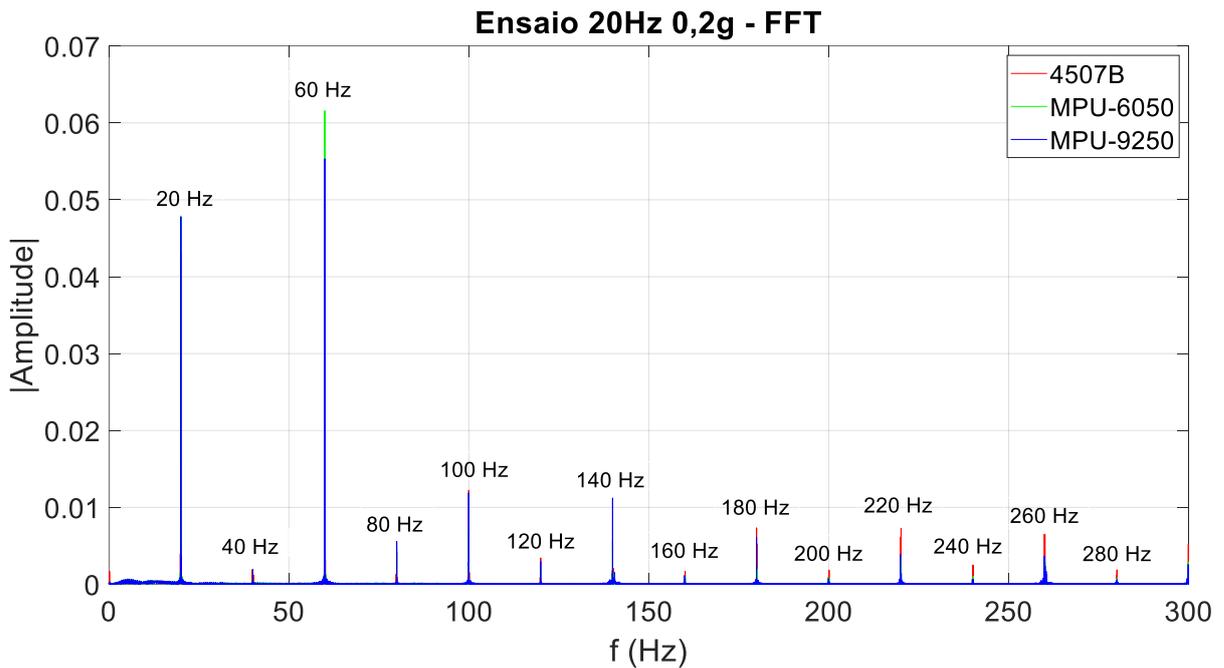


Figura 6.10 - Ensaio 20 Hz e 0,2g – FFT

Para a frequência de 95 Hz, a situação mais desfavorável é a de amplitude de aceleração de 1 g e o resultado é mostrado na Figura 6.11. É possível perceber que a frequência de maior amplitude, 95 Hz, 125 Hz e 285 Hz, foi encontrada pelos três acelerômetros. Entretanto, de forma similar já relatada anteriormente, algumas frequências espúrias de pequenas amplitudes foram encontradas ora pelo 4507B, ora pelos MPUs. Ainda assim, é possível perceber a predominância da convergência entre as identificações.

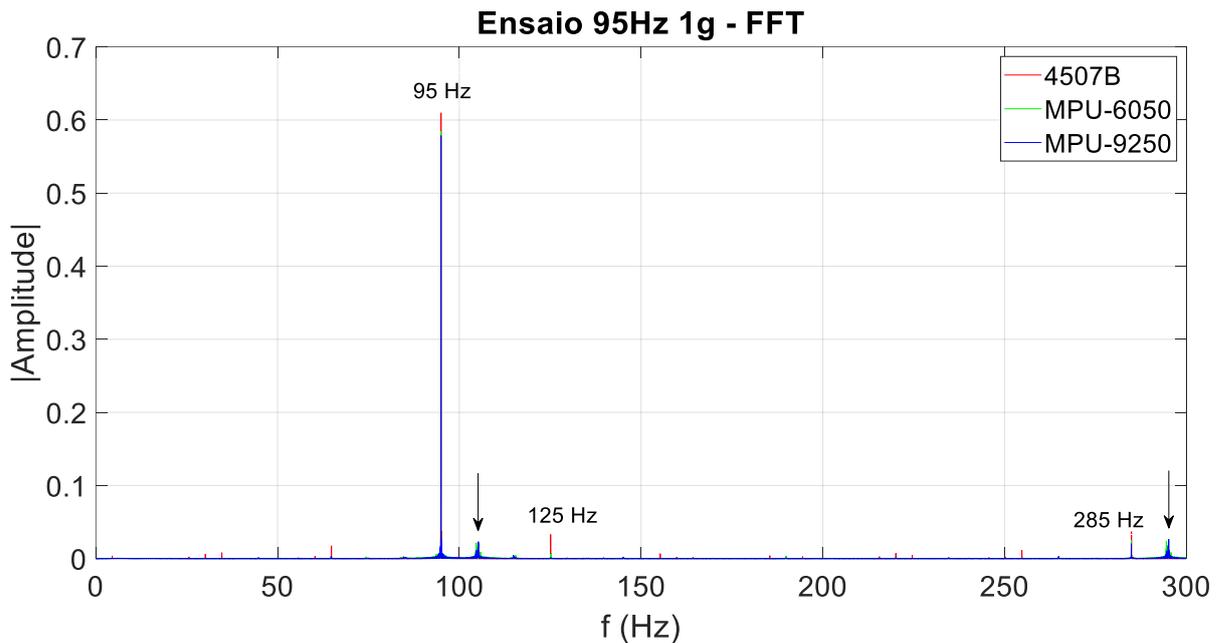


Figura 6.11 - Ensaio 95 Hz e 1g – FFT

Em resumo, foi possível validar o funcionamento do protótipo tendo em vista a análise de seus resultados no domínio da frequência, dentro das frequências e amplitudes experimentadas. Os ruídos apresentados pelo MPU-6050 e MPU-9250 não se mostraram fator de preocupação neste tipo de análise, quando comparados aos exibidos pelo acelerômetro comercial.

6.4 Domínio do Tempo

Alguns dos trabalhos citados na revisão bibliográfica mostraram que a principal desvantagem do MPU-6050 em relação ao acelerômetro comercial está justamente no domínio do tempo. Essa desvantagem surge do fato de que tanto o MPU-6050, assim como o MPU-9250, possuem uma menor relação sinal/ruído para pequenas amplitudes de vibração.

Dessa forma, pretende-se, nesta seção, quantificar a divergência entre o MPU-6050 e o 4507B, assim como avaliar se o MPU-9250 pode ser uma melhor opção quando comparado ao MPU-6050 no domínio do tempo. Ao se quantificar o erro, é possível estabelecer um intervalo de confiança para que o protótipo possa ser utilizado em diagnósticos estruturais que são estabelecidos a partir de dados temporais como, por exemplo, o critério de aceleração máxima em uma estrutura.

Na presente análise, os ensaios descritos na seção 6.2 são rerepresentados. O ensaio realizado com o calibrador universal possui especial importância neste caso, já que é o ensaio

capaz de fornecer uma frequência de excitação de 159,2 Hz e aceleração máxima de 1,00 g, sem harmônicos. O resultado do ensaio utilizando o calibrador é mostrado na Figura 6.12. A duração total do ensaio foi de 60 segundos. No entanto, apenas um intervalo de 1s é ilustrado, a fim de melhor visualizar os dados registrados.

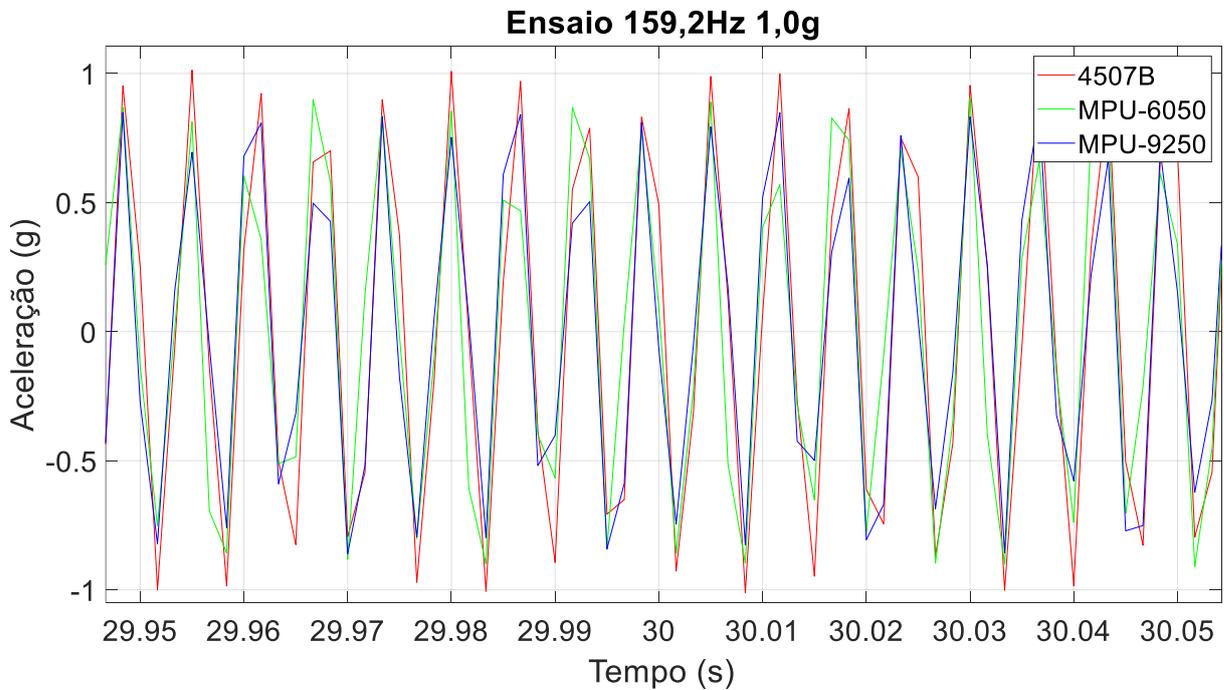


Figura 6.12 - Calibrador 159,2 Hz 1,0g

Visualmente é possível perceber que o MPU-6050 e o MPU-9250 foram capazes de representar o comportamento da vibração no domínio do tempo quando comparados ao 4507B. É importante notar que pelo fato de a taxa de amostragem ser 600 Hz e a frequência de excitação 159,2Hz, muitas vezes os picos de aceleração não coincidem com a aceleração máxima do calibrador de 1g. A Tabela 6.3 mostra as acelerações máximas e mínimas encontradas para cada acelerômetro.

Os valores de aceleração máxima são importantes para perceber que o 4507B, que possui o menor nível de ruído, obteve um maior valor de faixa de aceleração, baseada nas leituras máximas. Logo, é necessário estabelecer um fator multiplicativo para os acelerômetros protótipos, assim como o 4507B possui uma constante multiplicativa em seu certificado.

	Aceleração (g)		
	Mínima	Máxima	Faixa Média
4507B	-1,0279	1,0191	$\pm 1,0235$
MPU-6050	-0,9717	0,9600	$\pm 0,9658$
MPU-9250	-0,8671	0,8717	$\pm 0,8694$

Tabela 6.3 – Acelerações Máximas com Calibrador

Para estabelecer esse fator multiplicativo, levar em consideração as leituras máximas dos acelerômetros não é a melhor opção, dado que um único ponto em que o ruído fuja do habitual é suficiente para impactar fortemente o fator multiplicativo.

Dessa forma, propõe-se como primeiro passo identificar as posições no tempo em que a frequência dominante atinge a sua aceleração máxima e, em seguida, encontrar os picos de aceleração. No calibrador universal isso se torna mais simples pelo fato de o sinal possuir apenas uma frequência. No *shaker*, entretanto, é necessário utilizar um filtro de frequência, obter a localização no tempo de aceleração máxima para a frequência dominante e, em seguida, voltar para o sinal bruto para obter a aceleração naquele instante de tempo, já que os filtros de frequência alteram a amplitude do sinal.

Novamente, é importante lembrar que nem sempre a amostragem coincide com a aceleração máxima real, porém como todos os acelerômetros possuem a mesma taxa de amostragem, todos os acelerômetros estarão em proporção de erro de amostragem.

Em seguida, cria-se um filtro para evitar que *outliers* interfiram tendenciosamente na média dos valores máximos obtidos. Assim, são retiradas 5% das leituras que mais se distanciam da média, ou seja, 2,5% das menores leituras e 2,5% das maiores leituras.

Com a média dos valores máximos, já filtrados, é possível realizar uma comparação entre os acelerômetros 4507B, MPU-6050 e MPU-9250, determinando-se um fator multiplicativo que faça com que o MPU-6050 e o MPU-9250 estejam com a mesma média de picos quando comparados ao 4507B. Cada um dos ensaios possui o seu próprio valor multiplicativo, como mostrado na tabela 6.4 para o MPU-6050, e na tabela 6.5 para o MPU-9250.

Analisando as tabelas, é possível notar que não há como estabelecer uma constante de calibração para nenhum dos dois protótipos aqui apresentados. O acelerômetro 4507B, conforme pode ser visto no Anexo A, fornece uma constante de calibração única e a faixa de frequência que o acelerômetro deve trabalhar como forma de obter um erro máximo de 10% embutido na leitura.

Assim, no caso do MPU-6050 e do MPU-9250 é possível estabelecer uma margem de erro para uma dada faixa de frequência em que o acelerômetro esteja trabalhando. Diferente do que ocorre no 4507B, onde uma variação menor de 10% é garantida até a frequência de 6 kHz, espera-se uma frequência limite menor para os acelerômetros protótipos, admitindo-se inclusive erros maiores.

		Amplitude de aceleração						
		0,02 g	0,05 g	0,1 g	0,2 g	0,5 g	1 g	1,5 g
Frequências	2,5 Hz	0,9170	0,9378	1,0128	1,0786	1,0953	1,0710	X
	5 Hz	X	0,9075	0,9423	0,9708	1,0730	1,0506	1,0294
	10 Hz	X	0,9469	1,0213	1,0508	1,0385	1,0387	1,0433
	20 Hz	X	X	X	1,0952	1,0806	1,0497	1,0449
	49 Hz	X	X	X	X	1,0959	1,0733	1,0378
	95 Hz	X	X	X	X	X	1,1568	1,1281
	159,2Hz	X	X	X	X	X	1,1359	X

Tabela 6.4 – Fatores Mutiplicativos para MPU-6050

		Amplitude de aceleração						
		0,02 g	0,05 g	0,1 g	0,2 g	0,5 g	1 g	1,5 g
Frequências	2,5 Hz	0,9001	0,9500	1,0024	1,0763	1,0919	1,0846	X
	5 Hz	X	0,9106	1,0127	1,0378	1,0368	1,0503	1,0609
	10 Hz	X	1,0152	1,0633	1,0802	1,0534	1,0478	1,0311
	20 Hz	X	X	X	1,0984	1,0218	1,0480	1,0434
	49 Hz	X	X	X	X	1,0917	1,0728	1,0477
	95 Hz	X	X	X	X	X	1,1940	1,1531
	159,2Hz	X	X	X	X	X	1,1987	X

Tabela 6.5 – Fatores Mutiplicativos para MPU-9250

Analisando-se os resultados apresentados na tabela 6.4 e tabela 6.5, é possível perceber que em uma faixa de frequência de 2,5 Hz até 49 Hz, é seguro estipular uma margem de erro de 10%. Caso a faixa de frequência esteja entre 2,5 Hz e 159,2Hz, é seguro estipular uma margem de erro de 20%. Essas são estimativas para o erro de leitura dos sensores MPU-6050 e MPU-9250, não incluindo as margens de segurança previstas em cada projeto, que devem ser acrescidas após considerar a margem de erro dos acelerômetros.

Caso as aplicações permitam a margem de erro apresentada nesse trabalho e estejam dentro da faixa de frequência estipulada para o erro permitido, então é possível a utilização do MPU-6050 ou MPU-9250.

Por fim, são apresentados os mesmos ensaios que foram mostrados no domínio da frequência. A Figura 6.13 ilustra o ensaio a 2,5 Hz e 0,02g, com uma baixa relação sinal/ruído.

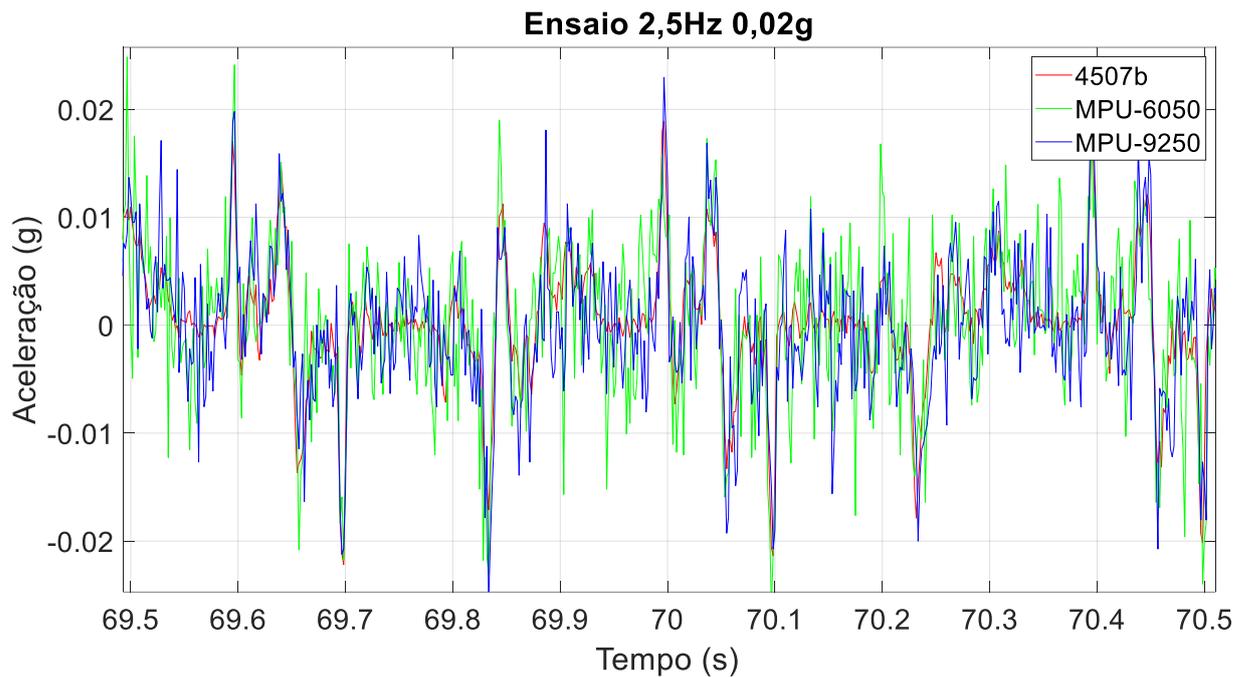


Figura 6.13 - Ensaio 2,5 Hz 0,02g – Tempo

A Figura 6.14 mostra o ensaio a 2,5 Hz e 1g, com uma alta relação sinal/ruído, onde é possível visualizar o comportamento da vibração, em uma escala onde o ruído é imperceptível visualmente para os três acelerômetros. O mesmo acontece para o ensaio de 20 Hz e 0,2g, na Figura 6.15, sendo que mesmo com a faixa de aceleração de 0,2g, o ruído fica menos significativo visualmente.

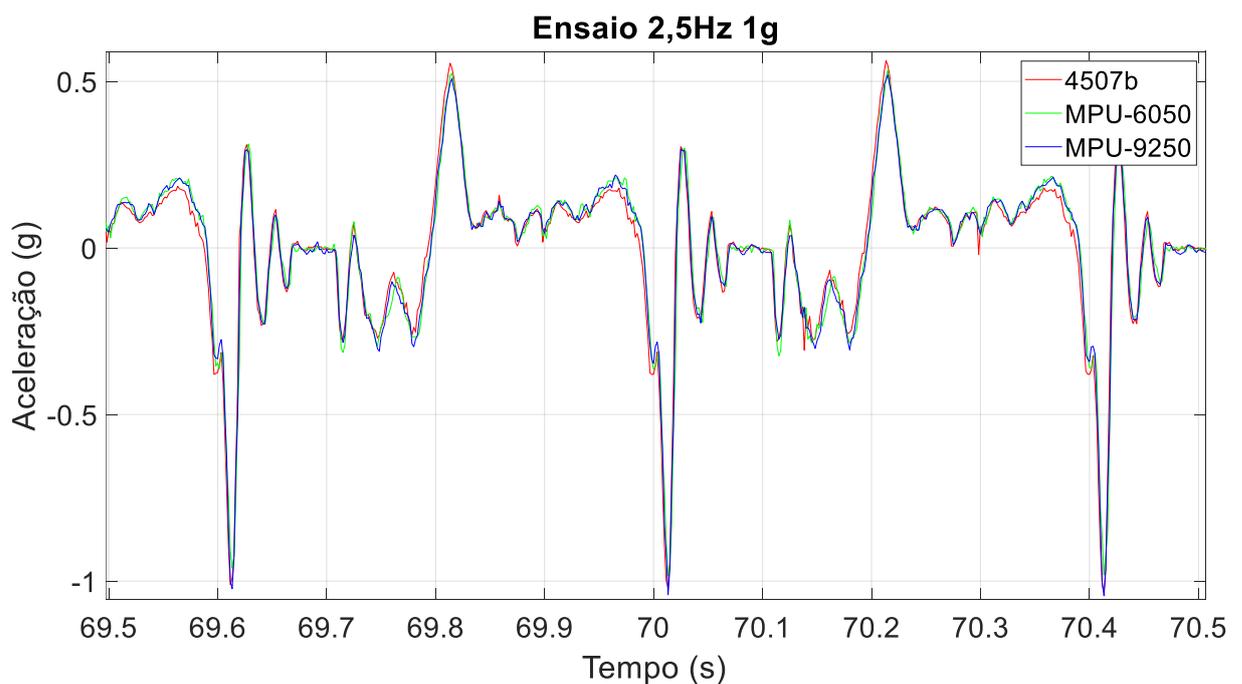


Figura 6.14 - Ensaio 2,5 Hz 1g - Tempo

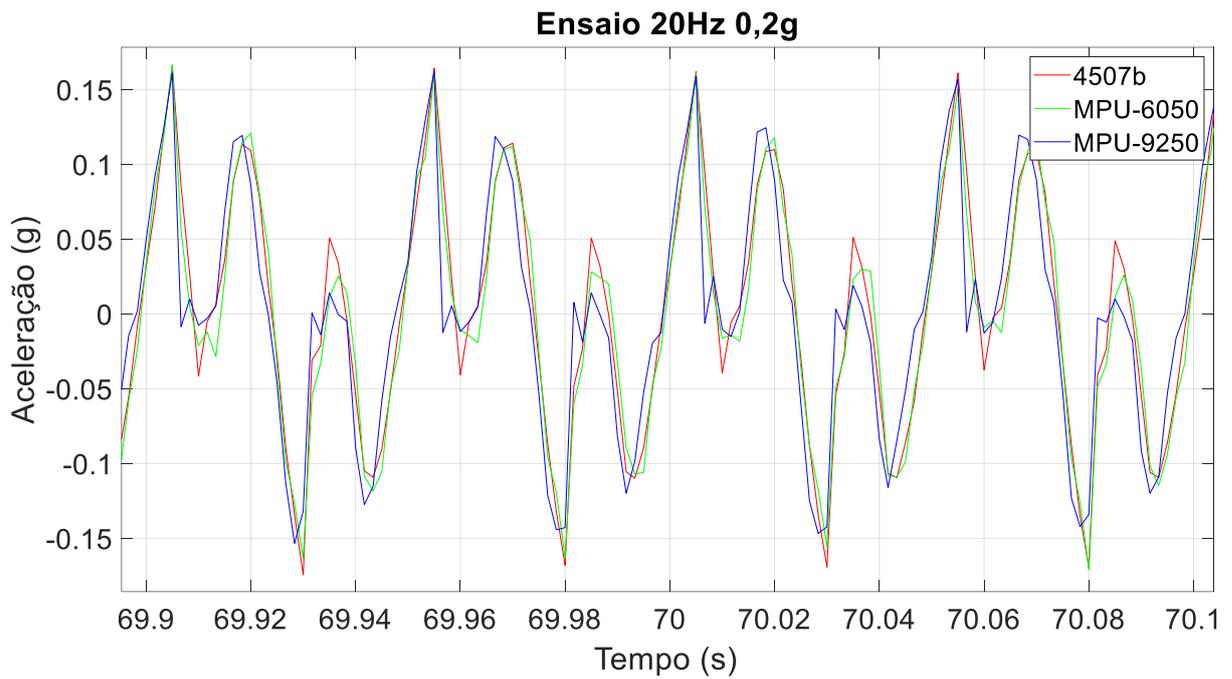


Figura 6.15 - Ensaio 20 Hz 0,2g – Tempo

Em seguida, apresenta-se o ensaio a 95Hz e 1g, na Figura 6.16, com uma alta relação sinal/ruído, e onde a relação entre a taxa de amostragem e a frequência de ensaio fica aproximadamente 6,3. Dessa forma, muitas vezes a amostragem não coincide com a aceleração máxima do ciclo.

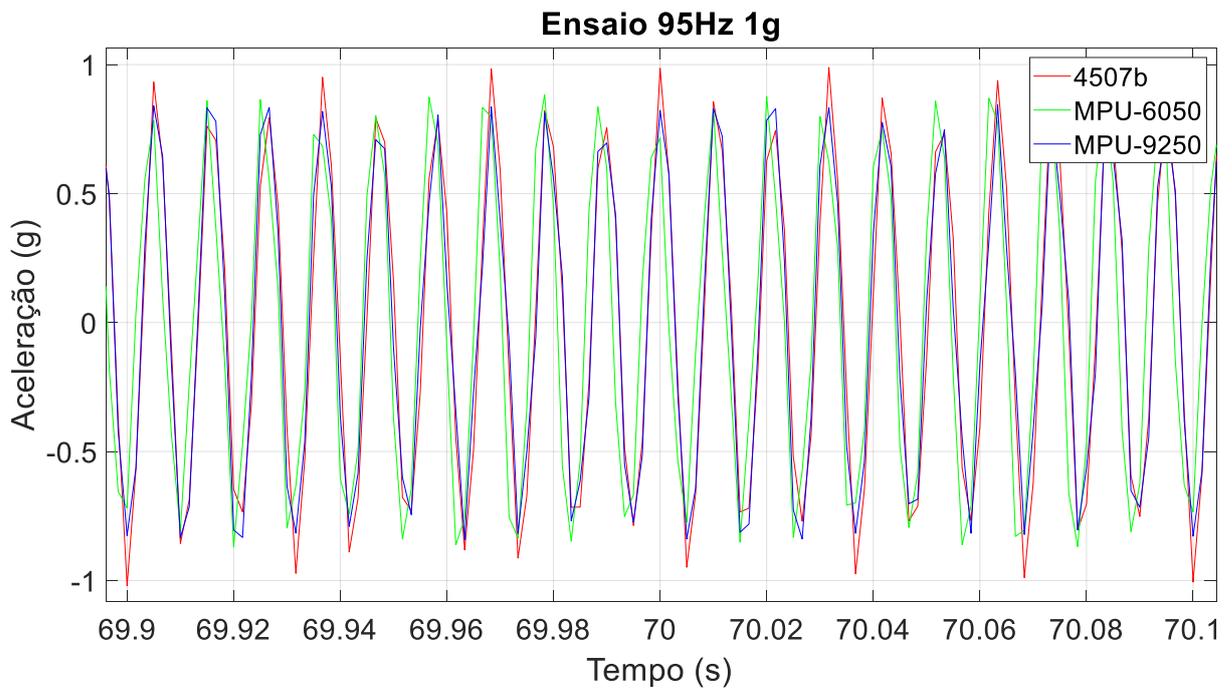


Figura 6.16 - Ensaio 95 Hz 1g – Tempo

Por fim, é possível perceber que a principal perda de desempenho do MPU-6050, assim como o MPU-9250, acontece no domínio do tempo. Os acelerômetros protótipos não possuem a intenção de atingir desempenho em altas frequências, como o 4507B que trabalha até 6 kHz. Nessa seção, foi possível verificar a confiabilidade dos sensores para faixas de frequências compatíveis principalmente com as encontradas em SHM, mas podendo ser encontradas em outras aplicações mais amplas.

7 Conclusões

Este trabalho propôs um acelerômetro sem fio de baixo custo para monitoramento dinâmico estrutural, baseado em um computador de placa única Raspberry Pi. Todo o processo de planejamento, programação, execução e avaliação foi realizado tendo como objetivo reduzir os custos de implementação mantendo a integridade dos dados, visando a confiabilidade do protótipo.

Durante o estudo das possibilidades de hardware e software foram escolhidos os que melhor se adaptaram ao critério de confiabilidade e baixo custo. O Raspberry Pi 3 Model B foi capaz de avançar por limitações que em outros trabalhos dificultavam a eficiência, como a falta de memória de acesso rápido e a comunicação *wireless*.

A comunicação sem fio foi realizada através de uma rede local sob o protocolo *Wi-Fi*, sem dificuldade para a transmissão de dados. O protocolo *Wi-Fi* permitiu que os sensores fossem acessados remotamente, o que não havia sido possível até o presente trabalho. A comunicação sem fio não é mais uma limitadora de performance para o protótipo aqui apresentado. Como mencionado, existe possibilidade de aprimoramento, como a implementação de uma comunicação *peer-to-peer*. Ao que diz respeito a comunicação *wireless*, é possível validar o que foi proposto nesse trabalho.

Sobre o ruído do sensor ao ser avaliado em repouso, foi possível perceber que o aumento de ruído do 4507B para os protótipos está entre 600% e 800%, o que é um aumento significativo em percentual. Porém, ao analisar a faixa do ruído em repouso, que para o 4507B está na ordem 0,001g, para o MPU-6050 e MPU-9250 está na ordem de 0,01g. Ou seja, em uma aplicação onde se deseja leituras da ordem de 0,001g, os protótipos não são indicados, mas para acelerações que estejam acima da ordem de grandeza de 0,01g, se torna viável a utilização dos protótipos visando diminuir os custos e usufruir dos benefícios que a comunicação *wireless* proporciona.

No domínio da frequência os protótipos confirmaram o que já havia sido apresentado em trabalhos anteriores, isso é, a sua confiabilidade ao identificar as frequências presentes no sinal. Como era esperado, em maiores amplitudes de aceleração todos os sensores tiveram melhor desempenho em representar o fenômeno ensaiado, sendo que mesmo nas menores amplitudes ainda foi possível determinar as frequências. Logo, nesse trabalho foi validado a confiabilidade dos protótipos para o intervalo de frequências entre 2,5Hz e 159,2Hz.

No domínio do tempo os protótipos apresentaram o seu maior distanciamento ao acelerômetro comercial. Isso se deve ao fato de os sensores utilizados nos protótipos não possuírem um fator de calibração de ajuste único, como possui o 4507B. Foi mostrada a incapacidade do protótipo de trabalhar em altas frequência, tanto pela limitação de amostragem do MPU-6050 (1000 Hz) e do MPU-9250 (4000 Hz), quanto pelo erro embutido na leitura que aumenta conforme a frequência aumenta.

Ainda no domínio do tempo, o trabalho apresenta que os protótipos podem ser utilizados com confiabilidade desde que sejam utilizadas margens de segurança. Em aplicações onde a faixa de frequência esteja entre 2,5 Hz até 49 Hz, é seguro estipular uma margem de erro de 10%. E caso a faixa de frequência esteja entre 2,5 Hz e 159,2Hz, é seguro estipular uma margem de erro de 20%. Caso seja aceitável possuir a margem de erro dentro do sistema proposto, novamente os protótipos aqui apresentados podem ser utilizados como forma de diminuir os custos e usufruir dos benefícios que a comunicação *wireless* proporciona.

A substituição do MPU-6050 para o MPU-9250 não se justifica com o objetivo de reduzir significativamente os ruídos, mas é justificada caso seja necessária uma taxa de amostragem superior a 1000 Hz em um único eixo, podendo o MPU-9250 chegar a 4000 Hz em um único eixo.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

Por fim, sugere-se a implementação dos protótipos em uma estrutura real de grande vulto, como forma de avaliar outros processos comuns ao SHM, como os métodos de identificação modal e a implementação de filtros no sistema sem fio, juntamente com a sincronização remota de múltiplos sensores e avaliação do consumo de energia com maior confiabilidade. Essa implementação tornará possível transformar o protótipo em produto final, e assim contribuir para a evolução dos sistemas de monitoramento dinâmico de estruturas.

Referências

- Abdelgawad, A., Yelamarthi, K., 2017. **Internet of Things (IoT) Platform for Structure Health Monitoring**. Wireless Communications and Mobile Computing. Volume 2017, Article ID 6560797
- Afsana, A., Anbarasi, S., Deepa, P., Ghaveya, R., Marugesan, D., 2018. **Wireless Sensor Network Based Crack Detection on Concrete Bridges/Buildings**. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 57 Number 2.
- Bai, H., Atiquzzaman, M., Lilja, D., 2004. **Wireless sensor network for aircraft health monitoring**. Proceedings of First International Conference on Broadband Networks.
- Battista, R., & Pfeil, M., 2000. **Reduction of vortex-induced oscillations of Rio-Niterói Bridge by dynamic control devices**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 84, n. 3, pp. 273–288.
- Brüel & Kjær, 2018. **Product Data CCLD TEDS Accelerometer Type 4507-B**.
- Cardini, A.J., & DeWolf, J.T., 2009. **Long-term Structural Health Monitoring of a Multi-Girder Steel Composite Bridge Using Strain Data**. Structural Health Monitoring, vol. 8, n. 1, pp. 47-58.
- Chandankhede, V., 2017. **Health Monitoring of Highway Bridges Using Wireless Sensor Networks**. International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE). Volume 6, Issue 8.
- Cury, A., Borges, C.C.H., & Barbosa, F.S., 2010. **A two-step technique for damage assessment using numerical and experimental vibration data**. Structural Health Monitoring, vol. 10, n. 4, pp. 417-428.
- Darus, I.Z.M., & Tokhi, M.O., 2005. **Soft computing-based active vibration control of a flexible structure**. Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 18, n. 1, pp. 93-114.
- Doscher, J., 2015. **Accelerometer Design and Applications**. Company brochure, Norwood, MA, 61pp.
- Eler Filho, E. G., 2014. **Proposta de um sistema sem fio para monitoramento e identificação de características dinâmicas de estruturas civis**. Monografia de Graduação em Engenharia de Controle e Automação. Universidade Federal de Ouro Preto.
- FileZilla, 2018. <https://filezilla-project.org/>
- Galdino, E., 2016. **Desenvolvimento de um acelerômetro sem fio de baixo custo para monitoramento dinâmico estrutural**. Monografia de Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Juiz de Fora.
- Gautier, Y., Moretti, O., & Cremona, C., 2005. **Experimental modal analysis of the Millau Bridge**. Proceedings of Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures.

HBM, 2018. **QuantumX MX1601B - Data Sheet.**

InvenSense Inc., 2013. **MPU-6000/MPU-6050 Product Specification, PS-MPU-6000A-00 Datasheet, revision 3.4.**

InvenSense Inc., 2016. **MPU-9250 Product Specification, PS-MPU-9250A-01 Datasheet, revision 1.1.**

Lee, S.L., Su, Y.W., Shen, C.C., 2007. **A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi.** Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE

Lu, Z.R., & Law, S.S., 2009. **Dynamic condition assessment of a cracked beam with the composite element model.** Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 23, n. 2.

Lynx Tecnologia, 2018. <http://www.lynxtec.com.br/>

Mouser Eletronics, 2018. <http://www.mouser.com/>

Pandey, S., Haider, M., & Uddin, N., 2016. **Design and Implementation of a Low-Cost Wireless Platform for Remote Bridge Health Monitoring.** International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, vol. 6, n. 6, pp. 57-62.

Putty, 2018. <https://www.putty.org/>

Raspberry Pi, 2018. <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>

Raspbian, 2018. <https://www.raspbian.org/>

Reynders E., 2009. **System identification and modal analysis in structural mechanics.** PhD thesis, Department of Civil Engineering, KU Leuven.

Shachi, P., Manjunatha, S., 2015. **Automatic Bridge Health Monitoring System Using Wireless Sensors.** International Journal of Science and Research (IJSR). Volume 6 Issue 6.

Sindhu, S.A., & Nirrmala, C.A., 2015. **Structural Health Monitoring Using Wireless Sensor Network.** International Journal of Emerging Technology in Computer Science & Electronics, vol. 13, n. 4, pp. 319-322.

Soyoz, S., & Feng, M.Q., 2009. **Long-Term Monitoring and Identification of Bridge Structural Parameters.** Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol. 24, n. 2.

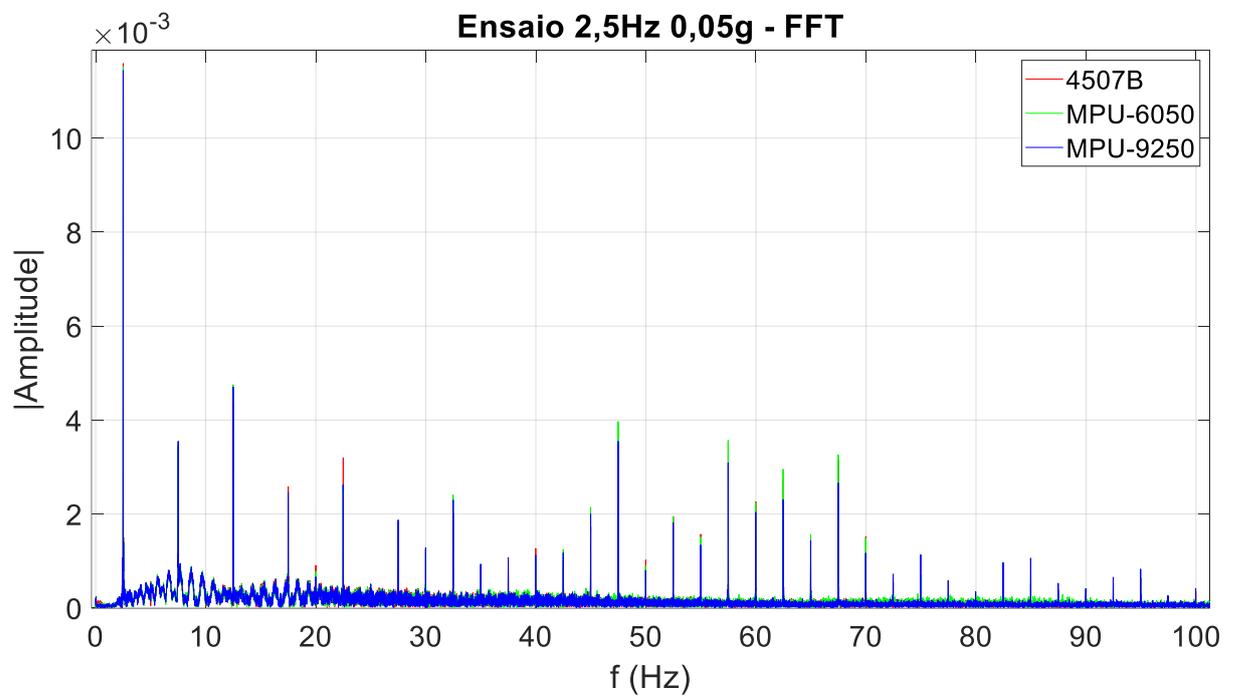
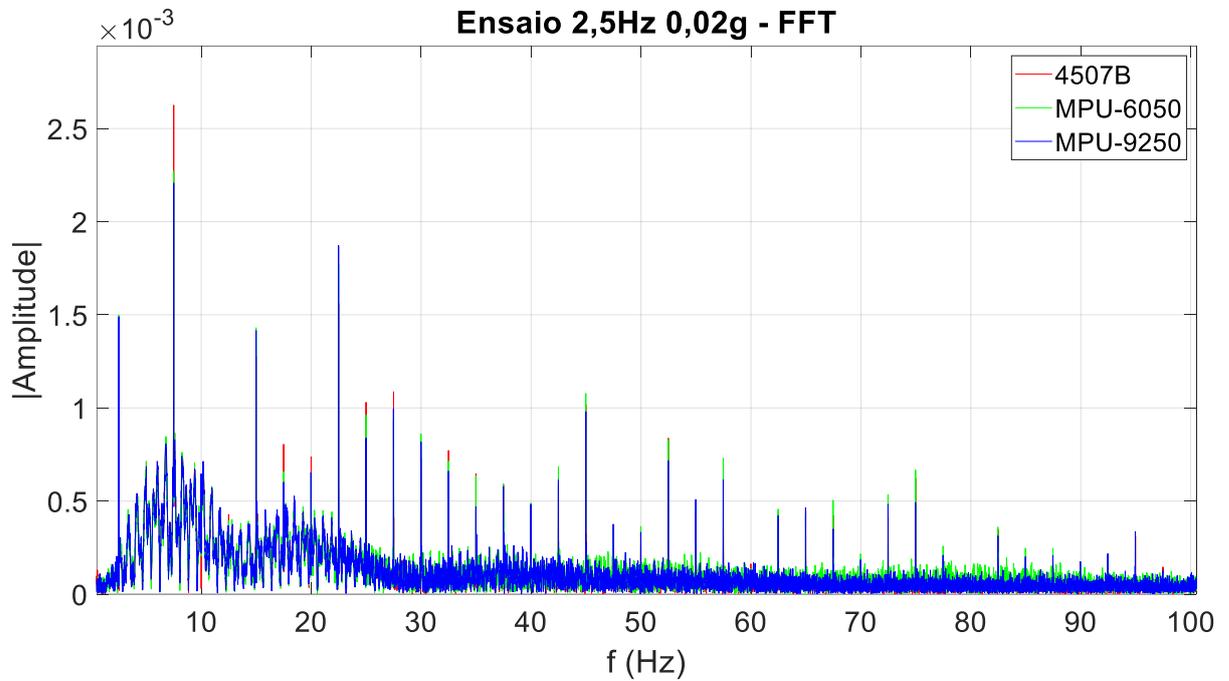
Torres, M.A., & Ruiz, S.E., 2007. **Structural reliability evaluation considering capacity degradation over time.** Engineering Structures, vol. 29, n. 9, pp. 2183-2192.

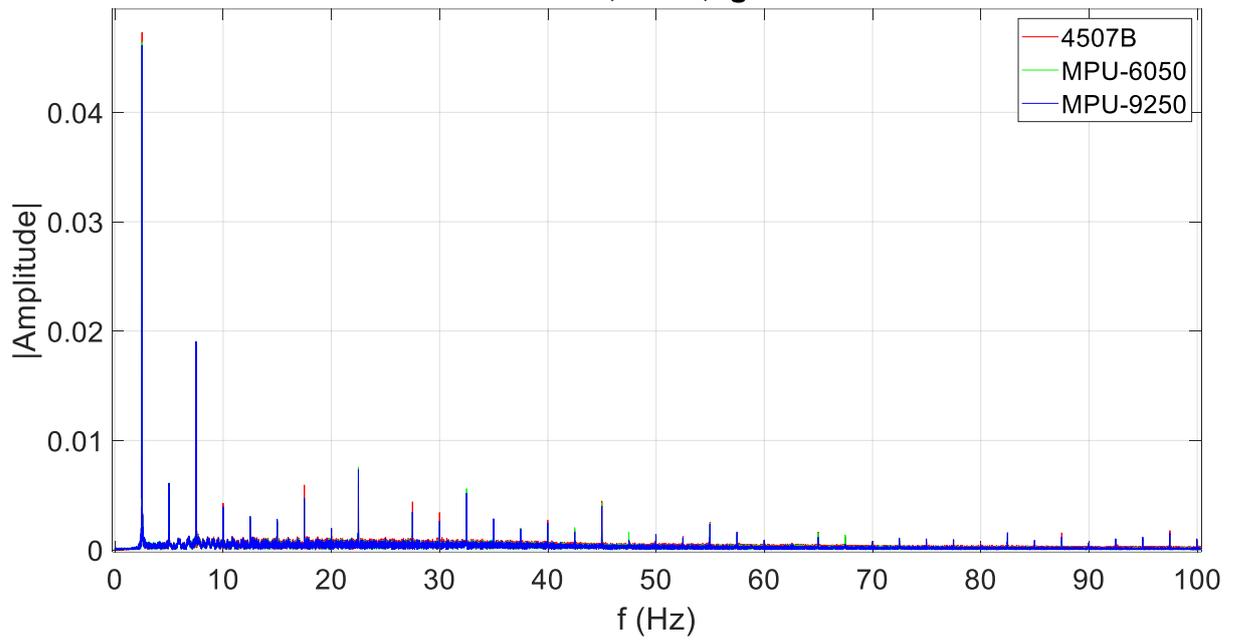
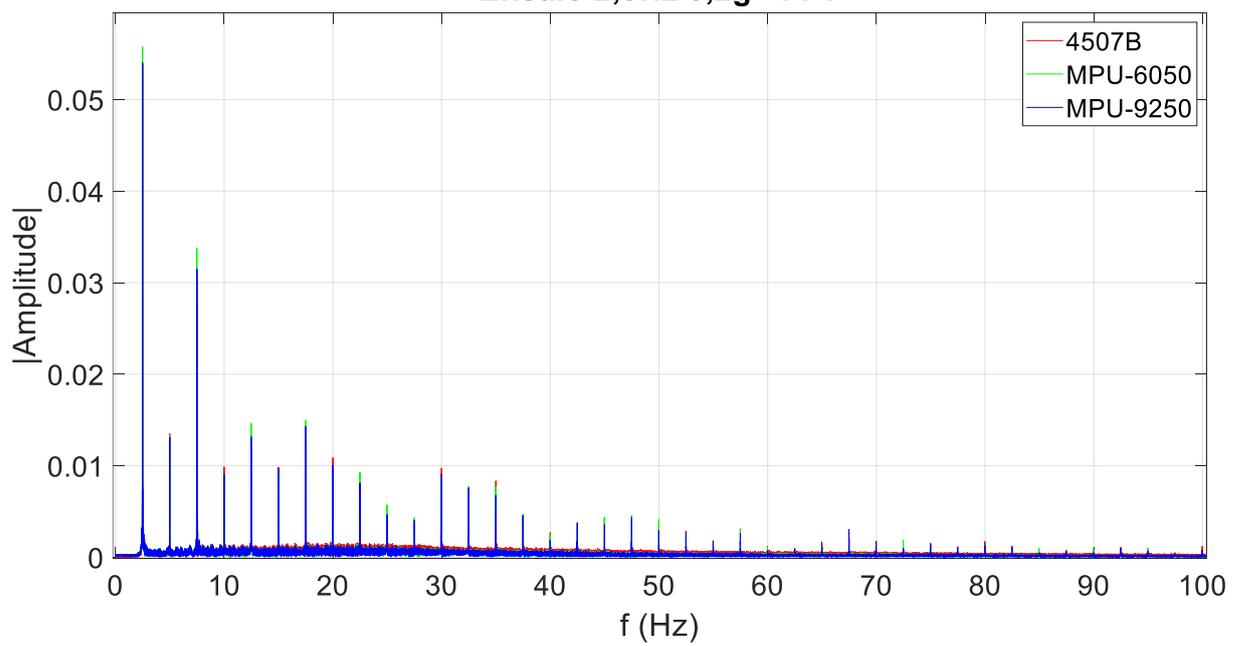
Varanis, M., Silva, A.L., Brunetto, P.H.A., Gregolin, R.F., 2016. **Instrumentation for mechanical vibrations analysis in the time domain and frequency domain using the Arduino platform.** Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 38, n° 1.

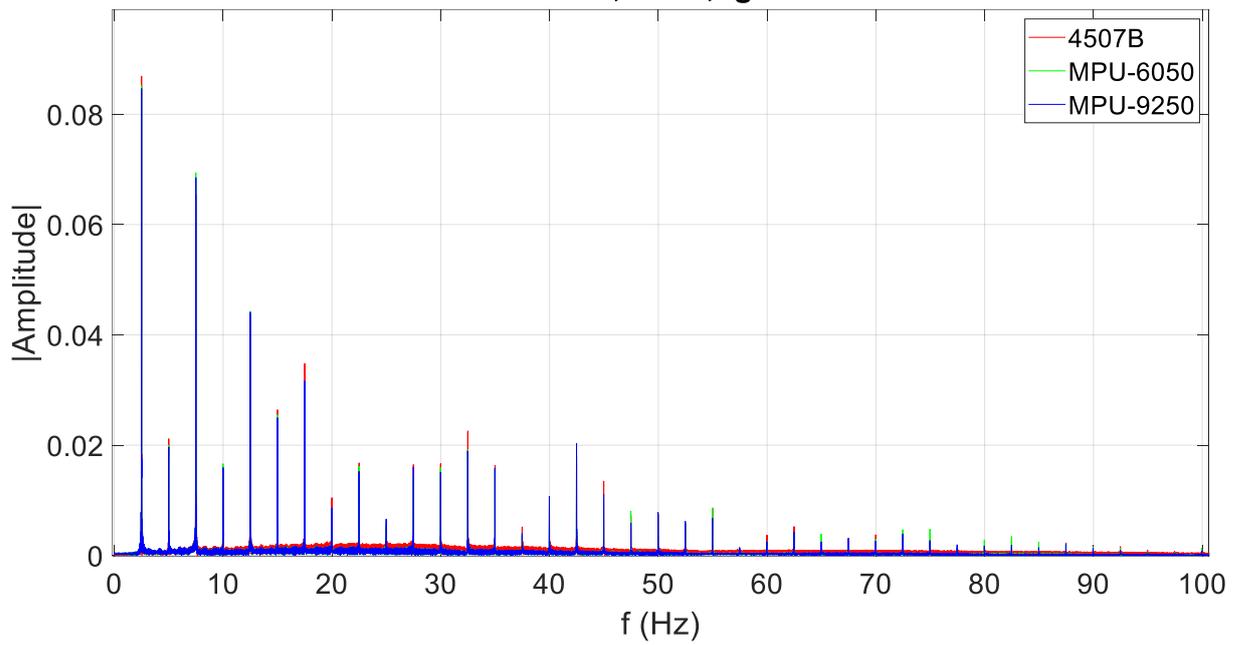
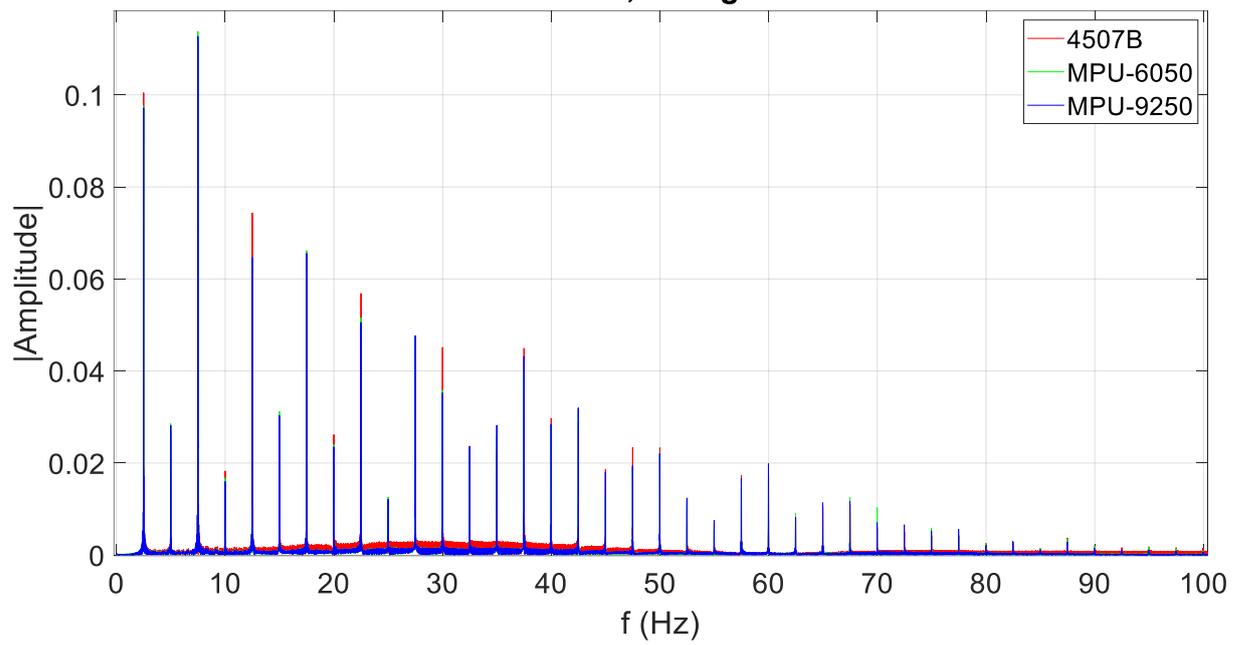
Xu, N., Rangwala, S., Chintalapudi, K., Ganesan, D., Broad, A., Govindan, R., & Estrin, D., 2004. **A Wireless Sensor Network for Structural Monitoring.** Proceedings of the ACM Conference in Embedded Networked Sensor Systems, pp. 13-24.

Apêndice A – Ensaios no Domínio da Frequência

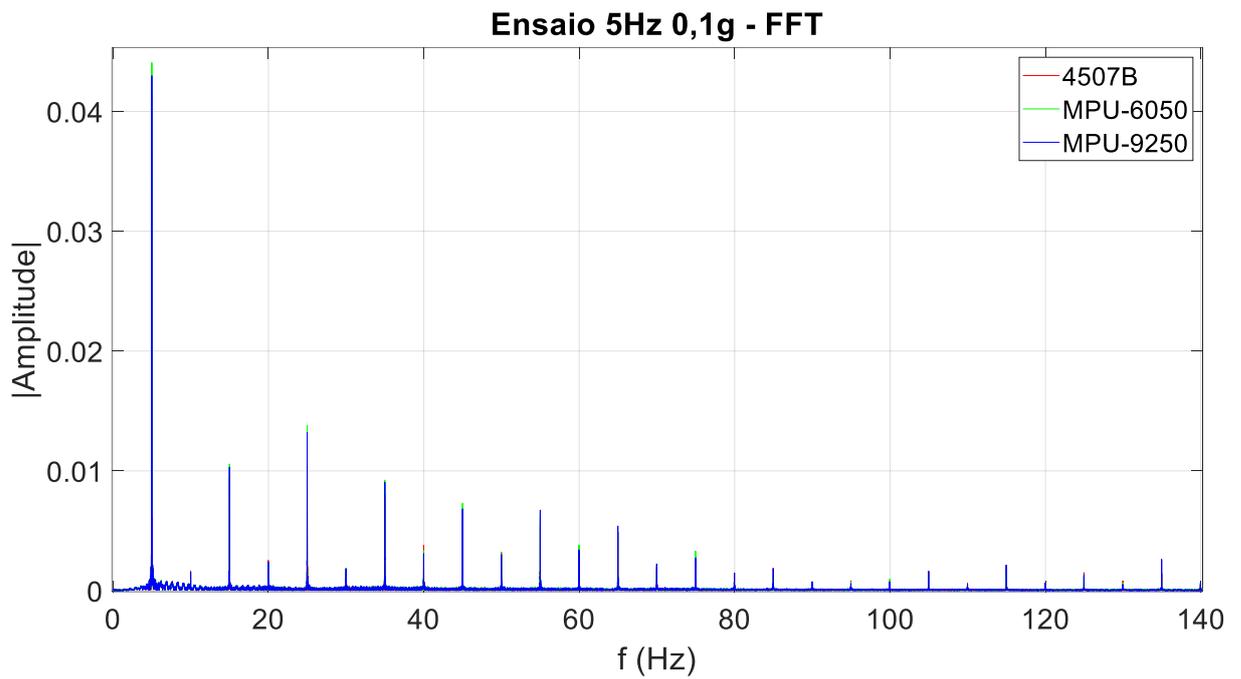
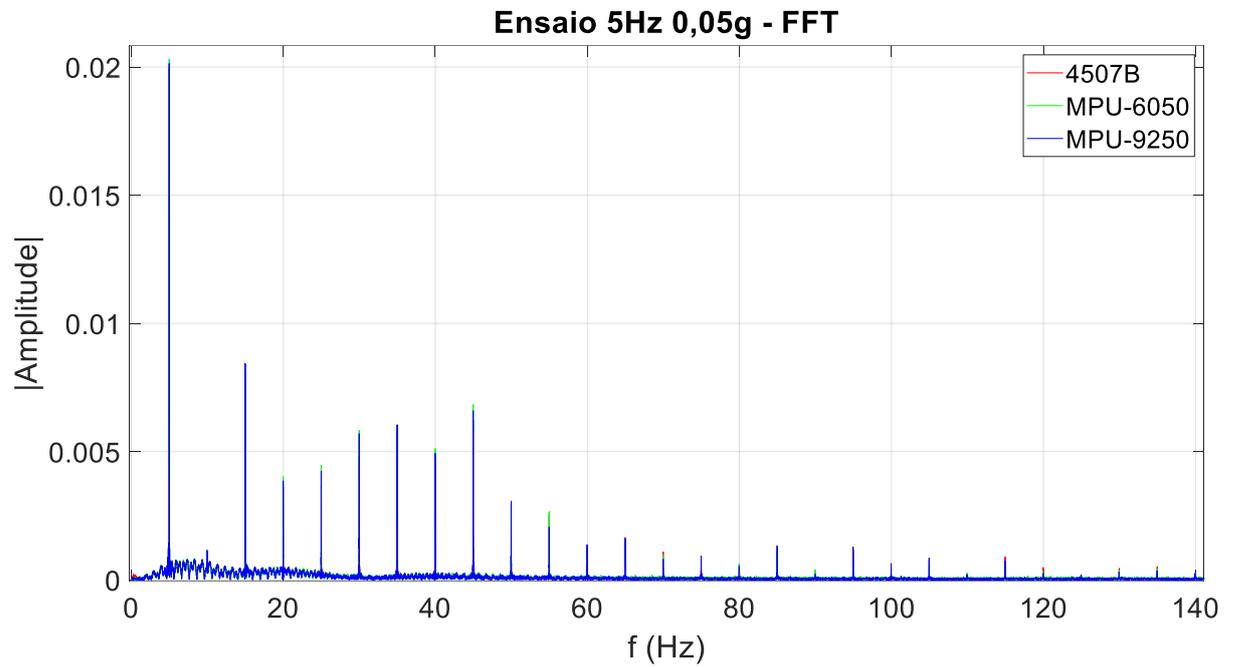
A.1 Ensaios em 2,5 Hz

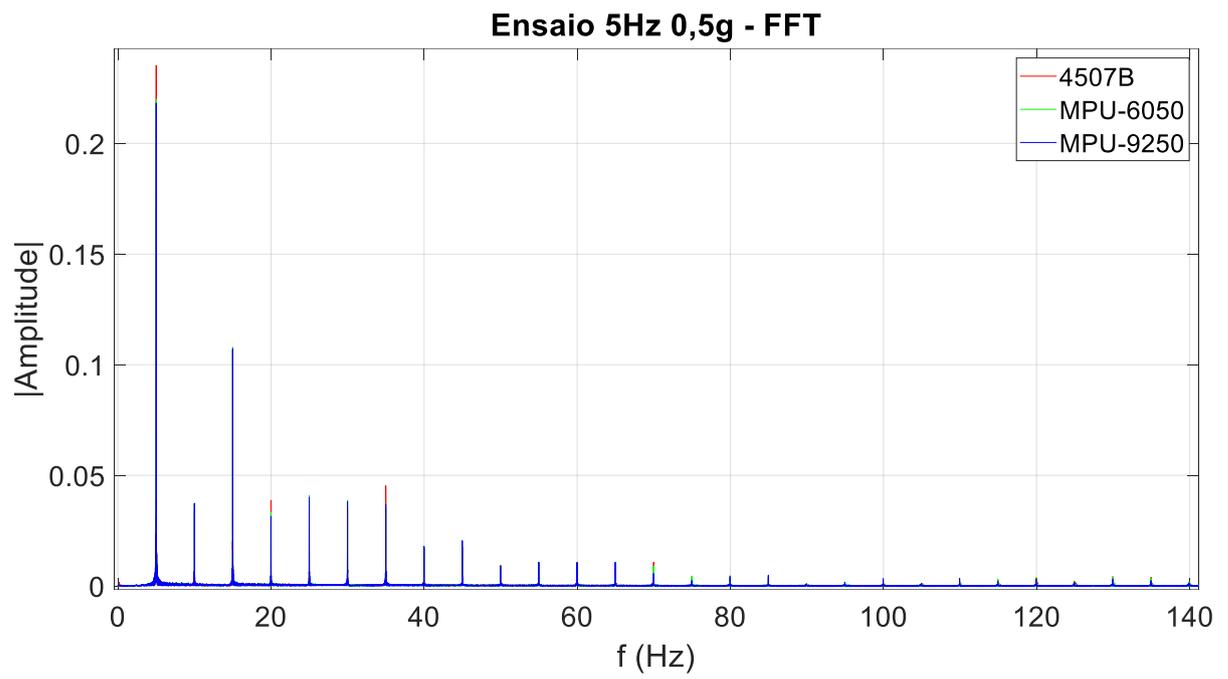
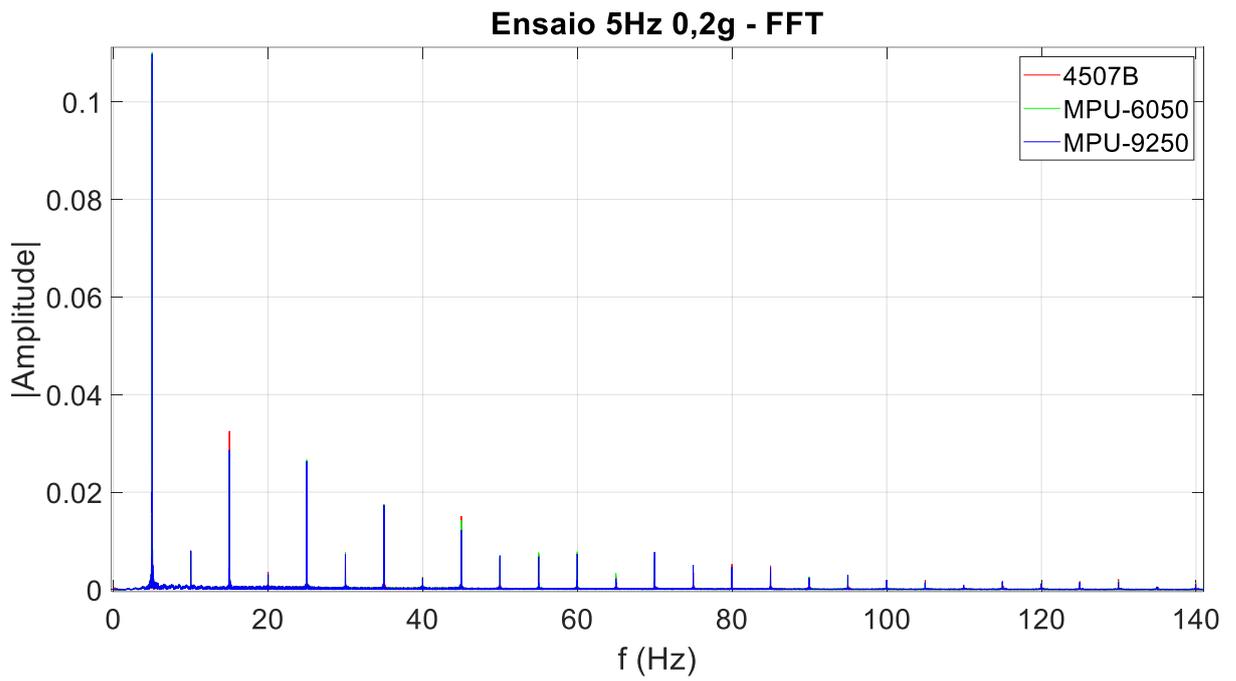


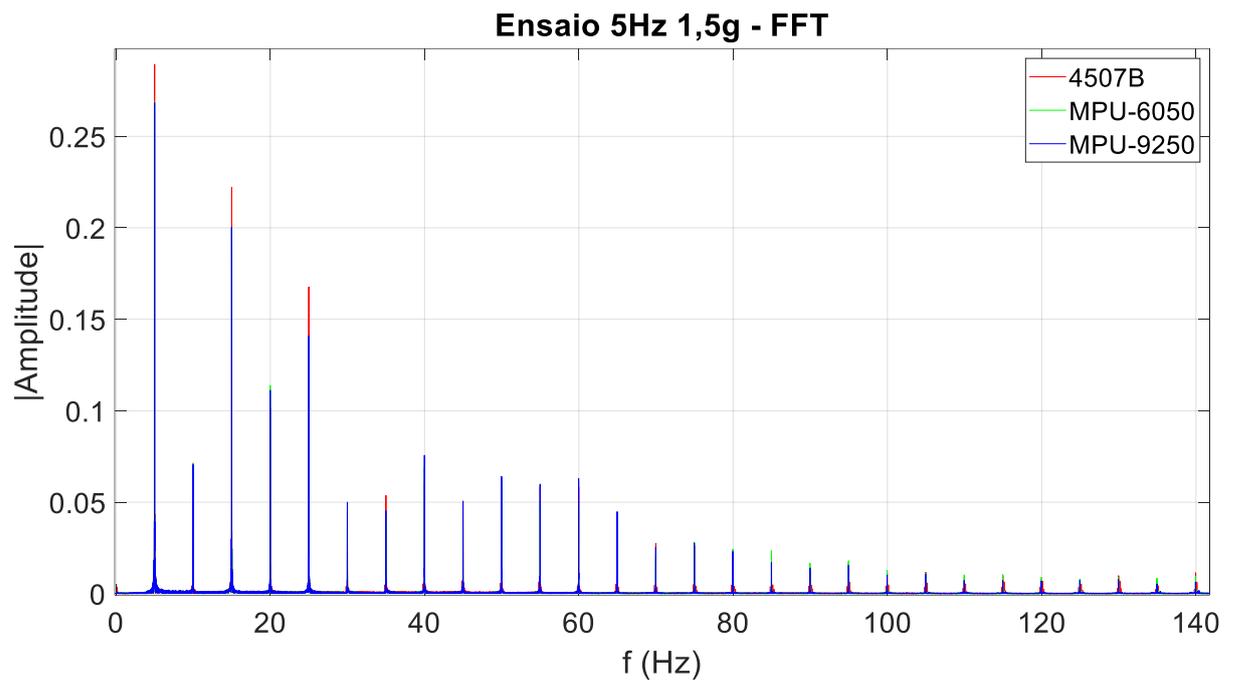
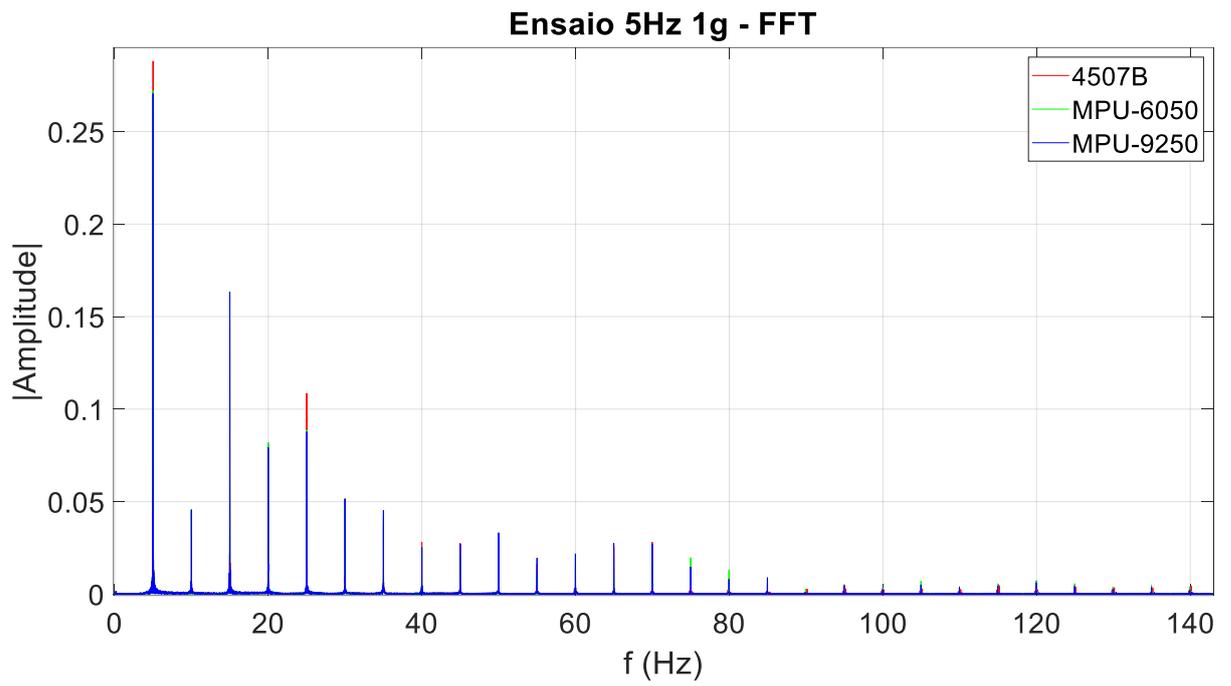
Ensaio 2,5Hz 0,1g - FFT**Ensaio 2,5Hz 0,2g - FFT**

Ensaio 2,5Hz 0,5g - FFT**Ensaio 2,5Hz 1g - FFT**

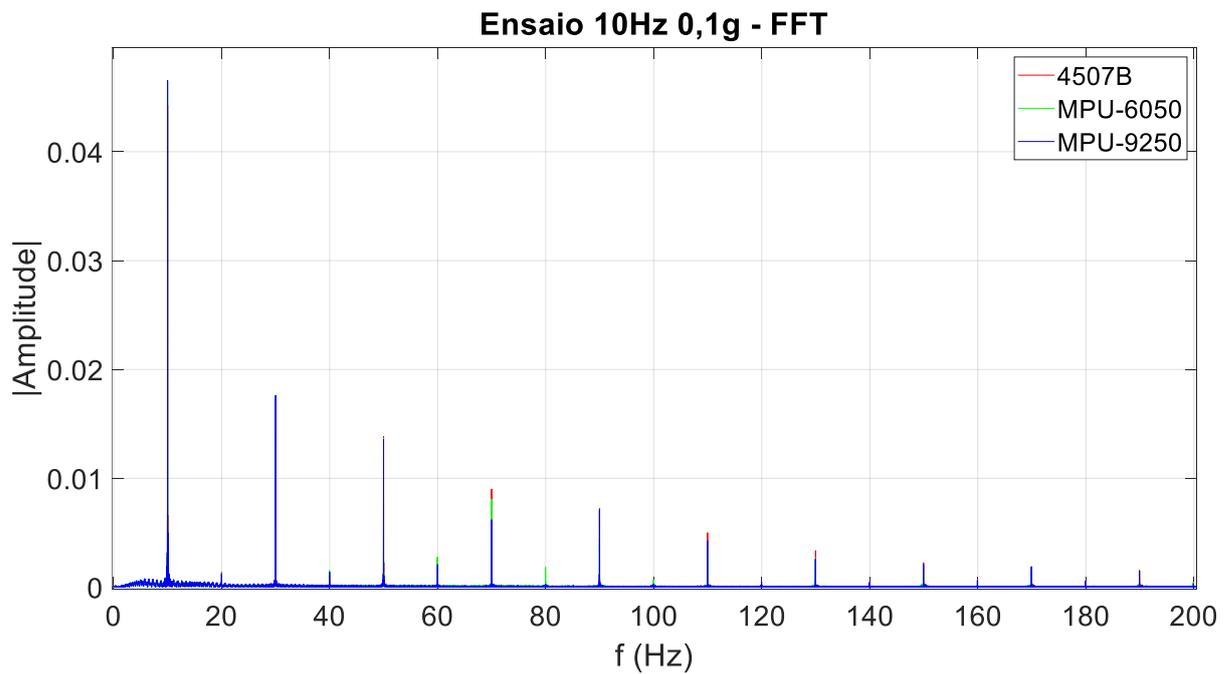
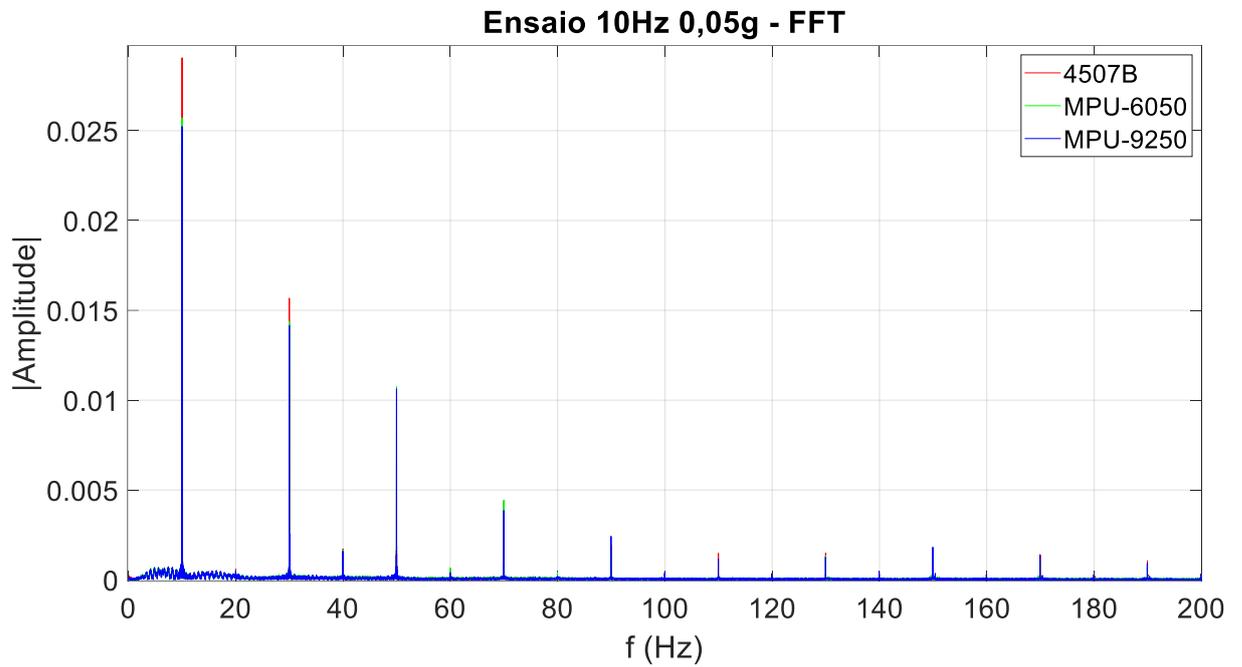
A.2 Ensaio em 5 Hz

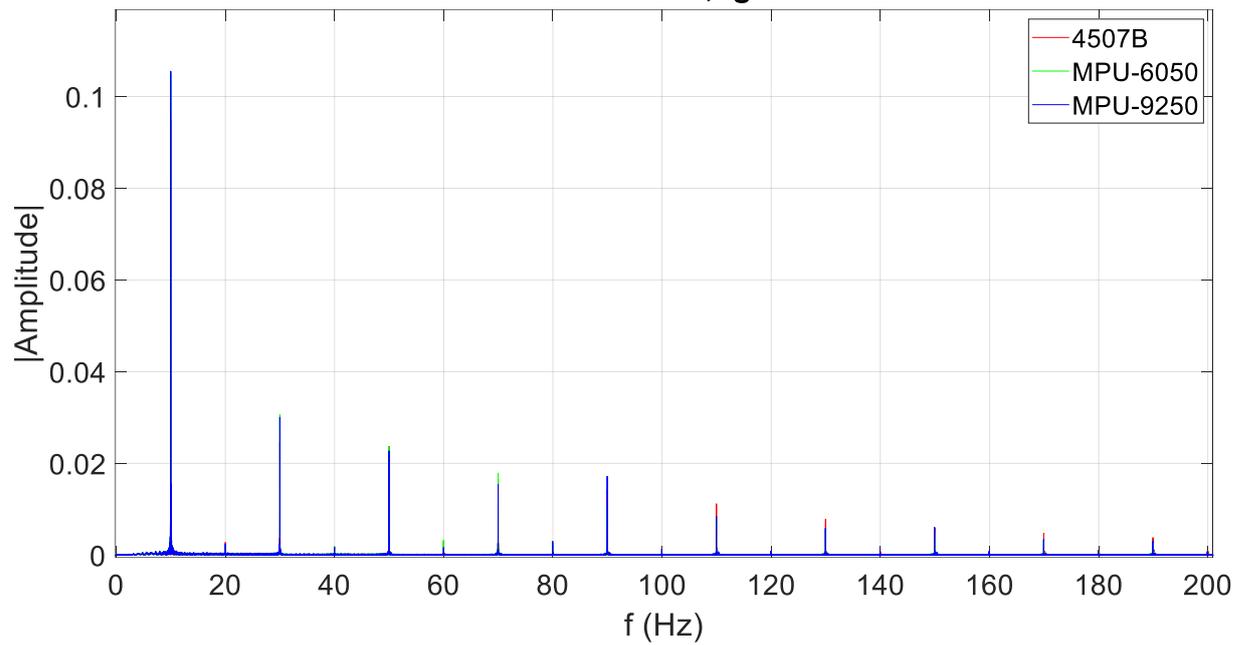
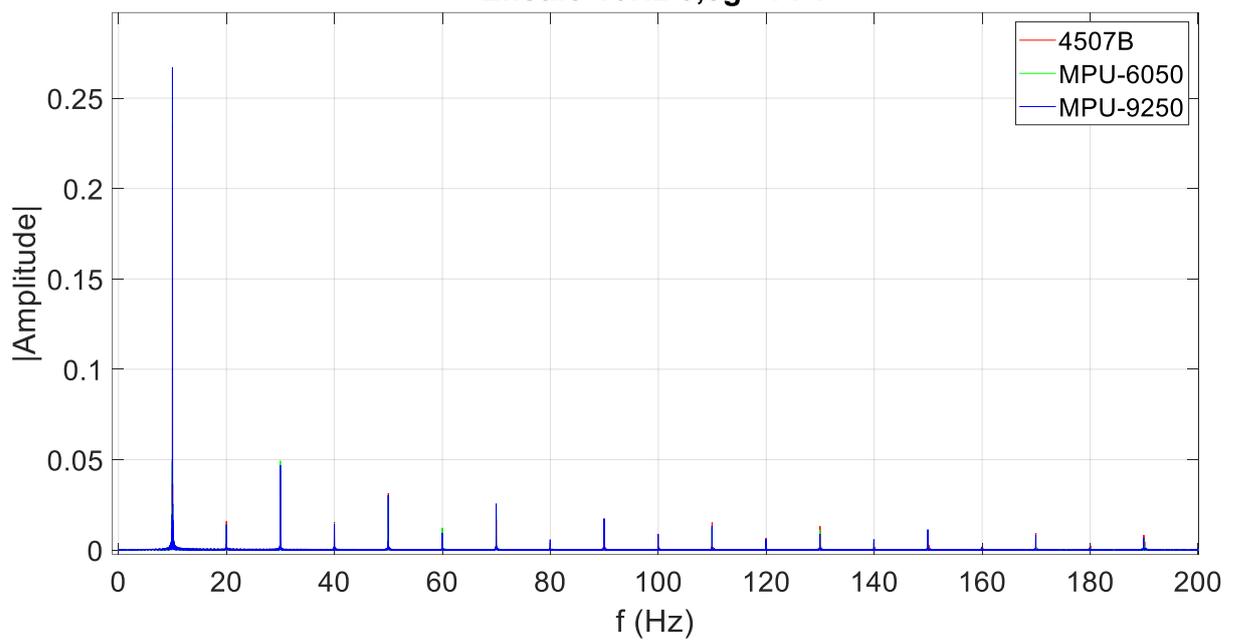


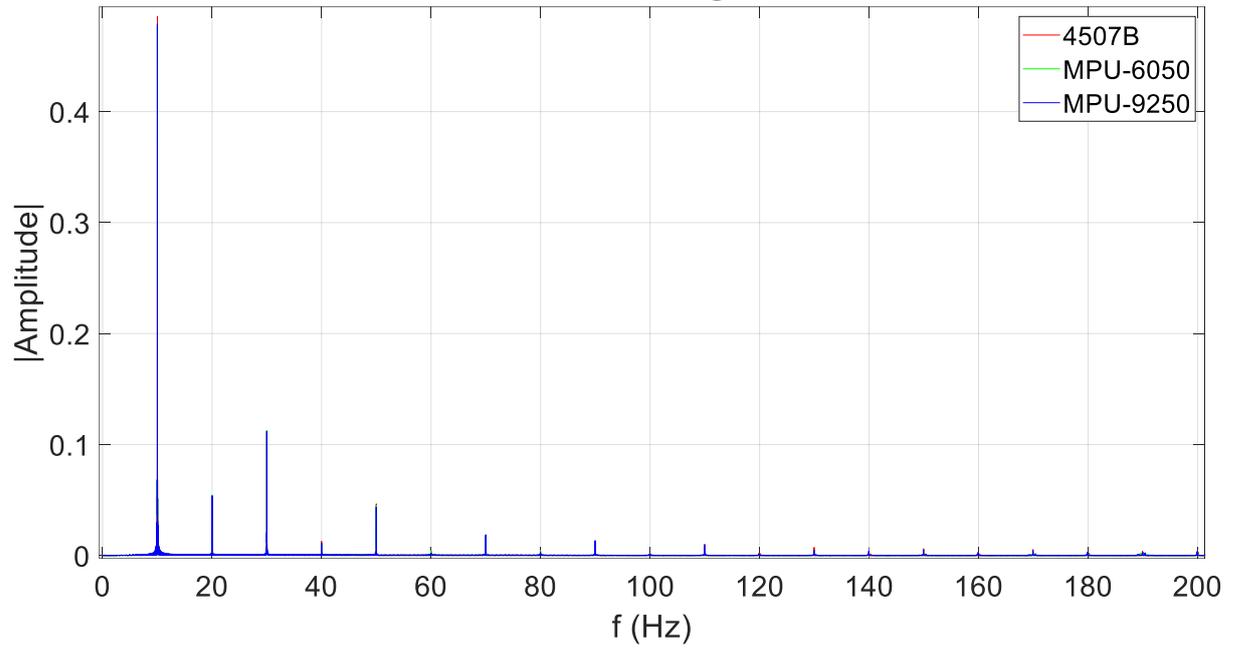
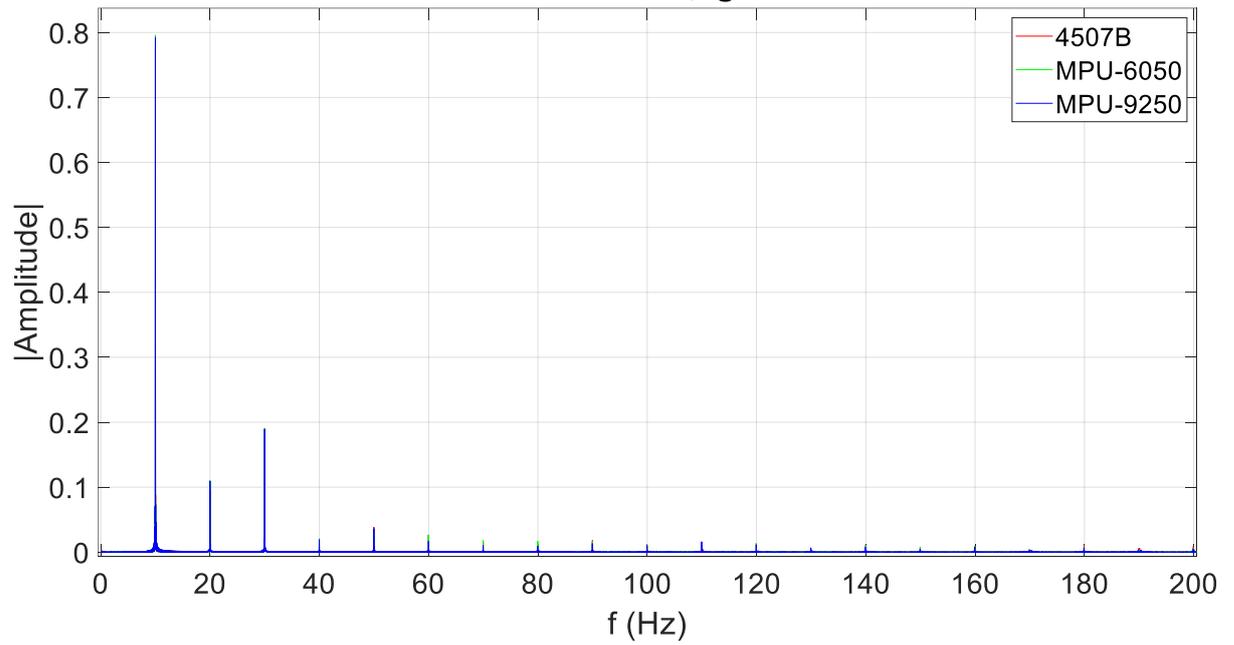




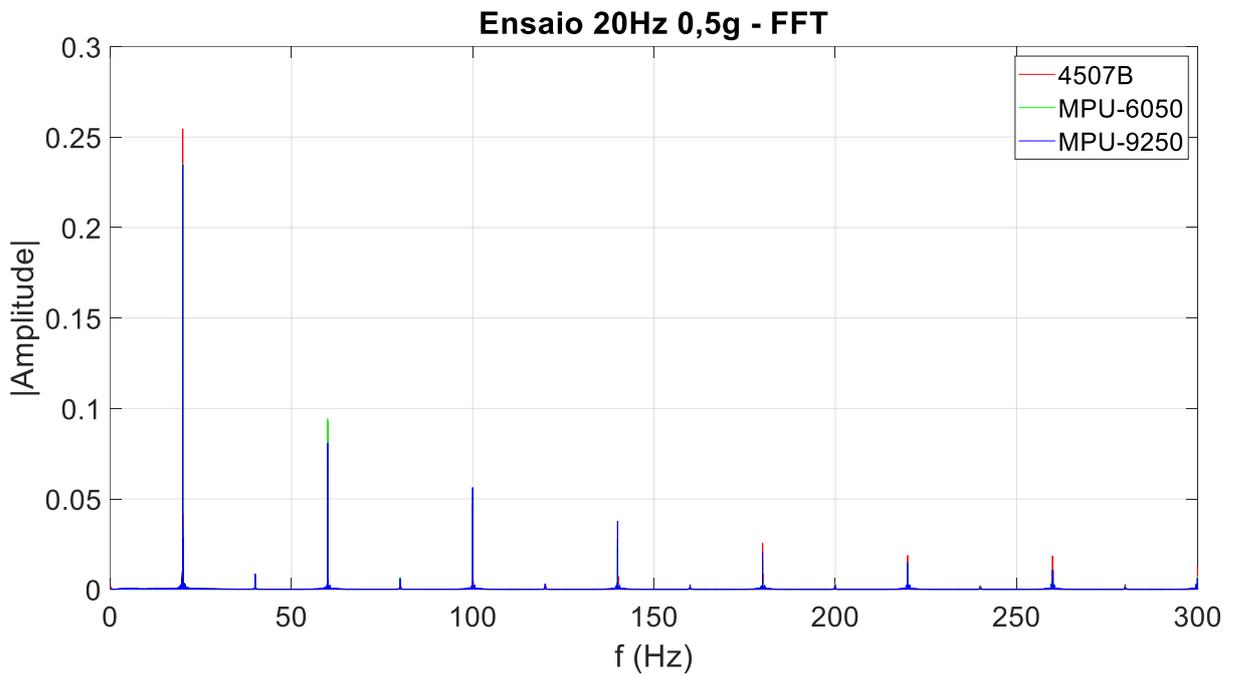
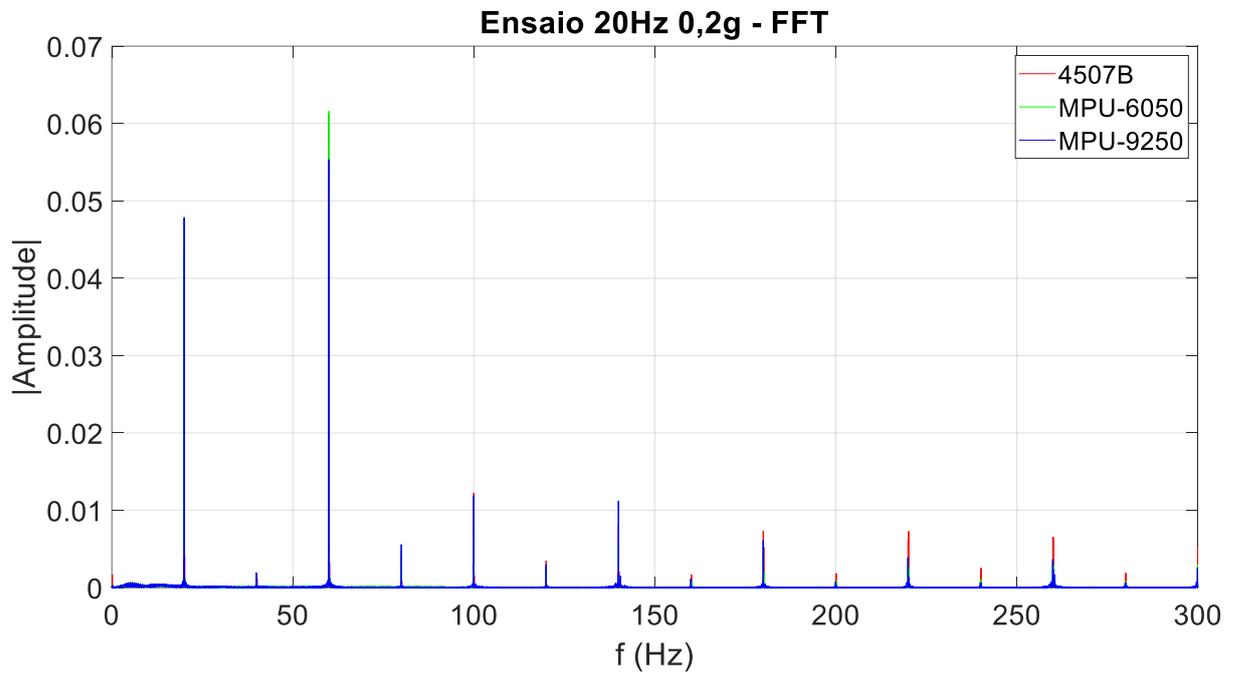
A.3 Ensaio em 10 Hz

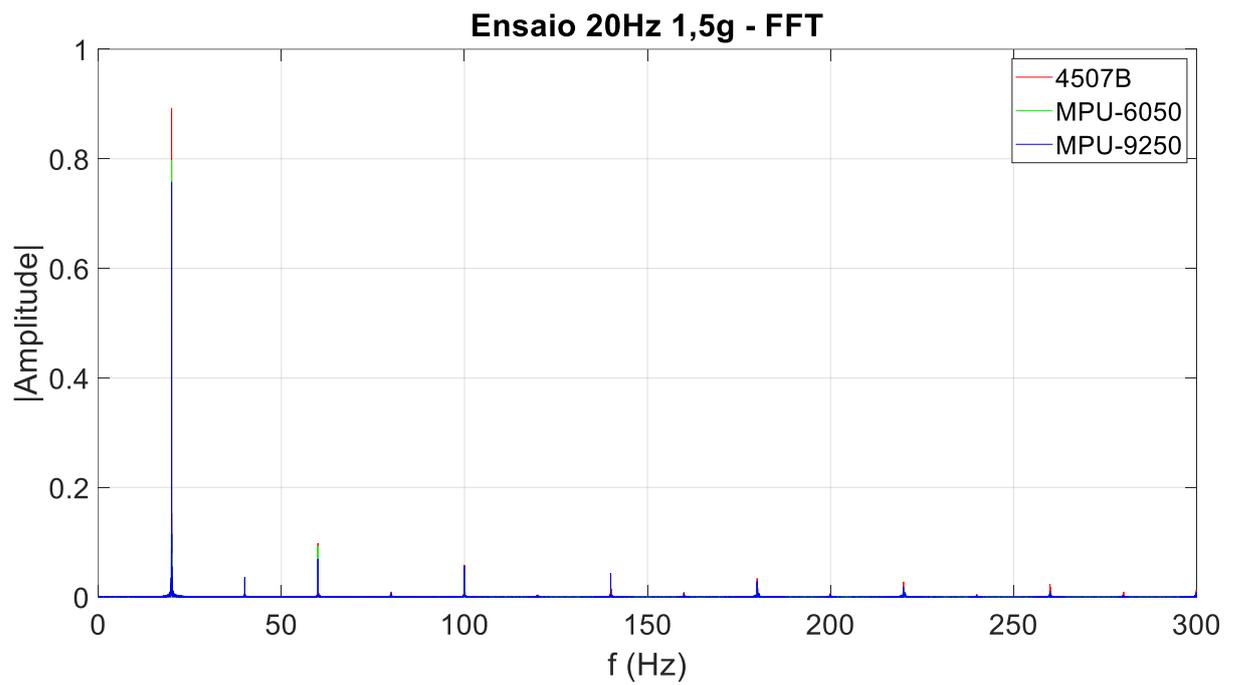
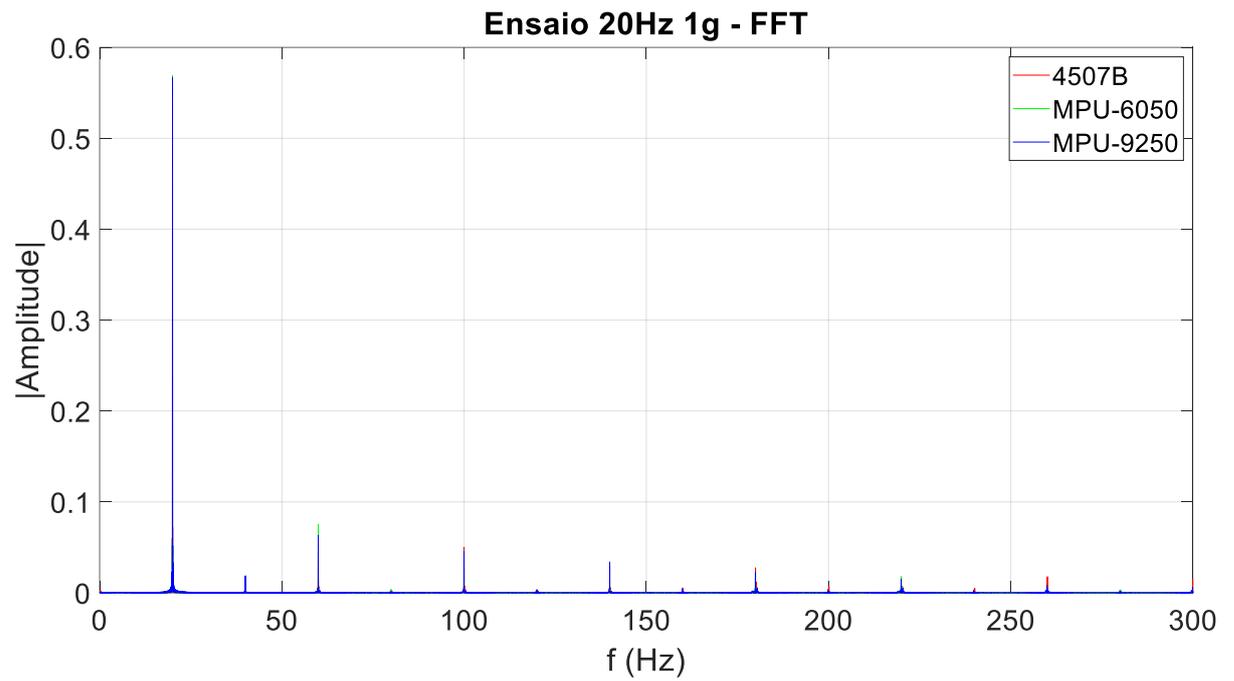


Ensaio 10Hz 0,2g - FFT**Ensaio 10Hz 0,5g - FFT**

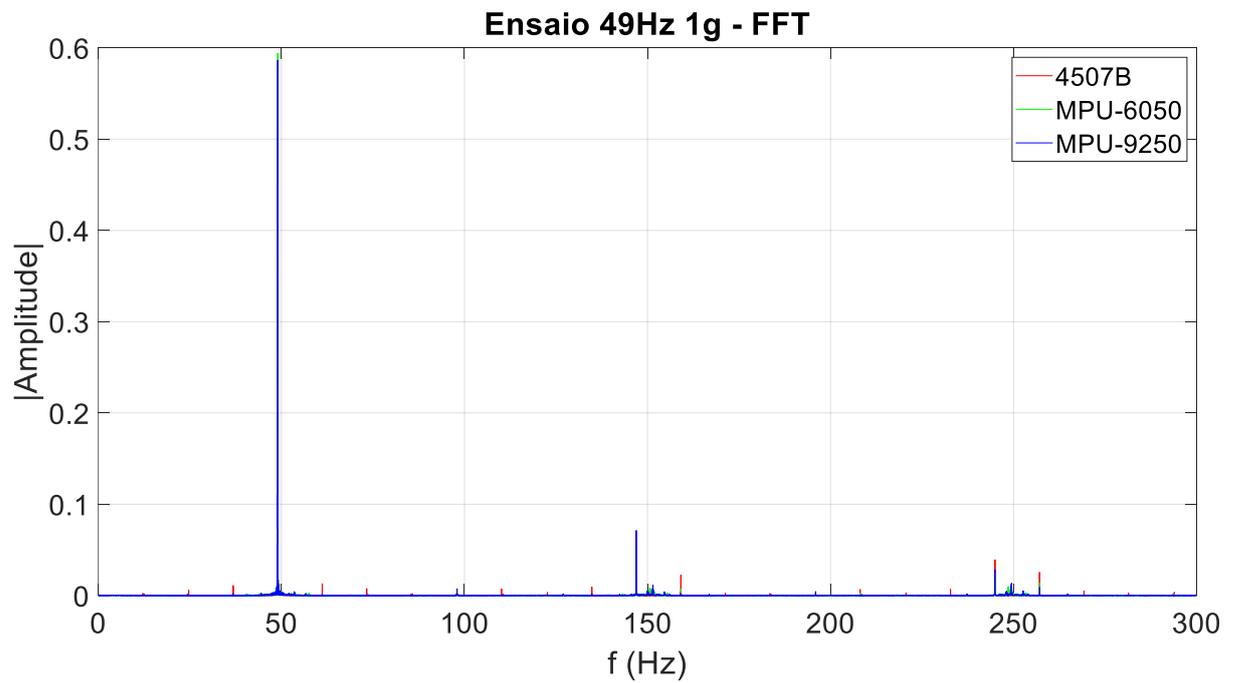
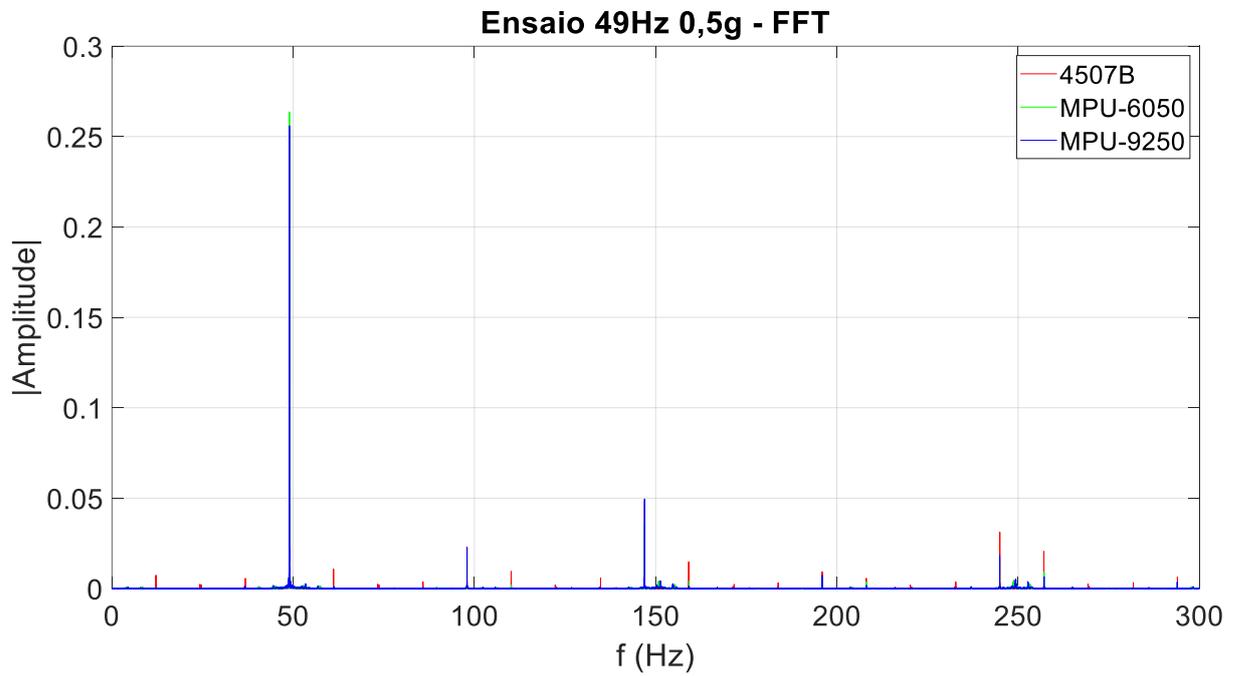
Ensaio 10Hz 1g - FFT**Ensaio 10Hz 1,5g - FFT**

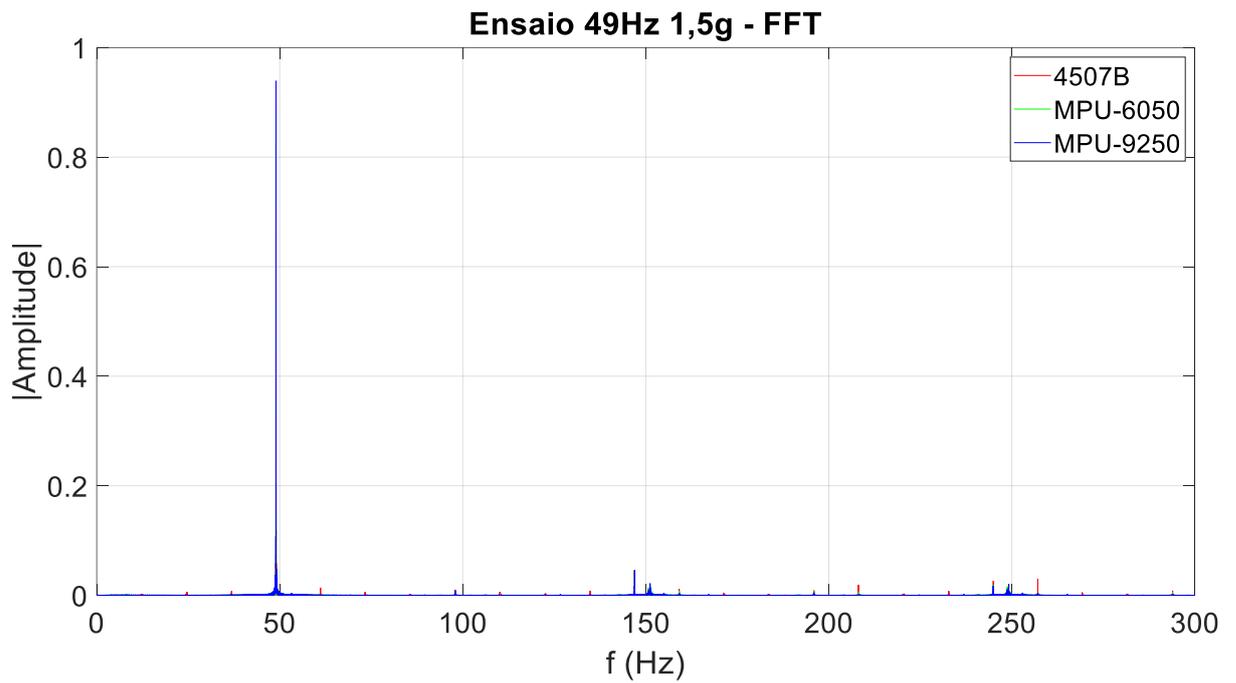
A.4 Ensaio em 20 Hz



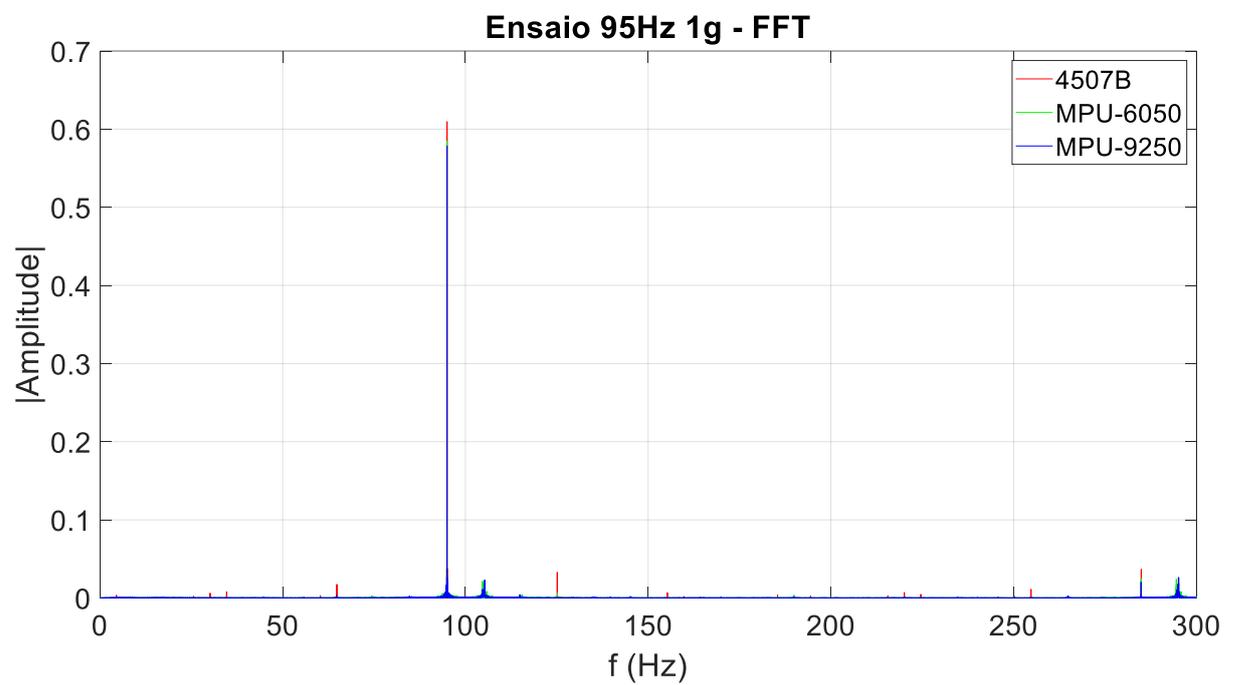


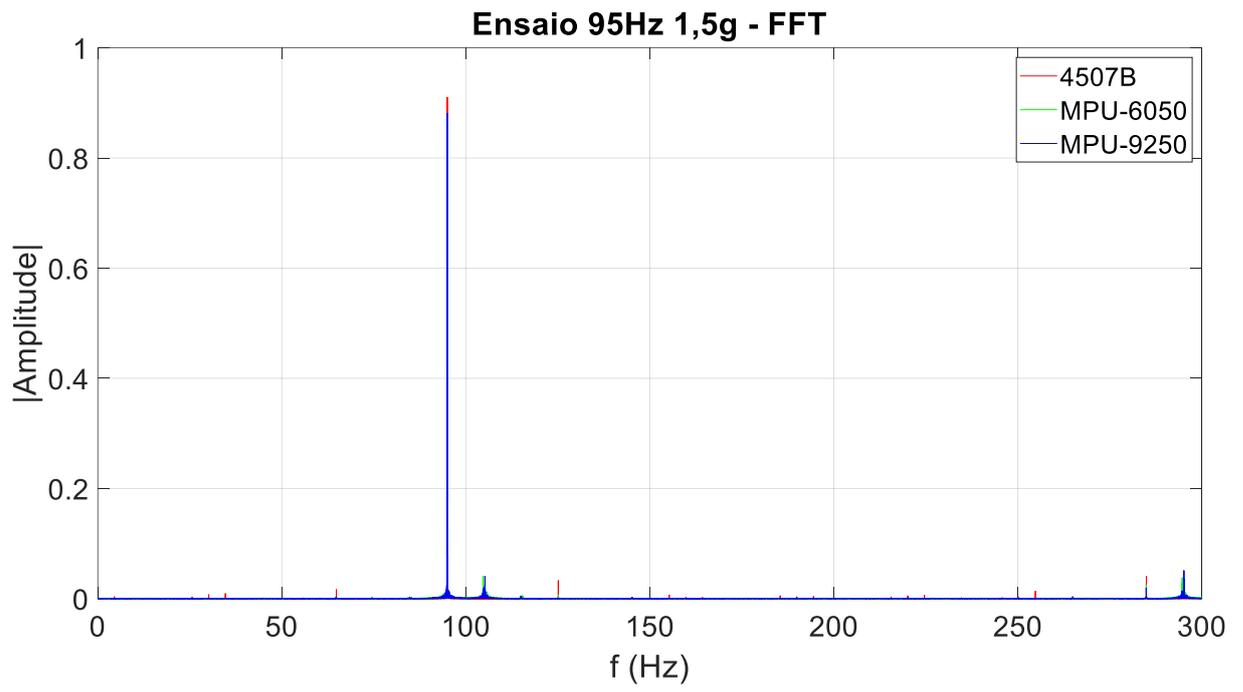
A.5 Ensaio em 49 Hz





A.6 Ensaio em 95 Hz





Anexo A – Certificado do CCLD 4507B

Calibration Chart for DeltaTron® Accelerometer Type 4507 B

Serial No.: 32166

Reference Sensitivity ¹⁾: at 159.2 Hz ($\omega = 1000 \text{ s}^{-1}$), 20 ms^{-2} RMS, 4 mA supply current and 22.7°C: 9.812 mV/ ms^{-2} (..... 96.22 mV/g)

Frequency Range: 0.3 Hz to 6 kHz
..... 2 Hz to 5 kHz

Mounted Resonance Frequency: 18 kHz

Transverse Resonance Frequency: Maximum (at 30 Hz, 100 ms^{-2}): < 5% re Reference Sensitivity

Calculated values for TEDS ³⁾: Resonance frequency: > 18 kHz
Quality factor Q_{low} : 20, 1 kHz
Amplitude slope: 89, 5
High pass cut-off frequency: 2, 5%/decade
Low pass cut-off frequency: 0, 21 Hz
..... 1, 44 kHz

Measuring Range: $\pm 700 \text{ ms}^{-2}$ peak ($\pm 71 \text{ g}$ peak)

Polarity of the electrical signal is positive for an acceleration in the direction of the arrow on the drawing.



Electrical:

Bias Voltage: at full temperature and current range: +13 V \pm 1 V
Power Supply requirements: Constant Current: +2 to +20 mA
Unloaded Supply Voltage: +24 V to +30 V

Output Impedance: < 30 Ω

Start-up time (to final bias $\pm 10\%$): 5 s

Inherent Noise (RMS): Broadband (1 Hz to 6 kHz): < 35 μV

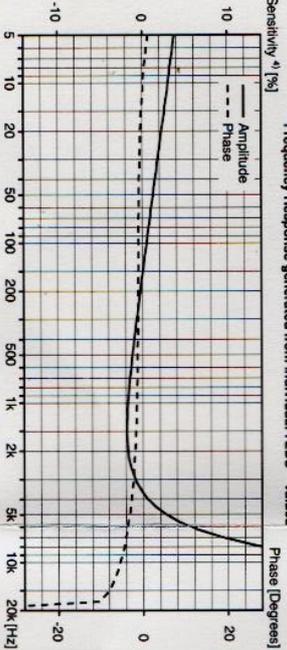
Special: 10 Hz corresponding to < 0.0035 ms^{-2} (< 350 μg)
100 Hz 1.5x10⁻⁴ ms^{-2}/Hz (15 $\mu\text{g}/\text{Hz}$)
1000 Hz 3.5x10⁻⁵ ms^{-2}/Hz (3.5 $\mu\text{g}/\text{Hz}$)
2x10⁵ ms^{-2}/Hz (2 $\mu\text{g}/\text{Hz}$)

Ground Loops can introduce error signals. These can be avoided by insulating the accelerometer from the mounting surface (see Mounting Technique).

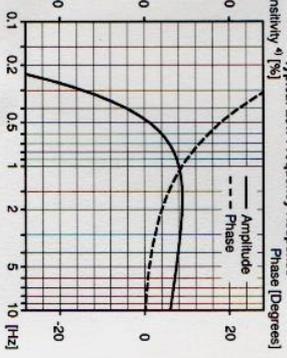
Recommended cables: AO 1382
AO 0631
AO 0463
AO 0665
and other cables see Product Data Sheet

Built-in ID-information according to IEEE P1451.4

Frequency Response generated from individual TEDS ³⁾ values



Typical Low Frequency Response



Mounting Technique:

The accelerometer can be fastened directly to the measuring object by glue e.g., hot glue. However, if a reduced frequency range can be accepted, it is recommended to use one of the special mounting clips (see below) which is glued to the measuring object. In any case the mounting surface must be clean and smooth.

Three types of mounting clips are available: UA 1407 (set of 100) is a low profile clip recommended for mounting on plane surfaces. UA 1475 (set of 100) is a clip with a thick base which can be tied to fit a curved mounting surface. UA 1478 (set of 100) is a swivel base clip for use where the accelerometer is to be aligned according to a given co-ordinate system (see Product Data Sheet BP 1841).

Applying a little grease to the mounting surface of the accelerometer as well as the clip will improve the frequency response.

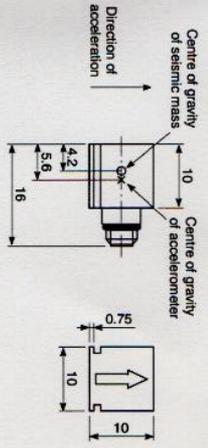
See also ISO 5348.

Environmental:

Temperature Range: -54 to +121°C (-65 to +250°F)
Temperature Coefficient of Sensitivity: +0.09%/°C
Temp. Transient Sensitivity (3 Hz Low Lim. Freq. (-3 dB, 6 dB/oct)): 0.2 $\text{ms}^{-2}/\text{°C}$
Magnetic Sensitivity (50 Hz, 0.038 T): 3 ms^{-2}/T
Base Strain Sensitivity (at 250 μe in base plane): 0.005 $\text{ms}^{-2}/\mu\text{e}$
Mounted on adhesive tape 0.09 mm thick:
Max. Non-destructive Shock: 50 km/s^{-2} peak (5000 g peak)
Humidity: 90% RH non-condensing

Mechanical:

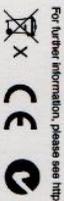
Case Material: Titanium ASTM Grade 2
Sensing Element: Piezoelectric, Type PZ 23
Construction: Theta Shear®
Sealing: Welded
Weight: 4.9 gram (0.17 oz)
10 - 32 UNF-2A
Mounting Surface Flatness: < 3 μm



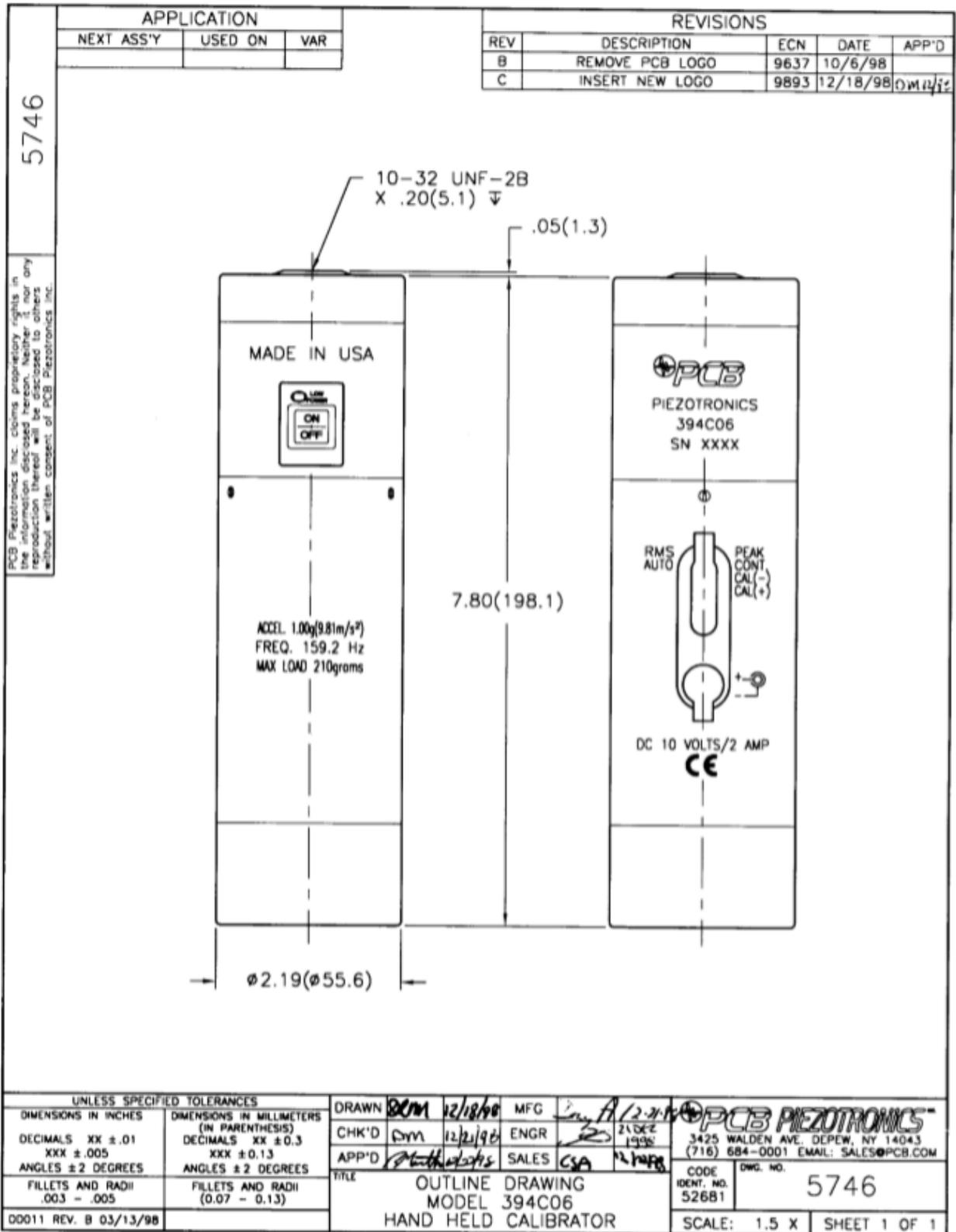
All dimensions in millimetres

Date: 02. June 2017, 11:27 Operator: LTP
Specifications obtained in accordance with ANSI S2.1-1969 and parts of ISO 5347.
All values are typical at 25°C (77°F) unless measurement uncertainty is specified.
BC 0296-12

Serial No.: 32166



Anexo B – Certificado do Calibrador Universal



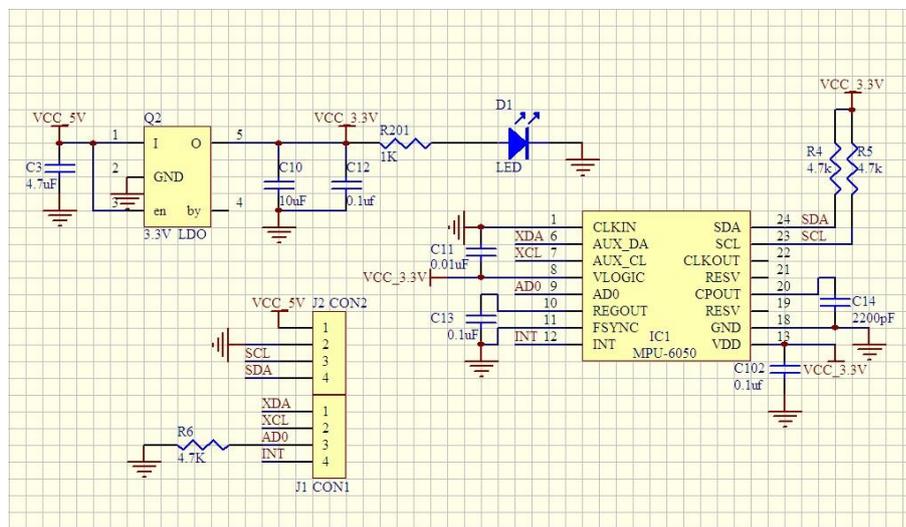
Anexo C – Especificações Técnicas dos Sensores

A.1 Especificações do MPU-6050

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
ACCELEROMETER SENSITIVITY						
Full-Scale Range	AFS_SEL=0		±2		g	
	AFS_SEL=1		±4		g	
	AFS_SEL=2		±8		g	
	AFS_SEL=3		±16		g	
ADC Word Length	Output in two's complement format		16		bits	
Sensitivity Scale Factor	AFS_SEL=0		16,384		LSB/g	
	AFS_SEL=1		8,192		LSB/g	
	AFS_SEL=2		4,096		LSB/g	
	AFS_SEL=3		2,048		LSB/g	
Initial Calibration Tolerance			±3		%	
Sensitivity Change vs. Temperature	AFS_SEL=0, -40°C to +85°C		±0.02		%/°C	
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		0.5		%	
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	
ZERO-G OUTPUT						
Initial Calibration Tolerance	X and Y axes		±50		mg	1
	Z axis		±80		mg	
Zero-G Level Change vs. Temperature	X and Y axes, 0°C to +70°C		±35		mg	
	Z axis, 0°C to +70°C		±60		mg	
SELF TEST RESPONSE						
Relative	Change from factory trim	-14		14	%	2
NOISE PERFORMANCE						
Power Spectral Density	@10Hz, AFS_SEL=0 & ODR=1kHz		400		µg/√Hz	
LOW PASS FILTER RESPONSE						
Programmable Range		5		260	Hz	
OUTPUT DATA RATE						
Programmable Range		4		1,000	Hz	
INTELLIGENCE FUNCTION INCREMENT			32		mg/LSB	

1. Typical zero-g initial calibration tolerance value after MSL3 preconditioning
2. Please refer to the following document for further information on Self-Test: *MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Descriptions*

A.2 Esquemático GY-521



A.3 Especificações do MPU-9250

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Full-Scale Range	AFS_SEL=0		±2		g
	AFS_SEL=1		±4		g
	AFS_SEL=2		±8		g
	AFS_SEL=3		±16		g
ADC Word Length	Output in two's complement format		16		bits
Sensitivity Scale Factor	AFS_SEL=0		16,384		LSB/g
	AFS_SEL=1		8,192		LSB/g
	AFS_SEL=2		4,096		LSB/g
	AFS_SEL=3		2,048		LSB/g
Initial Tolerance	Component-Level		±3		%
Sensitivity Change vs. Temperature	-40°C to +85°C AFS_SEL=0 Component-level		±0.026		%/°C
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		±0.5		%
Cross-Axis Sensitivity			±2		%
Zero-G Initial Calibration Tolerance	Component-level, X,Y		±60		mg
	Component-level, Z		±80		mg
Zero-G Level Change vs. Temperature	-40°C to +85°C		±1.5		mg/°C
Noise Power Spectral Density	Low noise mode		300		µg/√Hz
Total RMS Noise	DLPFCFG=2 (94Hz)			8	mg-rms
Low Pass Filter Response	Programmable Range	5		260	Hz
Intelligence Function Increment			4		mg/LSB
Accelerometer Startup Time	From Sleep mode		20		ms
	From Cold Start, 1ms V _{DD} ramp		30		ms
Output Data Rate	Low power (duty-cycled)	0.24		500	Hz
	Duty-cycled, over temp		±15		%
	Low noise (active)	4		4000	Hz

Anexo D – Especificações técnicas MX1601B

Specifications MX1601B

General specifications		
Inputs	Number	16, electrically isolated from each other and from the supply voltage ¹⁾
Transducer technologies		Voltage, current, current-fed piezoelectric sensors (IEPE)
A/D converter		24 Bit Delta Sigma converter
Sample rates (Domaine adjustable by software, Factory setting is „HBM Classic)	S/s	Decimal: 0,1 ... 20,000 HBM Classic: 0,1 ... 19,200
Signal bandwidth	Hz	3800 (-3dB) with linear phase filter
Active low-pass filter	Hz	Bessel, Butterworth, linear phase 0.01 ... 3000 (-3 dB), Filter OFF
Transducer identification (TEDS, IEEE 1451.4) max. distance of the TEDS module	m	100
Transducer connection		Phoenix Contact FMC-1,5/8-ST-3,5-RF plug terminal
Supply voltage range (DC)	V	10 ... 30 (24 V nominal (rated) voltage)
Supply voltage interruption		max. 5 ms at 24 V
Power consumption without adjustable transducer supply with adjustable transducer supply	W W	< 10 < 13
Transducer Excitation (active transducers) Only channel 1... 8: Adjustable supply voltage (DC) Maximum output power Only channel 9 ... 16: Supply voltage (DC) Maximum output current	V W V mA	5 ... 24; adjustable for each channel 0.7 each channel / a total of 2 9 ... 29; Supply voltage of the module -1 V 30 each channel / a total of 75
Ethernet (data link) Protocol/addressing Connection Max. cable length to module	- - m	10Base-T / 100Base-TX TCP/IP (direct IP address or DHCP) 8P8C plug (RJ-45) with twisted pair cable (CAT-5) 100
IEEE1394b FireWire (module synchronization, data link, optional supply voltage) Baud rate Max. current from module to module Max. cable length between the nodes Max. number of modules connected in series (daisy chain) Max. number of modules in a IEEE1394b FireWire system (including hubs ²⁾ , backplane) Max. number of hops ³⁾	MBaud A m - - -	IEEE 1394b (HBM modules only) 400 (approx. 50 MByte/s) 1,5 5 12 (=11 Hops) 24 14
Synchronization options EtherCAT IRIG-B (B000 to B007; B120 to B127) IEEE1588 (PTPv2), NTP		FireWire (automatically, recommended) via CX27B via MX440B- or MX840B input channel Ethernet based Network Time Protocol
Nominal (rated) temperature range	°C [°F]	-20 ... +65 [-4 ... +149]
Storage temperature range	°C [°F]	-40 ... +75 [-40 ... +167]
Rel. humidity	%	5 ... 95 (non condensing)
Protection class		III
Degree of protection		IP20 per EN 60529
Mechanical tests⁴⁾ Vibration (30 min) Shock (6 ms)	m/s ² m/s ²	50 350
EMC requirements		per EN 61326-1
Max. input voltage at transducer socket to ground Pin 4 (TEDS) Pin 1 (voltage) Pin 3 (current) Pin 5 (control lead)	V V V V	transient free + 5 ± 60 ± 1,5 + 3,3
Dimensions, horizontal (W x H x D)	mm	52.5 x 200 x 122 (with case protection) 44 x 174 x 119 (without case protection)
Weight, approx.	g	980

¹⁾ When the variable transducer supply is used, there is no electrical isolation from the supply voltage.

²⁾ Hub: IEEE1394b FireWire node or distributor

³⁾ Hop: Transition from module to module or signal conditioning / distribution via FireWire (hub, backplane)

⁴⁾ Mechanical stress is tested according to European Standard EN60068-2-6 for vibrations and EN60068-2-27 for shock. The equipment is subjected to an acceleration of 50 m/s² in a frequency range of 5...65 Hz in all 3 axes. Duration of this vibration test: 30min per axis. The shock test is performed with a nominal acceleration of 350 m/s² for 6 ms, half sine pulse shape, with 3 shocks in each of the 6 possible directions.