

Universidade de Passo Fundo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
e Ambiental

Área de concentração em Infraestrutura e Meio Ambiente

Ricardo Schleder Tozetto

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES EM
ESTRUTURAS DE BAIXA FREQUÊNCIA NATURAL

Passo Fundo

2016

Ricardo Schleder Tozetto

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES EM
ESTRUTURAS DE BAIXA FREQUÊNCIA NATURAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob a orientação do Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa e coorientação do Prof. Dr. Adriano Luis Toazza e do Prof. Dr. Zacarias Martin Chamberlain Pravia.

Passo Fundo

2016

Ricardo Schleder Tozetto

**Desenvolvimento de um sistema de monitoramento de vibrações
em estruturas de baixa frequência natural**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob a orientação do Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa e coorientação do Prof. Dr. Adriano Luis Toazza e do Prof. Dr. Zacarias Martin Chamberlain Pravia.

Aprovado em 5 de Maio de 2016.

Professor Doutor Francisco Dalla Rosa
Orientador

Professor Doutor Adriano Luis Toazza
Coorientador

Professor Doutor Zacarias Martin Chamberlain Pravia
Coorientador

Professor Doutor Marcelo Maia Rocha
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Professor Doutor Márcio Felipe Floss
Universidade de Passo Fundo – UPF

Professor Doutor Moacir Kripka
Universidade de Passo Fundo – UPF

Este trabalho é dedicado aos meus pais, que me ensinaram o valor da honestidade, da perseverança e da fé, e também àqueles que convivem comigo diariamente, que me apoiaram nesses anos todos e me ensinaram a importância da humanidade e do amor.

AGRADECIMENTOS

À minha companheira Mariana pelas inúmeras revisões dos meus textos;

Aos professores Francisco e Zacarias pela sempre valorosa e disponível ajuda;

À 8ª Delegacia de Polícia Rodoviária Federal pela ajuda durante os ensaios;

À Universidade de Passo Fundo (UPF) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela oportunidade da bolsa de estudos;

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de monitoramento de estruturas baseado na medição de variáveis dinâmicas, proporcionando recursos às necessidades de verificação estrutural e retro-análise de obras de arte especiais. A motivação para esta pesquisa é a ausência de dispositivos de baixo custo que possam ser utilizados em larga escala para a verificação de estruturas de obras de arte especiais. Hoje, essa técnica se realiza de maneira puramente visual – dependendo exclusivamente da habilidade técnica do encarregado - e muitas vezes não detecta adequadamente falhas estruturais não aparentes. Para a execução da proposta, foi feita uma pesquisa de dispositivos existentes que realizem as funções de medição de variáveis importantes para a análise modal e retro-análise. Numa segunda etapa, realizou-se o projeto de um dispositivo eletrônico capaz de medir as variáveis associadas aos procedimentos de análise modal operacional, observando-se as etapas relacionadas com o desenvolvimento dos sensores, do microcontrolador e da comunicação com a ferramenta computacional. Ademais, executaram-se testes de calibração em laboratório para que as medições feitas pelos dispositivos sejam confiáveis, atingindo-se o valor de 303 amostras por segundo, das quais, cada uma possui dados de medição com 16 *bits* de resolução nos três eixos ortogonais de medição, com valor de fundo de escala de $\pm 8G$. Posteriormente, implantou-se o dispositivo em um viaduto localizado no município de Passo Fundo, para que através do monitoramento feito pelo equipamento desenvolvido, possa-se fazer comparação com dados obtidos em referências recentes.

Palavras-chave: Sistema de Medição de Vibrações, Obras de Arte Especiais, Dinâmica, Instrumentação.

ABSTRACT

The purpose of this work is the development of structure monitoring system based on dynamical measurement data, giving resources for structural verification and retro-analysis requirements. The motivation for this research is the absence of cost-effective effective methods applied on structural evaluation, which has been done based on visual methods – depending of technical ability of the employee – and usually do not able to detect hidden structural failures. For this, a bibliographic review research about modal analysis and structural identification is carry out. Furthermore, an existing device search that realizes the functions of measuring important data for modal analysis and retro-analysis is done. Besides, is defined the methodology of work for the project, verifying the time and resources restrictions. In a second moment, is done the physical project of the electronic device capable of measure the associated variables associated with the operational modal analysis, observing the steps of construction of the sensors, microcontroller and the computational communication. Moreover, laboratory calibration tests are perform in order to grant the reliability of the device, achieving the value of 303 samples per seconds with 16 bits precision in three axis, with 8G range. A field test to validate the device was carried out in a bridge located in Passo Fundo and were compared with recent references.

Keywords: Vibration Measurement System, Bridges, Dynamics, Instrumentation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Carga de Prova para Ensaios Estáticos e Dinâmicos.....	29
Figura 2: Amplificação Dinâmica <i>versus</i> Frequências Fundamentais (atuação normal)	30
Figura 3: Amplificação Dinâmica <i>versus</i> Frequências Fundamentais (choques acidentais)	31
Figura 4: Comparação de Resultados Práticos de Yoon e Bachmann	32
Figura 5: Modelo Básico de Acelerômetro	35
Figura 6: Acelerômetro Piezoelétrico	36
Figura 7: Acelerômetro Piezoresistivo.....	37
Figura 8: Microsistema MEMS	38
Figura 9: Acelerômetro Capacitivo	39
Figura 10: Diagrama de Blocos para o Desenvolvimento do Dispositivo.....	44
Figura 11: Localização da OAE a ser estudada.....	46
Figura 12: Viaduto Estudado.....	47
Figura 13: Mesoestrutura e Infraestrutura do Viaduto Estudado	47
Figura 14: dsPIC33FJ128MC802 <i>pinout</i>	55
Figura 15: Diagrama de Blocos do Acelerômetro MPU-60X0.....	61
Figura 16: Acelerômetro da Família MPU-60X0	61
Figura 17: Montagem Inicial de Teste do Sensor.....	62
Figura 18: Análise da Resposta do Acelerômetro.....	63
Figura 19: Enlace de Comunicação através de Soquete	70
Figura 20: <i>Design</i> do Aplicativo porta.exe.....	73
Figura 21: PCI sem os Componentes	75
Figura 22: Processo de Montagem da PCI	75
Figura 23: PCI Montada	76
Figura 24: Montagem Mecânica do Acelerômetro	76
Figura 25: SMV já Montado no Invólucro	77
Figura 26: Orientação do Acelerômetro da PCB Piezotronics	79
Figura 27: Orientação do Acelerômetro do SMV	79
Figura 28: Fixação do SMV no <i>shaker</i> através de Dupla-face.....	80

Figura 29: Fixação do Acelerômetro da PCB Piezotronics no <i>shaker</i>	80
Figura 30: Fixação dos Dois Sensores no <i>shaker</i>	81
Figura 31: Verificação do Nivelamento do <i>shaker</i>	82
Figura 32: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 2,5Hz com o SAD ..	84
Figura 33: Resposta temporal detectada durante o ensaio de 2,5Hz com o SMV.	84
Figura 34: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 5Hz com o SAD	85
Figura 35: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 5Hz com o SMV	85
Figura 36: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 7,5Hz com o SAD ..	85
Figura 37: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 7,5Hz com o SMV ..	85
Figura 38: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 10Hz com o SAD ...	86
Figura 39: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 10Hz com o SMV ..	86
Figura 40: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 12,5Hz com o SAD	86
Figura 41: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 12,5Hz com o SMV	86
Figura 42: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 15Hz com o SAD ...	87
Figura 43: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 15Hz com o SMV ..	87
Figura 44: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 2,5Hz com SAD.....	88
Figura 45: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 2,5Hz com o SMV...	88
Figura 46: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 5Hz com SAD	88
Figura 47: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 5Hz com o SMV	88
Figura 48: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 7,5Hz com SAD.....	89
Figura 49: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 7,5Hz com o SMV...	89
Figura 50: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 10Hz com SAD	89
Figura 51: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 10Hz com o SMV ...	89
Figura 52: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 12,5Hz com SAD....	90
Figura 53: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 12,5Hz com o SMV.	90
Figura 54: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 15Hz com SAD	90
Figura 55: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 15Hz com o SMV ...	90
Figura 56: Instalação Experimental do Painel Solar Fotovoltaico	94
Figura 57: Diagrama Elétrico do Sistema de Alimentação.....	95
Figura 58: Disposição dos Sensores de Aceleração no Viaduto	96
Figura 59: Disposição dos Acelerômetros ACC4, ACC3 e ACC1 no Viaduto.....	97
Figura 60: Passagem dos Cabos pela Pingadeira no Viaduto.....	98
Figura 61: Sistema Instalado, com Computador, Baterias e Hub	99

Figura 62: Histograma de Valores de Frequência Encontrados no Ensaio	102
Figura 63: Histograma de Valores de Frequência Encontrados no ACC1	102
Figura 64: Histograma de Valores de Frequência Encontrados no ACC2.....	102
Figura 65: Histograma de Valores de Frequência Encontrados no ACC3.....	103
Figura 66: Histograma de Valores de Frequência Encontrados no ACC4.....	103
Figura 67: Densidade espectral de potência de uma das janelas de análise.	103

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Pontos de Maior Amplitude na Análise dos Resultados do Ensaio.....	91
Quadro 2: Valores de Frequência Natural Encontrados no Período A	101
Quadro 3: Valores de Frequência Natural Encontrados no Período B	101
Quadro 4: Valores de Frequência Natural Encontrados nos Períodos C e D	101
Quadro 5: Frequências Naturais Encontradas no Ensaio de Braido (2014)	104
Quadro 6: Médias das Frequências Naturais Encontradas com o SMV	105
Quadro 7: Médias das Frequências Naturais Encontradas com o SMV	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AME	Análise Modal Experimental
AMO	Análise Modal Operacional
ARM	<i>Advanced RISC machine</i>
ASIC	<i>Application-Specific Integrated Circuit</i>
CISC	<i>Complex instruction Set Computer</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DIP	<i>Dual in-line package</i>
DMA	<i>Direct Memory Access</i>
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSP	<i>Digital Signal Processors</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
I ² C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
ISM	<i>Industrial Scientific and Medical</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LESE	Laboratório de Estruturas
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MEMS	<i>Micro Electromechanical systems</i>
MIE	Monitoramento de Integridade Estrutural
OAE	Obra de Arte Especial
PC	<i>Personal Computer</i>
PCI	Placa de Circuito Impresso
PHY	<i>Physical Layer</i>
RAE	Retro-análise de Estruturas
RAM	<i>Random Access memory</i>
RF	Radiofrequência

RISC	<i>Reduced instruction set computer</i>
RTC	<i>Real Timer Clock</i>
SAD	Sistema de Aquisição de Dados
SDK	<i>Software Development Kit</i>
SMV	Sistema de Monitoramento de Vibrações
SPI	<i>Serial Port Interface</i>
SSI	<i>Stochastic Subspace Identification</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Problema de Pesquisa	17
1.2	Justificativas	19
2	OBJETIVOS.....	22
2.1	Objetivo Geral.....	22
2.2	Objetivos Específicos	22
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1	Inspeção e Ensaio de Pontes e Viadutos.....	23
3.1.1	Procedimentos Segundo o DNIT	23
3.1.2	Procedimentos da Norma NBR 9452:2016.....	25
3.1.3	Procedimentos de Verificações nos Estados Unidos	27
3.1.4	Ensaio Estáticos e Dinâmicos.....	27
3.2	Vibrações em Estruturas	29
3.3	Dispositivos de Ensaio e Monitoramento já Desenvolvidos	32
3.4	Medições de Aceleração	34
3.4.1	Acelerômetros Piezoelétricos	35
3.4.2	Acelerômetros Piezoresistivos.....	37
3.4.3	Acelerômetros a Balanço de Forças na Massa	38
3.4.4	Acelerômetros Integrados Capacitivos	38
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	40
4.1	Especificação do Projeto	40
4.1.1	Requisições com Relação ao Custo do Equipamento.....	40
4.1.2	Requisições com Relação à Medição de Vibrações.....	41
4.1.3	Requisições com Relação à Saída de Dados.....	42
4.1.4	Requisições com Relação à Alimentação do Dispositivo	43

4.2	Sequência de Desenvolvimento do Dispositivo.....	43
4.2.1	Calibração.....	45
4.2.2	Testes e Avaliação.....	45
4.3	Escolha do Local de Teste	45
4.3.1	Viaduto Estudado.....	46
4.4	Metodologia de Teste	48
5	DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO	49
5.1	Escolha da Plataforma de Processamento	49
5.1.1	Propriedades de Processamento Necessárias ao Sistema.....	49
5.1.2	Microcontroladores Passíveis de Utilização	52
5.1.3	Microcontrolador Escolhido.....	54
5.2	Escolha do Acelerômetro	55
5.2.1	Propriedades Necessárias ao Acelerômetro do SMV.....	55
5.2.2	Acelerômetros Passíveis de Utilização.....	58
5.2.3	Acelerômetro Escolhido	60
5.3	Testes dos Sensores.....	62
5.4	Escolha e Desenvolvimento do Método de Comunicação	63
5.4.1	Propriedades Necessárias ao método de Comunicação.....	64
5.4.2	Métodos de Comunicação Passíveis de Utilização	66
5.4.3	Método de Comunicação Escolhido	68
5.4.4	Desenvolvimento do Método de Comunicação	69
5.5	Testes de Funcionamento do Método de Comunicação	73
5.5.1	Dados de Informação Temporal	73
5.5.2	Desenvolvimento e Montagem da PCI	74
5.5.3	Resultados dos Testes de Funcionamento.....	77
5.6	Calibração em Laboratório	77
5.6.1	Preparação do Ensaio	78

5.6.2	Metodologia do Ensaio de Calibração	83
5.6.3	Resultados do Ensaio de Calibração.....	83
5.6.4	Discussão dos Resultados dos Ensaios	91
5.7	Escolha e Desenvolvimento da Alimentação Elétrica	92
5.7.1	Dimensionamento do Painel Solar e Baterias	93
5.7.2	Instalação e Conexão do Sistema Fotovoltaico.....	93
5.7.3	Teste de Funcionamento do Sistema Fotovoltaico.....	95
5.8	Teste na OAE	95
5.8.1	Fixação dos Quatro Sensores	96
5.8.2	Ligações dos Sensores.....	97
5.8.3	Metodologia para Execução do Ensaio	99
5.8.4	Análise dos resultados do ensaio	100
5.8.5	Comparação com os Resultados Anteriores do Viaduto	104
5.8.6	Discussão dos Resultados dos Ensaios	106
6	CONCLUSÕES.....	107
	REFERÊNCIAS.....	109

1 INTRODUÇÃO

A utilização de estruturas construídas pelo homem para a travessia de obstáculos como rios, lagos ou desníveis acentuados remonta à antiguidade. As primeiras pontes construídas em pedra são datadas da época do Império Romano e muitas são utilizadas até hoje (VERZONI, 2009). Com o passar dos anos, as técnicas de construção foram evoluindo, assim como os materiais utilizados para a formação das estruturas dessas obras de arte especiais (OAEs). Independentemente da época em que foram construídas, essas obras caracterizam-se por serem importantes conexões entre cidades, estados, regiões ou até mesmo países (PAVI; BORDIN; VERONEZ, 2014).

Uma das experiências mais documentadas com esse tipo de infraestrutura é a desenvolvida nos Estados Unidos. Apenas nesse país, existem cerca de 55000 OAEs, cerca de um quarto delas está em condição de deficiência estrutural; o efeito que isso causa para a população pode ser catastrófico. Em 2007, uma ponte caiu no estado americano de Minnesota, matando 13 pessoas e ferindo 145 (NTSB, 2007). Assim, torna-se essencial que o assunto seja tratado com urgência e importância. No entanto, estima-se que o custo de reparo dessas estruturas esteja próximo a 9 bilhões de dólares (WARDLAW; KARAMAN; KARSILAYAN, 2013).

No Brasil, a importância desses empreendimentos não é diferente. Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), existem 4300 pontes e viadutos na malha viária federal. A maioria delas começou a ser construída no século passado, a partir da década de 1940, época em que também se iniciou a confecção das normas de concreto armado. Dentre essas obras, calcula-se que 86% delas precisem de reforço ou alargamento e as outras 14% necessitem de manutenção (THORMANN, 2011). Como resultado disso, os casos de OAEs com falhas ou deficiências estruturais têm se multiplicado nos noticiários nos últimos anos. Um exemplo é a ponte que liga o Rio Grande do Sul a Santa Catarina, entre as cidades de Iraí e Palmitos. Após falhas na manutenção, ela começou a oscilar com intensidade anormal (GLOBO, 2014), até ser interditada para reparo, causando prejuízo milionário a diversos setores empresariais e sociais que dependem dessa OAE.

Devido a essa importância econômica, social e até mesmo vital - com relação à integridade física das pessoas que a utilizam - as OAEs devem possuir um sistema de verificação e manutenção. A eficiência dessas estruturas está diretamente relacionada com o cuidado de manutenção que é dispensado a elas (PAVI; BORDIN; VERONEZ, 2014, p. 2) e, atualmente, esses processos são pouco eficientes ou excessivamente subjetivos. Além disso, a maioria das OAEs brasileiras não passou por um programa de manutenção. A consequência disso é a necessidade cada vez maior de recuperação ou reforço dessas obras, procedimento que exige a documentação de projeto dessas estruturas, bem como registros de modificação e planos de manutenção originais. Na maioria das ocasiões esses registros não estão disponíveis, o que torna necessário um método de retro-análise capaz de prover a necessidade de informações para essas obras (DOS SANTOS, 2013).

Sendo assim, a motivação desta pesquisa se concentra no desenvolvimento de ferramentas que possibilitem a realização de monitoramento e retro-análise de estruturas definidas como obras de arte especiais (pontes, viadutos e passarelas) e também de qualquer estrutura civil que possa utilizar a mesma metodologia de trabalho. Inicialmente foram delimitados os problemas de pesquisa e suas justificativas, assim como os objetivos do trabalho. Posteriormente foi feita a apresentação dos dados encontrados através de pesquisa bibliográfica, assim como a definição da metodologia de trabalho, o desenvolvimento do dispositivo e as conclusões.

1.1 Problema de Pesquisa

Conforme descrito na Introdução deste trabalho, as obras de arte especiais são estruturas de elevada importância em aspectos sociais, econômicos e geopolíticos. Portanto, é do interesse dos órgãos públicos que tais estruturas tenham uma correta monitoração e, caso seja necessário, passem por procedimentos de recuperação adequados. Porém, os problemas relacionados com esses dois itens são, na maioria das vezes, causados pela baixa tecnologia empregada a esses procedimentos, fazendo com que essas tarefas se tornem árduas e nada tenham de praticidade (PAVI; BORDIN; VERONEZ, 2014, p. 2). Por

outro lado, diversos pesquisadores têm trabalhado nesse assunto nos últimos anos, como Hu, Wang e Ji (2013), Yao et al (2015) e Whelan, Gangone e Janoyan (2009).

O trabalho de Kumar e Bajpai (2012) explora o monitoramento de integridade estrutural (MIE). Esse assunto trata da tendência de instalação de sensores em obras de infraestrutura como pontes e outras edificações. Além disso, o estudo relaciona a deterioração de estruturas de OAEs com a modificação de parâmetros de rigidez ou perdas de massa. Por consequência, essas modificações levam a uma alteração de parâmetros dinâmicos da estrutura. Finalmente, o trabalho conclui que um MIE baseado no monitoramento de vibrações pode ser efetivo ao reportar modificações estruturais, especialmente se realizar as medições em tempo real.

Outro pesquisador que tratou desse tema foi Hu (2013), que afirma em seu trabalho que a tendência da construção de passarelas cada vez maiores e com vãos mais longos – além de aspectos estéticos – têm tornado a construção, manutenção e reparo dessas obras um desafio de Engenharia. Além disso, o autor afirma que como na maioria das vezes essas estruturas são esbeltas, acabam tornando-se mais suscetíveis a vibrações excessivas induzidas por seus transeuntes, podendo causar avarias na estrutura, queda na durabilidade da obra e mesmo o desconforto dos seus utilizadores. Assim, torna-se importante o monitoramento de vibrações em longo prazo, observando e controlando os níveis de oscilação atingidos e também avaliando a performance estrutural da obra de arte, aplicando o conceito de análise modal.

Outra pesquisa que relaciona a análise modal com a determinação de falhas estruturais é a de Zhao e Zhang (2012). Segundo o trabalho dos autores, a ocorrência de problemas estruturais provoca mudanças na frequência natural de oscilação da estrutura e também no formato dos diferentes modos agregados. Para provar isso, os autores demonstram resultados numéricos no trabalho que identificam a extensão e localização de problemas em estruturas treliçadas.

Já Wardlaw, Karaman e Karsilayan (2013) afirmam que métodos de inspeção visual de OAEs não são suficientes para a avaliação da qualidade estrutural. Propõem também um sistema de MIE que é baseado em comunicação *wireless* e medição de deslocamentos através de *strain gage*.

No âmbito local, o próprio órgão brasileiro responsável pela infraestrutura de transporte - o DNIT – possui manuais e normas de inspeção de estrutura de OAEs. Nesses documentos são apresentadas técnicas avançadas de inspeção (DNIT, 2004). No entanto, os métodos apresentados concentram-se mais na localização de fissuras e falhas, não explorando completamente o campo das respostas dinâmicas estruturais.

Dessa forma, o campo do monitoramento estrutural dinâmico possui lacunas importantes a serem preenchidas e, portanto, surge como uma inovadora ferramenta na manutenção de OAEs e estruturas relacionadas. Ademais, as possibilidades trazidas através do monitoramento de estruturas em tempo real, aumentam significativamente a segurança da obra em que a técnica é aplicada, pois torna possível a detecção prévia de falhas catastróficas, tornando possível inclusive salvar vidas humanas.

1.2 Justificativas

O monitoramento dinâmico de estruturas não é um assunto inédito na comunidade acadêmica internacional. Sendo assim, existem diversos autores envolvidos com a pesquisa desse assunto no mundo, como Hu (2013), dos Santos (2013), Brownjohn e Magalhães (2010), Zhao e Zhang (2012) e Yoon *et al* (2014). Por outro lado, embora existam trabalhos abordando o assunto da análise modal e retro-análise de estruturas desse tipo por autores brasileiros, poucos se concentram no desenvolvimento de ferramentas que tornem possível a coleta de informações para a aplicação delas. Logo, o assunto relacionado ao desenvolvimento de ferramentas desse tipo no país é parcamente explorado.

Hoje os equipamentos disponíveis para a coleta de informações dinâmicas de estruturas se reduzem a sensores específicos instalados na OAE de forma temporária. Isso significa afirmar que os sensores são instalados para monitoramento por curtos intervalos de tempo, impossibilitando a análise dos modos de comportamento de vibração da estrutura, ou simplesmente, a análise modal, durante longos intervalos. Ainda, pode-se destacar que esses equipamentos não possuem leituras em tempo real e a longo prazo, descaracterizando a condição de ferramenta de prevenção de incidentes catastróficos. Outro ponto a destacar é o alto

custo envolvido com a implementação desse tipo de sistema, já que dependem de grandes extensões de cabos (WARDLAW; KARAMAN; KARSILAYAN, 2013) e equipamentos sensíveis, comumente utilizados em laboratório.

Outra técnica abordada por pesquisadores é a utilização de celulares e *tablets* munidos de acelerômetros (YOON *et al.*, 2014) e (PRAVIA; BRAIDO, 2015). Essa abordagem prima pelo fácil acesso que esses dispositivos proporcionam aos dados de vibração, além do baixo custo envolvido no ensaio. Mais uma vez, a desvantagem é a impossibilidade de realizar monitoramento em tempo real.

Por outra via, o pesquisador Hu (2013) concentrou seus estudos na análise modal operacional (AMO), ou seja, no processamento dos resultados colhidos com um sistema de monitoramento. Porém, para que tivesse dados para alimentar os programas desenvolvidos para a AMO, montou um sistema de supervisão em tempo real, utilizando a plataforma LabVIEW. Esse, por sua vez, supriu a necessidade de monitoramento constante e em tempo real, uma vez que os dados eram enviados diretamente da obra estudada até o laboratório, via Internet, porém, os custos envolvidos com esse tipo de ferramenta são altos e atuam como impeditivos para sua utilização em larga escala. Além disso, o autor deixa registrado, em suas recomendações para trabalhos futuros, a necessidade do desenvolvimento de um sistema de monitoramento dinâmico mais completo (HU, 2013, p. 222).

Dada a importância que as estruturas de obras de arte especiais tomaram no mundo moderno, a correta conservação, manutenção ou reconstrução são tarefas importantes quando levados em consideração os riscos financeiros e vitais que colapsos ou falhas dessas estruturas podem trazer à sociedade. Entretanto, a falta de métodos ou equipamentos especializados para o monitoramento de integridade estrutural e retro-análise faz com que os prejuízos mencionados se multipliquem com o aumento da idade e do uso da infraestrutura existente. Logo, o desenvolvimento e a utilização de um sistema projetado para esse tipo de aplicação poderia evitar perdas enormes, já que ele seria capaz de fornecer subsídios para propostas de manutenção e reconstrução mais eficientes e, acima de tudo, evitar acidentes catastróficos.

Assim, como o assunto está diretamente relacionado ao monitoramento de estruturas relacionadas com a infraestrutura viária das cidades e estradas, o tema

escolhido enquadra-se na linha de pesquisa *Planejamento Territorial e Gestão da Infraestrutura*, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Finalmente, cabe salientar que o trabalho justifica-se devido ao desconhecimento de qualquer outro sistema semelhante, que permita o monitoramento em tempo contínuo da estrutura, além de possuir um custo de implantação mais adequado à realidade econômica.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é desenvolver um sistema de monitoramento dinâmico de estruturas de baixa frequência natural, capaz de efetuar medições contínuas de vibrações que sirvam aos procedimentos de análise modal operacional e de identificação estrutural.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Elaborar e desenvolver um protótipo de equipamento de medição de vibrações em estruturas civis e testar métodos de comunicação entre o dispositivo e o computador;
- b) Utilizar os métodos de calibração existentes e validar o sistema através de testes práticos junto a ferramentas comerciais;
- c) Realizar ensaios de campo para a verificação de funcionamento do sistema;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são relacionados assuntos já pesquisados por diversos autores que auxiliaram no desenvolvimento do trabalho. Assim, o foco inicial da revisão bibliográfica é discutir os procedimentos atuais recomendados de inspeção e de ensaios em pontes e viadutos. Posteriormente, são revisados os conhecimentos de vibrações em estruturas e a análise modal operacional. Mais adiante, são catalogados temas relacionados ao projeto do equipamento, como as tecnologias disponíveis de acelerômetros.

3.1 Inspeção e Ensaio de Pontes e Viadutos

Devido ao elevado grau de importância dessas estruturas, torna-se necessário que se sigam determinados procedimentos de inspeção da integridade estrutural de pontes e viadutos, incluindo o uso de tecnologia. Sartorti e Mascia (2009) concluem que a melhor maneira de evitar problemas nesse tipo de OAE é a prevenção, a qual só poderá ocorrer caso haja procedimentos detalhados de inspeção de pontes, viadutos e passarelas.

As orientações presentes nos documentos disponíveis no Brasil atualmente resumem-se ao Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias do DNIT (2004) e a Norma Brasileira de Vistorias em Pontes e Viadutos de Concreto (2016), cujos conteúdos são bastante similares. O conteúdo desses documentos traz apenas regras de inspeção visual, com pouca especialização em medições estruturais mais avançadas. Já em âmbito internacional, os Estados Unidos possuem boa quantidade de documentação com relação à inspeção de obras de arte especiais.

3.1.1 Procedimentos Segundo o DNIT

O principal documento que contém os procedimentos indicados pelo DNIT é o Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias, que segue as diretrizes encontradas em materiais da *Federal Highway Administration* e da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). Além disso, como meio de normalizar os padrões de verificação, o DNIT lançou ainda a norma DNIT 010/2004

PRO, cujo conteúdo é bastante semelhante ao do Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias do DNIT.

Inicialmente, as orientações presentes no Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias (2004) concentram-se em estabelecer os tipos de vistoria e sua periodicidade. Segundo o documento, são cinco tipos de inspeção: inspeção cadastral, inspeção rotineira, inspeção especial, inspeção extraordinária e inspeção intermediária. A inspeção cadastral é aquela que deve ser feita logo após o término da obra, com registro fotográfico completo, bem como preenchimento da ficha cadastral da obra. Já a inspeção rotineira deve ser realizada com periodicidade de um a dois anos e é destinada a coletar informações sobre qualquer anomalia que venha a se desenvolver ou já esteja instalada, e deve conter o preenchimento da ficha e levantamento fotográfico. A inspeção especial deve ocorrer entre períodos máximos de cinco anos e é feita em estruturas julgadas como excepcionais, seja pelo seu porte, pelo sistema estrutural ou pelo comportamento problemático. O registro ocorrerá por levantamento fotográfico segundo critério do inspetor, e caso necessário, deverá ser elaborada ficha de inspeção. A última classificação é a de inspeção extraordinária, realizada em casos de danos repentinos causados pelo homem ou pelo meio-ambiente. A equipe, por sua vez, deverá ser formada por integrantes com capacidade técnica e discernimento para avaliar a gravidade dos danos. Caso a equipe julgue necessário, poderá interromper, limitar ou restabelecer o tráfego, bem como solicitar uma inspeção especial.

Em um segundo momento, o Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias (2004) trata sobre os procedimentos de inspeção, que deverão ser sistemáticos e organizados para que ocorra a correta verificação estrutural. As fichas de inspeção, elaboradas de maneira adequada, garantirão esse procedimento. O levantamento fotográfico deve ser abrangente, com um mínimo de seis fotos, documentando vista inferior, vista superior, vistas laterais, detalhes de apoio, articulações, juntas, dentre outros. Caso haja a detecção de anomalias, as características visuais deverão estar abrangidas nas fotos. Se possível, a obra de arte deverá ser observada durante a passagem de cargas pesadas, para que seja feita a verificação de vibrações ou deformações excessivas. Pode ser necessária a limpeza de determinadas partes da ponte, para verificação de trincas, corrosões e outros defeitos encobertos. Além

disso, a inspeção deve incluir, mas não necessariamente ficar limitada às observações da geometria e das condições viárias, dos acessos, dos cursos d'água, dos encontros e das fundações, dos apoios intermediários, dos aparelhos de apoio, das superestruturas, das pistas de rolamento, das juntas de dilatação, das barreiras e dos guarda-corpos, da sinalização e das instalações de utilidade pública.

O documento também traz orientações sobre algumas técnicas avançadas de verificação, dentre elas, a medição de velocidade das ondas, os métodos elétricos, testes de ultrassom junto ao uso de laser, os testes de avaliação de fadiga na armadura, a detecção de cloretos, os testes com pacômetro, os testes de penetração, a utilização de endoscópios e os testes de dureza e de impacto. Como se pode verificar, o Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias não traz nenhuma citação com relação a algum tipo de monitoramento contínuo de obras de arte ou algum método similar.

O DNIT possui também o *software* de gerenciamento de pontes SGO v3, em que a avaliação da obra é feita através de uma escala de mensuração graduada de 1 a 5, que representa uma maior ou menor gravidade nos danos (MILANI, 2010).

3.1.2 Procedimentos da Norma NBR 9452:2016

A inspeção de OAEs é prescrita pela Norma Brasileira de inspeção de pontes e viadutos de concreto ABNT NBR 9452:2016, a qual estabelece os requisitos exigíveis para a realização de vistorias em pontes e viadutos de concreto e também para a apresentação dos seus resultados. Sendo assim, segundo a ABNT NBR 9452:2016 (2016), a inspeção de pontes deverá seguir alguns métodos específicos.

Inicialmente a norma concentra-se em especificar os tipos de vistoria, sendo que a primeira categoria citada é a vistoria cadastral, que cataloga os principais elementos para segurança e durabilidade da obra e deve ser feita logo após a conclusão da construção. Sendo assim, os itens que devem constar em seus documentos são relacionados às características construtivas que posteriormente são comparadas em outras vistorias. Entre esses itens, pode-se destacar os elementos de projeto, os desenhos de projeto, os programas de execução de obra, o diário da obra, os relatórios de fiscalização, os contratos de construção, o registro de alterações de projeto, os registros de ensaio, os registros de proteção, os registros

de controle de execução de fundações, as referências topográficas e as de eventuais reforços ou reparos. Ainda, é importante constar em seus registros os esquemas de vigamentos principais, contraventamentos, aparelhos de apoio e mapas de fissura ou outras anomalias. Outro procedimento necessário é o levantamento fotográfico da obra que permita a visualização da situação estrutural, aspecto geral e esquemas estruturais.

O segundo tipo de vistoria citado na ABNT (2016) é a vistoria do tipo rotineira. Sua principal função é a verificação da evolução de falhas já encontradas ou mesmo a detecção de novas falhas, reparos, reforços, recuperações e quaisquer modificações de projetos efetuados no período.

O terceiro tipo de vistoria citado em ABNT (2016) é a vistoria especial. Sua execução deverá ser feita por engenheiro especialista, sempre que julgado necessário, durante as inspeções rotineiras ou mesmo periodicamente em obras consideradas vultosas, complexas ou com antecedentes de problemas estruturais. A apresentação dos dados deverá ser feita conforme relatório específico para cada obra.

A última categoria de vistoria citada na ABNT (2016) é a vistoria extraordinária, que pode ser feita em casos de necessidade levantada por inspeção anterior, ocorrência de impacto de veículo ou mesmo pela ocorrência de eventos da natureza. Exige ainda relatório específico com descrição da obra e identificação das anomalias.

Após a explicação das vistorias, a norma ainda traz uma escala de mensuração e classificação das obras, conforme a condição estrutural, desempenho funcional e durabilidade, dividindo as classificações em Excelente, Boa, Regular, Ruim e Crítica, sendo esta última categoria indicativa de falta de condições de uso na OAE.

A NBR 9452:2016 ainda prevê um roteiro básico de inspeção a ser seguido, com detalhamento nas condições da identificação, descrição e informações adicionais. Tal roteiro básico está contido no Anexo A da norma. Além disso, há um fluxograma a ser utilizado em casos de vistoria especial. Cabe salientar que o texto da norma centra-se somente em procedimentos subjetivos de avaliação.

3.1.3 Procedimentos de Verificações nos Estados Unidos

Com uma das maiores e mais documentadas malhas de infraestrutura no mundo, os Estados Unidos possui padrões de verificação de obras de arte bem desenvolvidos. Devido a vários incidentes envolvendo obras de arte especiais, a partir de 1968, uma lei federal deu início ao programa nacional de inspeção de pontes, sendo que em 1971 publicaram-se as primeiras normas de inspeção de pontes (MILANI, 2010). O NBIS (*National Bridge Inspection Standards*) estabeleceu roteiros de inspeção regulares de todas as obras de arte da malha federal e as agências estaduais e locais devem realizar inspeções em conformidade com esses padrões.

O *National Cooperative Highway Research Board* (NCHRB) divulgou em 2014 um documento com o título *Proposed Guideline for Reliability-Based Bridge Inspection Practices*, cujo objetivo é guiar engenheiros e profissionais envolvidos com estruturas de OAEs. O material traz uma abordagem diferenciada chamada de avaliação baseada no risco, que se diferencia das modalidades de inspeção rotineiras por otimizar os recursos, direcionando assim, uma maior quantidade de recursos para aquelas estruturas com um nível de degradação ou risco mais elevado. No documento, encontra-se um conjunto de recursos e definições que tornam possível a implementação dessas estratégias (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH BOARD, 2014). Além desse, outro manual encontrado é o *Bridge Inspector's Reference Manual* (RYAN *et al.*, 2012, p. 15.4.1-15.4.7), que no tópico *Advanced Bridge Evaluation*, cita o uso de sensores de tensão, de deslocamento, de aceleração, de temperatura, de umidade relativa e mesmo o GPS (*Global Positioning System*), como alternativa para avaliação não-destrutiva de pontes.

3.1.4 Ensaios Estáticos e Dinâmicos

Para estruturas em funcionamento, a avaliação estrutural é um processo importante, já que pode revelar condições importantes a qualquer metodologia de manutenção ou reparo e garantir o uso durante toda a vida útil da estrutura. Caso

uma correta avaliação não seja feita, o projetista estará limitado aos códigos e normas, que na maioria das vezes oferecem soluções conservadoras e superdimensionadas para que as obras possam contar com certa confiabilidade (HUSSAIN *et al.*, 2011). Assim, têm-se as soluções de ensaios estruturais, que revelam essas informações importantes à identificação estrutural.

Os ensaios estáticos de estrutura consistem basicamente em posicionar cargas de prova – normalmente um caminhão com massa conhecida – em posições pré-definidas na obra de arte, para que um conjunto de sensores de deslocamento previamente instalados possa mensurar os deslocamentos resultantes do carregamento aplicado. Esse procedimento, somado ao levantamento geométrico da estrutura e a determinação das propriedades físicas dos materiais, permite inferir a armadura existente, possibilitando assim a identificação estrutural da OAE ou a estrutura de baixa frequência (DOS SANTOS, 2013).

Dos Santos (2013) utiliza ainda outro tipo importante de ensaio que pode ser utilizado para a avaliação de uma estrutura, que é o ensaio dinâmico. O procedimento consiste na aplicação de cargas dinâmicas conhecidas e verificação de uma das respostas de deslocamento, velocidade ou aceleração de pontos da estrutura. Esse teste pode ser feito com a instalação de sensores na estrutura e com a posterior passagem com o veículo na prova de carga sobre a obra com uma velocidade conhecida, passando por cima de um ressalto para produzir impacto. Após isso, analisam-se os dados, comparando com as possíveis simulações. Ainda, é possível instalar sensores na própria carga de prova (KIM; KAWATANI; KIM, 2005, p. 1641), com o objetivo de modelar o veículo para posterior simulação computadorizada. Na Figura 1, pode-se visualizar a carga de prova utilizada por Dos Santos (2013) em seu trabalho.

Figura 1: Carga de Prova para Ensaio Estáticos e Dinâmicos



Fonte: Dos Santos (2013).

Outro documento que traz informações sobre ensaios dinâmicos é o *Dynamic Bridge Substructure Evaluation and Monitoring* da *Federal Highway Administration* dos Estados Unidos. O guia consiste na apresentação e no relato do desenvolvimento de técnicas de avaliação e de modelagem de características das respostas dinâmicas de subestruturas de pontes e identificação de tipos de fundação a ser utilizado caso essas OAEs sofram abalos (FHWA, 2005, p. 1). Além disso, o estudo descreve o sistema de excitação e medição, composto por um caminhão especializado em gerar oscilações na estrutura e um conjunto de acelerômetros e um sistema de aquisição de dados (FHWA, 2005, p. 31). Ao final, o guia descreve a metodologia de análise utilizada para verificação das estruturas, propondo sua utilização em conjunto com o método baseado na Transformada de Hilbert-Huang.

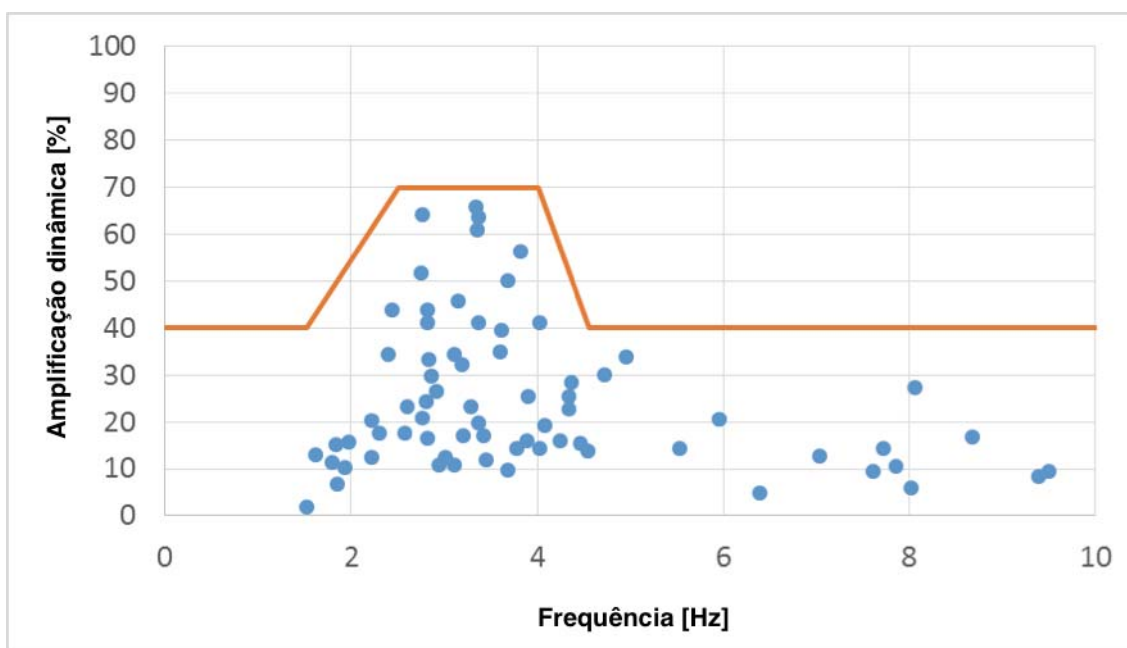
3.2 Vibrações em Estruturas

A inspeção e o monitoramento de obras de arte especiais ainda são extremamente dependentes da identificação visual de indícios de falhas estruturais ou fadiga. Esse tipo de abordagem é problemática, pois depende da perícia e do treinamento do técnico que faz a inspeção. Por outro lado, alguns autores começaram a estudar a correlação que os parâmetros relacionados à vibração das

estruturas, como a frequência natural de oscilação, as taxas de amortecimento e os diferentes modos de vibração possuem com a integridade estrutural da obra.

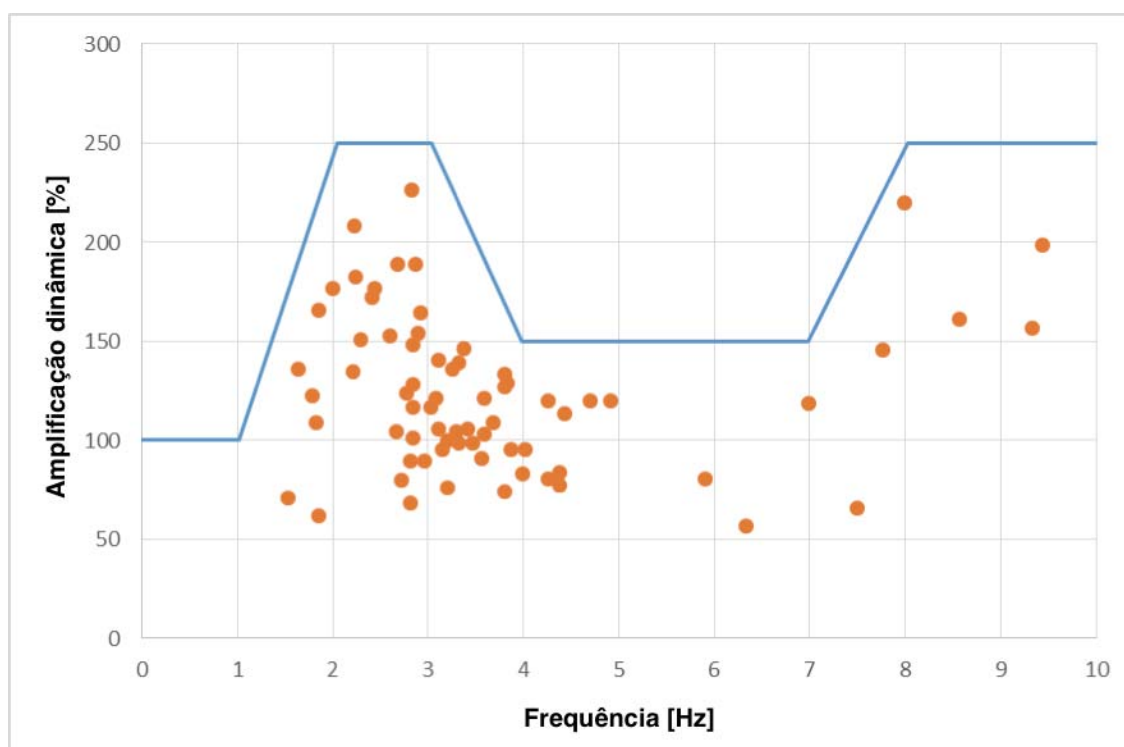
Segundo Bachmann *et al* (1991), as estruturas como pontes, passarelas e viadutos possuem efeitos dinâmicos. Essas perturbações são inseridas na estrutura devido, principalmente, à passagem de veículos e as suas interações com o pavimento ou mesmo choques acidentais. A Figura 2 mostra a amplificação dinâmica de deslocamentos como função da frequência fundamental devido à interação dos veículos com o pavimento. A Figura 3 mostra essa relação devido a choques acidentais.

Figura 2: Amplificação Dinâmica versus Frequências Fundamentais (atuação normal)



Fonte: Adaptado de Bachmann *et al* (1991).

Figura 3: Amplificação Dinâmica versus Frequências Fundamentais (choques acidentais)

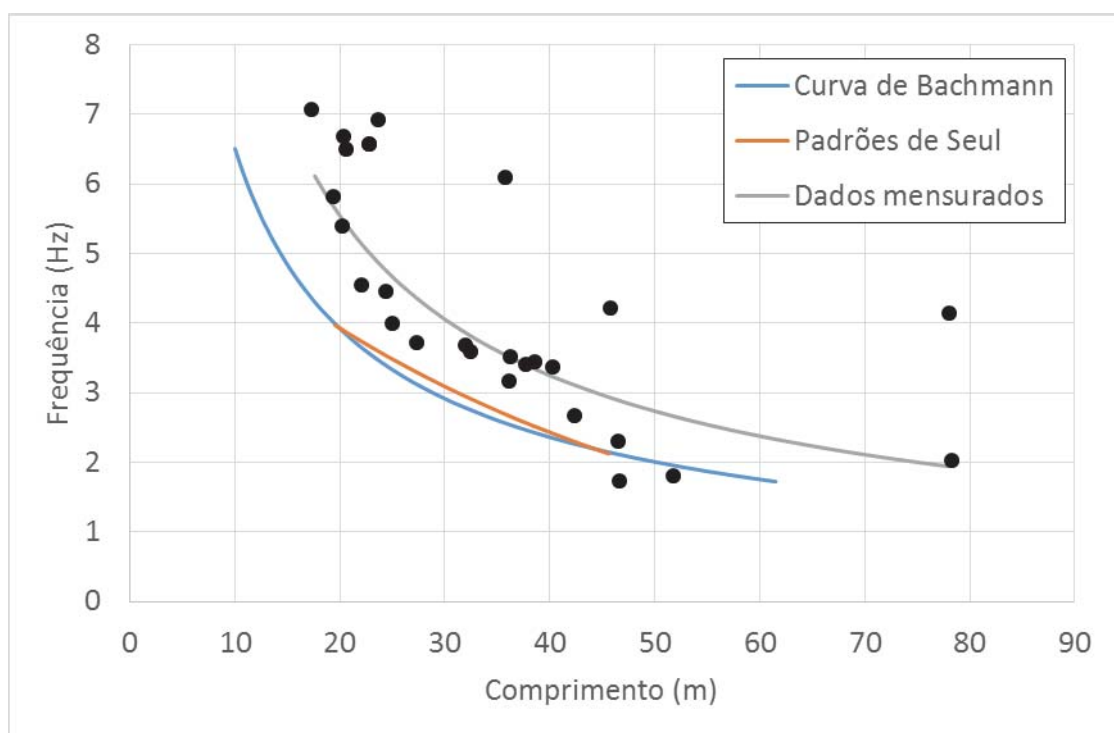


Fonte: Adaptado de Bachmann *et al* (1991).

Como se pode visualizar na Figura 2 e Figura 3, as frequências das oscilações introduzidas nas OAEs possuem uma distribuição até o limite de 14Hz. Isso significa que as vibrações resultantes provavelmente serão semelhantes, com pequenas alterações devido ao amortecimento do sistema. Outro ponto importante é a dependência da frequência natural conforme o comprimento da obra de arte (BACHMANN *et al.*, 1991).

Os estudos com passarelas não são diferentes. Segundo Larocca e Schaal (2006), as passarelas estudadas apresentaram frequências de oscilação de 2Hz - correspondentes ao ato de caminhar - e 3,1Hz, correspondentes à frequência natural da estrutura estudada. Assim, conclui-se que a caminhada de pedestres em uma passarela é suficiente para introduzir vibrações na estrutura, as quais posteriormente são amortecidas. Já Yoon *et al* (2014, p. 779) apresenta um extenso quadro comparativo entre as diversas passarelas estudadas e seus comprimentos, comparando graficamente com os resultados de Bachmann *et al* (1991) e encontrando forte correlação entre os resultados, como se pode visualizar na Figura 4.

Figura 4: Comparação de Resultados Práticos de Yoon e Bachmann



Fonte: Adaptado de Yoon *et al* (2014).

Zhao e Zhang (2012) concentraram-se na identificação de relação entre a modificação estrutural causada por problemas e a mudança nas formas modais, confirmando a viabilidade do método. Da mesma forma, Kumar e Bajpai (2012) afirmam que a deterioração de estruturas relacionadas às obras de arte ou às edificações leva, na maioria dos casos, à modificação da rigidez ou às perdas de massa. Essas modificações são refletidas naturalmente nos parâmetros dinâmicos das estruturas. Assim, um sistema de inspeções baseado no monitoramento de vibrações, pode ser uma alternativa para identificar modificações estruturais.

3.3 Dispositivos de Ensaio e Monitoramento já Desenvolvidos

O uso e o desenvolvimento de equipamentos de monitoramento de estruturas é um assunto crescente e conta com diversas frentes de pesquisa, inclusive para o monitoramento de estruturas nem tão convencionais, como de equipamentos aeroespaciais (BECKER *et al.*, 2009) e de pás de turbinas eólicas (MORADI; SIVOTHTHAMAN, 2015). As técnicas de detecção e ensaio são variadas, porém as

mais utilizadas são as que adquirem informações através de deslocamentos, de deformações, de forças ou de acelerações.

Whelan, Gangone e Janoyan (2009) desenvolveram um sistema de monitoramento composto por até sessenta acelerômetros analógicos lidos por trinta nós de comunicação sem fio, compostos por um microcontrolador MSP430F1611, com conversor analógico-digital de 12 *bits* e circuitos de comunicação por radiofrequência (RF) que comportavam uma taxa de amostragem efetiva de 128 amostras por segundo. Os sinais de RF eram recebidos por uma antena instalada em um veículo estacionado próximo à ponte. Através desse sistema, os pesquisadores analisaram o comportamento de uma ponte, processando as informações através do método *Stochastic Subspace Identification* (SSI). Contudo, o sistema exige a presença de uma antena de recepção instalada nas proximidades do local de ensaio, impedindo assim testes de longa duração ou em uma longa distância.

Outro sistema semelhante foi desenvolvido por Hu, Wang e Ji (2013), que utilizaram pequenos sistemas embarcados com sistema operacional de tempo real em um MSP430F1611 e acelerômetros do tipo SD1221L, com taxa de aquisição de 100 amostras por segundo. O sistema possuía quatro nós de leitura alimentados por baterias. Mais uma vez, ocorrem limitações devido à necessidade da presença de pesquisadores em campo, impedindo assim sua aplicação por longos períodos de tempo.

Há também a aplicação da detecção de vibrações em estruturas expostas a abalos sísmicos, através da qual um sistema de medição de aceleração alimentado por baterias e com comunicação sem fio registra oscilações a partir de um valor de gatilho, funcionando assim apenas em casos de terremotos (TORFS *et al.*, 2013).

Yao *et al* (2015) traz uma técnica de detecção de vibração em estruturas que utiliza um sensor do tipo *strain gage* controlando diretamente um modulador de RF, fazendo com que o sinal de rádio seja alterado conforme as vibrações da estrutura. Assim, um receptor capaz de decodificar essas informações pode retornar os sinais de vibração detectados pelo sistema. Os pesquisadores utilizaram ainda a coleta de energia através de células solares, habilitando o sistema a trabalhar em locais sem a presença de redes de distribuição de energia elétrica. Entretanto, há a necessidade

de instalação de um sistema de antenas de recepção no local, impedindo a chegada dos dados em longas distâncias.

Já outras pesquisas concentraram-se no desenvolvimento de equipamentos que possuíssem a capacidade de se autoalimentarem através da própria oscilação da estrutura. Sazonov *et al* (2009) desenvolveu um sistema de *Energy Harvesting* com capacidade de coletar até $12,5mW$, em uma estrutura com oscilação de $3,1Hz$, especificamente para o uso em sistemas de MIE. Outro exemplo de estudo desse tipo de sistema, visando a aplicação em sistemas de MIE ocorreu com Wardlaw, Karaman e Karsilayan (2013), que objetivou construir um retificador autoalimentado que gerava tensões de $700mV$ para cargas maiores que $100k\Omega$. Por outra via, Mccullagh *et al* (2014) discute as diversas possibilidades de *Energy Harvesting* disponíveis para a utilização com o monitoramento de estruturas citando a energia solar e a coleta de energia térmica através da diferença de temperatura entre a estrutura e o ambiente, a coleta de energia da RF e a coleta das vibrações.

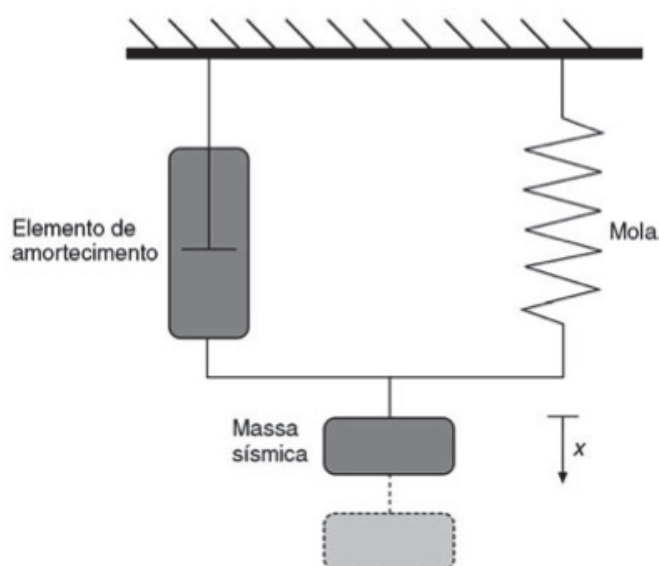
3.4 Medições de Aceleração

Para que as análises disponíveis no conhecimento da AMO sejam possíveis, deve-se fornecer os dados de medição de aceleração das estruturas a serem estudadas. Esses dados podem ser fornecidos através de medições de deslocamento, de velocidade ou de aceleração (BALBINOT, 2010), porém, os sensores mais indicados com relação às características dinâmicas são os de aceleração. Assim, torna-se recomendável a utilização de sensores de aceleração – ou acelerômetros – para o levantamento desses dados, posteriormente enviados a um sistema computacional para processamento.

Segundo Thomazini e Albuquerque (2011), um acelerômetro nada mais é que um transdutor que fornece um sinal elétrico ou lógico proporcional à incidência de aceleração em seu encapsulamento. Em outras palavras dos autores, isso significa que o acelerômetro mede a força de inércia sobre uma massa e, como a aceleração é proporcional à força, pode-se calibrar o sensor para a medição de aceleração. Além disso, esses dispositivos podem ser utilizados para monitorar ângulos de inclinação (PENZ, 2014) e mesmo em sistemas de navegação. (FIGUEIREDO *et al.*, 2007).

O tipo mais básico de acelerômetro utiliza uma massa inercial acoplada a um transdutor piezoelétrico. A Figura 5 mostra um modelo básico de acelerômetro, que consiste basicamente em um sistema massa-mola com massa - chamada também de massa sísmica -, amortecimento e elemento elástico conhecidos. Qualquer força inercial, devido à aceleração, movimenta a massa - de acordo com a Segunda Lei de Newton - e seu deslocamento é proporcional à aceleração aplicada ao conjunto. Sendo assim, pode-se medir a aceleração através do deslocamento da massa (BALBINOT, 2010, p. 200).

Figura 5: Modelo Básico de Acelerômetro



Fonte: Adaptado de Balbinot (2010).

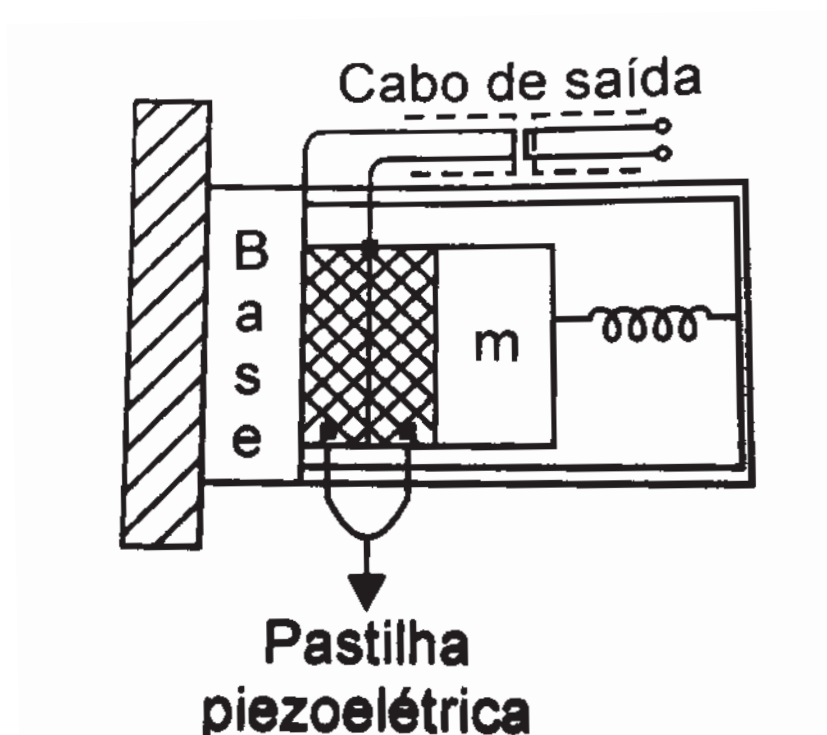
Embora esse tipo de construção seja muito simples, com o avanço das tecnologias de montagem e das aplicações de instrumentação, diversas outras tecnologias de acelerômetros foram criadas. Sendo assim, pode-se dividir as diferentes tecnologias conforme segue.

3.4.1 Acelerômetros Piezoelétricos

Os sensores construídos com tecnologia piezoelétrica possuem alta sensibilidade e baixo custo, além de possuírem ampla faixa de frequência, baixo consumo de energia e resistência a grandes choques (BALBINOT, 2010). Sua construção segue a ideia básica apresentada anteriormente, com a diferença de que

o deslocamento é medido através da aplicação do efeito piezoelétrico. Através de uma pastilha construída de materiais como o PZT ou quartzo e posicionada mecanicamente ao lado da massa sísmica, gera-se uma determinada quantidade de carga elétrica proporcional à força aplicada à pastilha, possibilitando uma saída de sinal elétrico proporcional à aceleração (FIGUEIREDO *et al.*, 2007). É interessante observar que muitas vezes a própria pastilha piezoelétrica serve como elemento elástico no sistema (THOMAZINI; DE ALBUQUERQUE, 2011). Entretanto, como os materiais piezoelétricos trabalham com impedância de saída muito alta, a aplicação somente é possibilitada com a utilização de amplificadores de carga, tornando a utilização de acelerômetros piezoelétricos mais complicada. A Figura 6 mostra o esquema simplificado de um acelerômetro piezoelétrico.

Figura 6: Acelerômetro Piezoelétrico

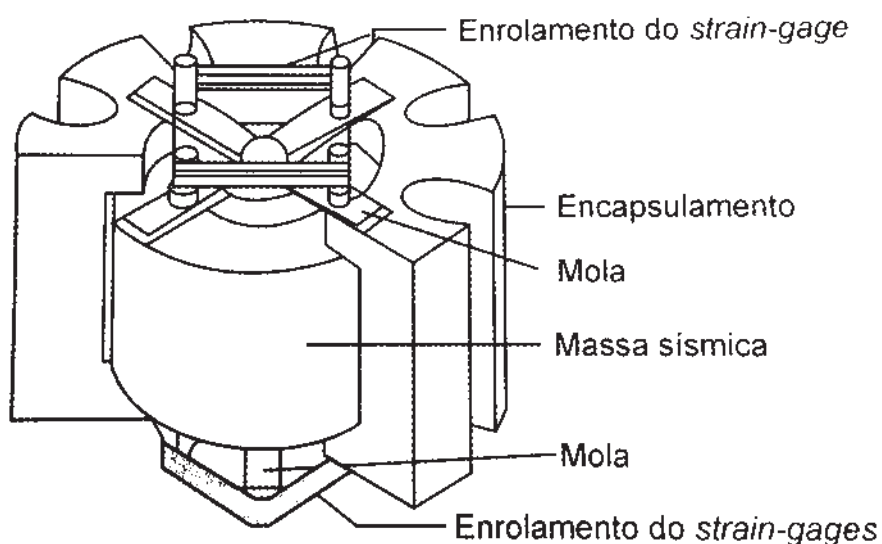


Fonte: Adaptado de Thomazini e Albuquerque (2011).

3.4.2 Acelerômetros Piezoresistivos

Esses dispositivos são construídos com sensores do tipo *strain gages* semicondutores em meia ponte de *Wheatstone* ou ponte completa de *Wheatstone*, possibilitando também sua construção utilizando tecnologia MEMS (*Micro Electromechanical Systems*). Essa família de sensores é indicada para monitoramento de frequências baixas (FIGUEIREDO *et al.*, 2007) e podem ser utilizadas para o sensoriamento de elementos estáticos (BALBINOT, 2010, p. 208). Nesse caso, quanto maior a massa sísmica, maior é a força e o deslocamento exercido sobre os *strain gages*, e maior é a sensibilidade (THOMAZINI; DE ALBUQUERQUE, 2011, p. 86). Essa tecnologia demorou a ser aplicada comercialmente, devido a problemas como a dificuldade de proteção contra sobrecarga mecânica, a contaminação de superfícies e a dificuldade no controle do amortecimento do sistema, prejudicando assim seu desempenho em frequência. A Figura 7 demonstra sua construção básica.

Figura 7: Acelerômetro Piezoresistivo



Fonte: Adaptado de Thomazini e Albuquerque (2011).

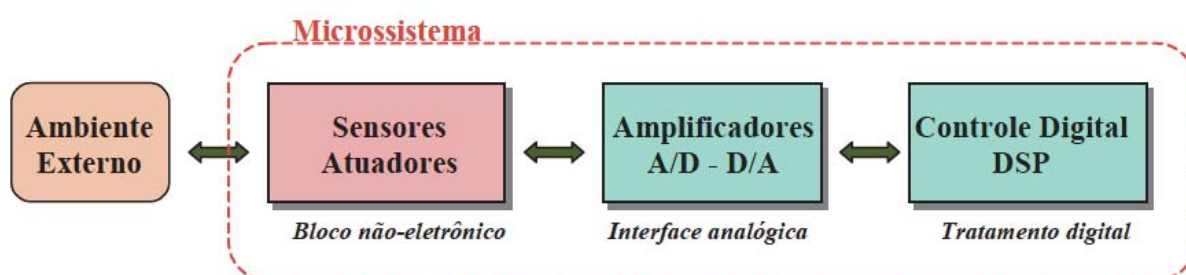
3.4.3 Acelerômetros a Balanço de Forças na Massa

Essa tecnologia de construção de sensores de aceleração conta com um sistema de detecção do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), munido de um amplificador de alto ganho, que por sua vez alimenta um atuador que busca equilibrar o balanço de forças na massa. Dessa maneira, a corrente de saída do amplificador é sempre proporcional à força aplicada ao conjunto, que é também proporcional à aceleração aplicada ao sistema, constituindo assim uma saída elétrica para o transdutor (THOMAZINI; DE ALBUQUERQUE, 2011).

3.4.4 Acelerômetros Integrados Capacitivos

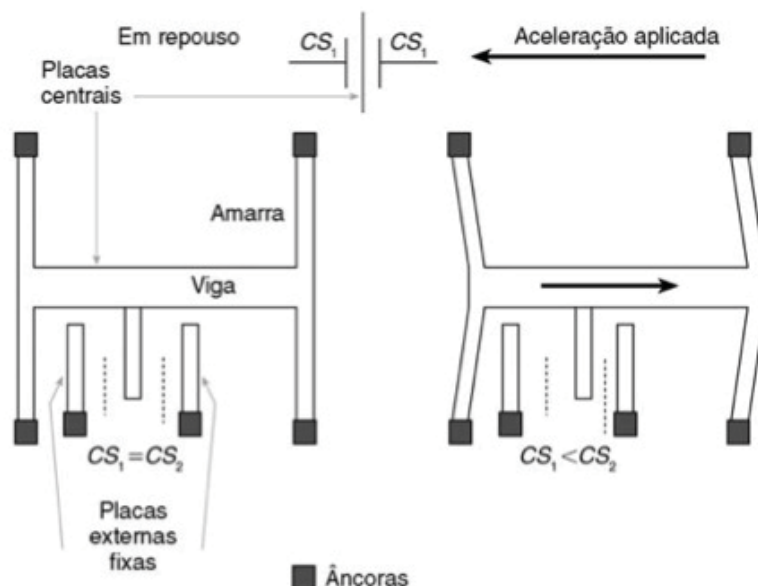
As técnicas de construção de acelerômetros contam ainda com as tecnologias de detecção de aceleração através da variação de capacitância entre microelementos construídos dentro de uma pastilha integrada, utilizando tecnologia MEMS (BALBINOT, 2010). Essa técnica construtiva leva em consideração que os minúsculos elementos de massa sísmica microusinados em um substrato de silício sofrem variações de capacitância quando são expostos ao movimento. Logo, medindo-se a variação da capacitância, mede-se a aceleração. Além disso, a vantagem de ser integrado possibilita que na mesma pastilha seja implementado um condicionador de sinais específico para a aplicação (RIBAS, 2011), gerando assim um ASIC (*Application-Specific Integrated Circuit*) de alta tecnologia (THOMAZINI; DE ALBUQUERQUE, 2011). A Figura 8 mostra o diagrama de blocos simplificado de uma microssistema integrado MEMS, enquanto a Figura 9 mostra o esquema funcional dos acelerômetros capacitivos.

Figura 8: Microssistema MEMS



Fonte: Adaptado de Ribas (2011).

Figura 9: Acelerômetro Capacitivo



Fonte: Adaptado de Balbinot (2010).

Atualmente, diversos fabricantes de circuitos integrados possuem acelerômetros de alta tecnologia que são construídos conforme a figura acima. Isso permite que um sensor desse tipo seja diretamente acoplado a um sistema microprocessado, sem a necessidade de instrumentação mais complicada, além de serem mais imunes à contaminação de superfícies (RIBAS, 2011) - como o caso dos sensores piezoresistivos - que não necessitam de compensação de temperatura e todas as vantagens inerentes ao método de produção através de circuitos integrados, como a maior sensibilidade, a redução de peso, a redução de custos, o maior número de aplicações e a redução nos problemas de temperatura e umidade (BALBINOT, 2010).

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo objetiva descrever a sequência de procedimentos a serem realizados durante o desenvolvimento do protótipo. Nos próximos itens, são descritas as principais etapas do projeto, assim como a metodologia utilizada para a resolução do problema de desenvolvimento do equipamento.

Através da revisão bibliográfica nota-se que algumas das principais dificuldades encontradas por autores que estudaram a AMO – como Hu (2013) - é a pouca disponibilidade ou dificuldade em obter dados relacionados à medição de vibrações, a qual, por sua vez, tem importante correlação com a resposta dinâmica da estrutura. Assim, o dispositivo a ser desenvolvido deverá efetuar medições de vibrações, a fim de fornecer dados para a AMO e para a identificação estrutural.

Outro ponto a destacar é a necessidade de medições contínuas que possibilitem a observação do comportamento da estrutura sob excitações externas - como a passagem de um caminhão, por exemplo – e também manifestar suas respostas naturais amortecidas. Para facilidade de compreensão, o dispositivo desenvolvido será referenciado como SMV (Sistema de Monitoramento de Vibrações).

4.1 Especificação do Projeto

Neste item são abordadas informações relevantes acerca dos objetivos a serem atingidos pelo dispositivo em funcionamento. Cabe salientar que as requisições aqui levantadas estão relacionadas com as necessidades encontradas durante a pesquisa bibliográfica e também durante a pesquisa a itens semelhantes disponíveis atualmente.

4.1.1 Requisições com Relação ao Custo do Equipamento

Uma das principais justificativas para a realização do presente trabalho é o alto custo de implantação dos sistemas similares encontrados no mercado. Portanto, torna-se necessário o desenvolvimento de um dispositivo com custo compatível com

a realidade econômica do país e para que também seja mais viável sua utilização em larga escala.

4.1.2 Requisitos com Relação à Medição de Vibrações

A quantidade de sensores de aceleração disponível no mercado é grande, uma vez que a maioria dos aparelhos móveis de comunicação como celulares e *tablets* possuem em seus circuitos internos pelo menos um desses sensores integrados. O equipamento desenvolvido nesta pesquisa também realiza a medição de vibrações através desses sensores. Assim, a escolha desses dispositivos levou em consideração a sensibilidade, a faixa dinâmica de resposta, a taxa de amostragem máxima, a quantidade de eixos de medição, a saída de dados e também a tensão de alimentação.

Analisando as funções requeridas pelo projeto, a determinação da resolução do sensor a ser utilizado foi definida com cautela, uma vez que essa grandeza está ligada ao menor degrau de variação a ser detectado pelo dispositivo. Esse valor, por sua vez, está ligado à frequência de oscilação da estrutura e também à magnitude do movimento, já que o deslocamento, a velocidade e a aceleração estão ligados por uma relação de taxas de variação, ou seja, a velocidade é a taxa de variação do deslocamento e a aceleração é a taxa de variação da velocidade. Por outro lado, analisou-se dispositivos comerciais utilizados para a mesma função, como o GP2Lx da Sensr LLC, a partir do qual definiu-se a resolução de $1mG$ ou $0,00981 m/s^2$ (SENSR LLC., 2014), a qual atende os requisitos mínimos para sensibilidade do sistema de medição de vibrações proposto nesse estudo.

Já a taxa de amostragem deve ser definida utilizando-se as informações de frequência máxima encontradas em estruturas como OAEs. Segundo Bachmann (1995), a maioria das OAEs possui frequência de vibração que varia entre $2Hz$ e $4Hz$, porém, em alguns casos, a frequência pode ser superior. O autor apresenta o resultado de um levantamento extensivo de obras de arte, no qual a frequência máxima encontrada é inferior a $20Hz$. Sendo assim, através dos conhecimentos de Processamento Digital de Sinais, recomenda-se que a mínima taxa de amostragem em sistemas digitais seja dez vezes maior, pelo menos, do que a frequência máxima do sinal (COUCH II, 1993). Assim, chega-se ao valor de 140 amostras por segundo.

Outro parâmetro importante na escolha do acelerômetro é o fundo de escala de medição que traz a informação do maior valor de aceleração a ser lido pelo sensor. Para determinar esse valor, consultou-se a pesquisa de Braido (2014), na qual encontra-se nos resultados de medições de aceleração o valor máximo de $1,8 m/s^2$ ou $0,1835G$. Por outro lado, os valores encontrados na folha de dados do dispositivo GP2Lx da Sensr LLC são de $\pm 6G$, servindo de balizamento para a escolha do dispositivo utilizado no sistema (SENSR LLC., 2014). Logo, adotou-se o valor de fundo de escala de medição de aceleração como $\pm 6G$.

Com relação à quantidade de eixos de medição - para que haja maior facilidade na instalação do dispositivo - optou-se por três eixos, uma vez que a escolha de um sensor com apenas um eixo levaria à necessidade de orientação do dispositivo na hora da instalação.

A saída de dados não representa um critério de escolha decisivo, já que a maioria dos sistemas de processamento atuais possui várias portas de comunicação digitais e analógicas, dando certa liberdade de escolha com relação a esse parâmetro.

Em contrapartida, a tensão de alimentação é fator importante na escolha do sensor, pois deve utilizar fontes de energia limitadas como baterias ou dispositivos de coleta de energia renovável, visto que o dispositivo será instalado em locais sem acesso à rede de energia elétrica. Assim, foram utilizados sensores que possuem baixa tensão de alimentação e baixo consumo.

4.1.3 Requisições com Relação à Saída de Dados

As informações colhidas pelo dispositivo serão analisadas em *softwares* de processamento numérico, como o Matlab, Maple, Mathematica ou mesmo o Microsoft Excel. Assim, estabeleceu-se que os dados sejam extraídos do dispositivo diretamente a um computador. Logo, existem diversas maneiras de coletar informações de um sistema de processamento embarcado em um dispositivo como o que será desenvolvido. Devido às limitações de acessibilidade que as OAEs possuem, muitas vezes localizadas em áreas rurais e de difícil acesso, o ideal é o monitoramento através da rede de internet. Quando isso for possível, pode ser feito através de um sistema de leitura de informações conectado à rede mundial de

computadores, com acesso através de IP (*Internet Protocol*). Quando não houver a disponibilidade de rede de dados, a retirada de informações deverá ser efetuada através de visita ao local. Para que a coleta seja feita de maneira rápida e fácil, deve-se priorizar a comunicação de dados através de RF (Radiofrequência), que não exige o deslocamento físico do responsável pelo *upload* dos dados até o local exato onde está instalado o dispositivo.

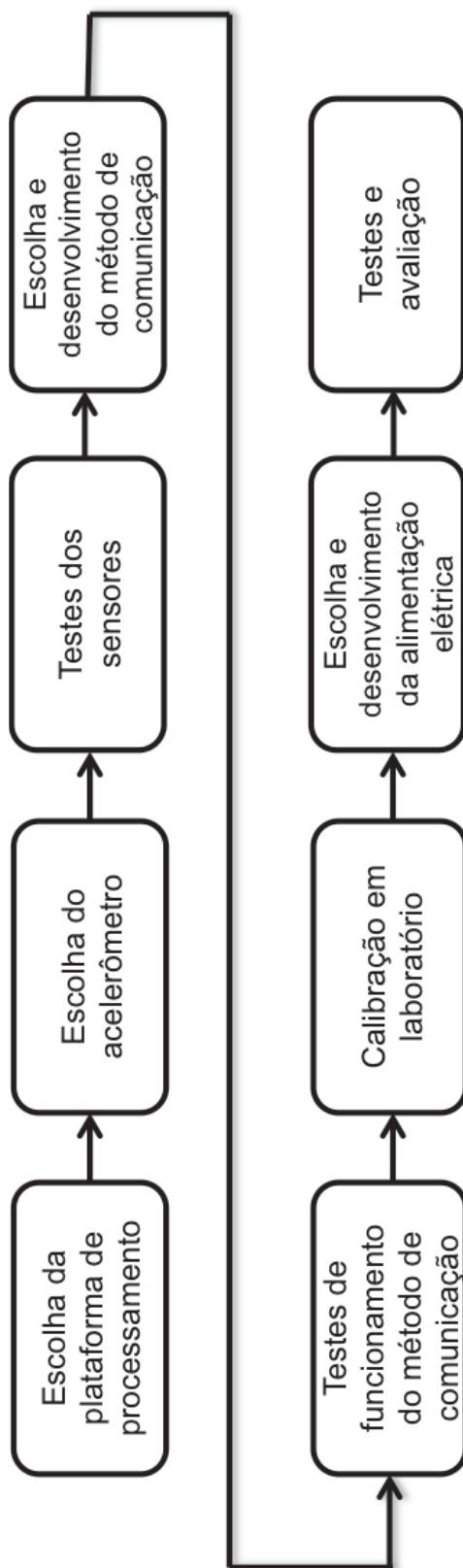
4.1.4 Requisições com Relação à Alimentação do Dispositivo

Conforme descrito no item anterior, os possíveis locais de instalação dos dispositivos estudados, muitas vezes, são isolados e podem não ter disponibilidade de rede elétrica. Logo, é interessante que o dispositivo funcione sem a presença de rede de distribuição de energia elétrica. Para que isso seja possível, foram escolhidos dois métodos principais, a utilização de baterias de alta capacidade e baterias em conjunção com um sistema de carregamento através de energia renovável.

4.2 Sequência de Desenvolvimento do Dispositivo

A sequência de desenvolvimento do dispositivo é descrita pelo diagrama de blocos da Figura 10. Nela estão relacionadas as etapas principais seguidas durante o processo de projeto do dispositivo, divididas como funções.

Figura 10: Diagrama de Blocos para o Desenvolvimento do Dispositivo



Fonte: do autor.

4.2.1 Calibração

O dispositivo desenvolvido no projeto foi calibrado antes de ser testado em campo. Para isso, foram realizados ensaios de laboratório utilizando equipamentos de excitação dinâmica e efetuando as leituras convenientes através do sistema desenvolvido; e também pelo sistema de aquisição de dados da National Instruments CDAQ-9188XT, o qual possui entradas analógicas com 24 *bits* de resolução para sensores, incluindo o de aceleração. Após isso, comparou-se os resultados e, quando necessário, foi realizada a calibração do sistema desenvolvido. Finalmente, o teste foi realizado novamente até que os resultados de medição coincidissem, demonstrando assim a aptidão do equipamento para ser testado já em ambiente externo.

4.2.2 Testes e Avaliação

Com o sistema pronto para ser utilizado em ambiente externo, testes de campo foram efetuados para a avaliação do instrumento desenvolvido. Assim, através da escolha de locais em que existissem OAEs autorizadas a serem instrumentadas pelos órgãos responsáveis, definiu-se testes de campo para a verificação das respostas estruturais medidas pelos dispositivos.

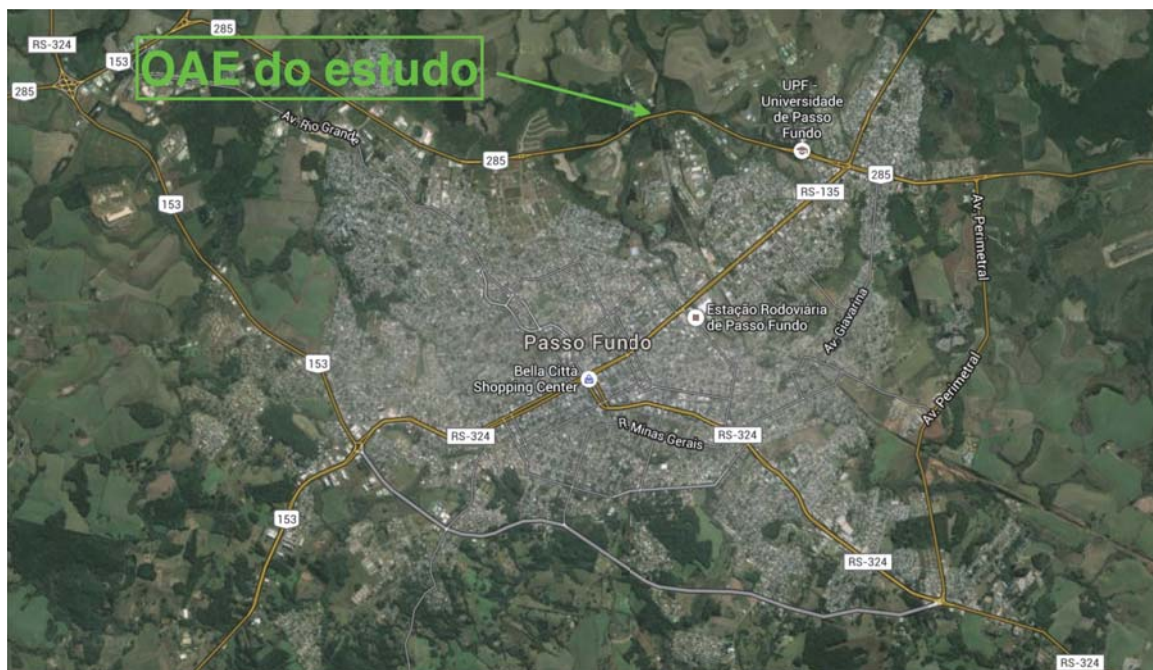
4.3 Escolha do Local de Teste

O trabalho de Jorge e Rintzel (2010) fornece um panorama das condições das OAEs no município de Passo Fundo. Neste trabalho foi realizado um levantamento após vistoria de treze obras de arte espalhadas pelo município, seguindo um padrão descritivo catalográfico e fotográfico.

Além disso, Braido (2014) desenvolveu um trabalho de avaliação de estruturas de OAEs nos limites do município, escolhendo inclusive dois viadutos incluídos nos estudos de Jorge e Rintzel (2010). Sendo assim, devido à grande disponibilidade de dados já extraídos e analisados, escolheu-se um dos viadutos estudados por Braido (2014).

Na Figura 11 está sinalizada a localização do viaduto escolhido.

Figura 11: Localização da OAE a ser estudada



Fonte: do autor.

4.3.1 Viaduto Estudado

Obra de arte localizada na BR-285 entre Carazinho e Lagoa Vermelha, no município de Passo Fundo e próximo ao Distrito Industrial. Suas dimensões são de 22,5m de comprimento, 10,2m de largura e vão central máximo de 12,1m. A seguir, encontram-se alguns itens da descrição feita por Jorge e Rintzel (2010):

- A estrutura é de concreto armado moldado in loco;
- Pavimento asfáltico, não possui passeio ou guarda-rodas, possui pingadeiras e drenagem para exaustão pluvial. Além disso, contém quatro juntas de dilatação, porém, sem vedação nos pilares;
- Elementos de apoio descaracterizados e provavelmente sem função;

A Figura 12 e Figura 13 mostram alguns detalhes do Viaduto estudado.

Figura 12: Viaduto Estudado



Fonte: Adaptado de Braido (2014).

Figura 13: Mesoestrutura e Infraestrutura do Viaduto Estudado



Fonte: Adaptado de Braido (2014).

4.4 Metodologia de Teste

O teste foi efetuado com a realização de um ensaio de campo. A metodologia utilizada foi a aquisição de dados de aceleração com o uso do protótipo do equipamento desenvolvido, seguida da análise gráfica dos dados para determinação do instante exato em que a vibração torna-se livre e, posteriormente, foi feita a escolha do intervalo de amostras para aplicação da Transformada de Fourier, com o objetivo de analisar o sinal no domínio da frequência. Após isso, o gráfico de densidade espectral de potência mostrou o valor de frequência natural do objeto de estudo.

No teste, o equipamento foi instalado diretamente no Viaduto descrito no item 4.3.1, também contando com quatro acelerômetros, e seus dados comparados com os de teóricos atuais que estudaram a mesma OAE. Ao final, concluiu-se a exequibilidade do protótipo.

5 DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO

Este capítulo descreve o procedimento de engenharia utilizado para o desenvolvimento do SMV. Nele observam-se as requisições verificadas no item 4.1, são consideradas as opções de projeto disponíveis e, posteriormente, definem-se as escolhas conforme a melhor conveniência segundo as necessidades de projeto.

5.1 Escolha da Plataforma de Processamento

A unidade mais importante e responsável pelo controle e leitura de diversas outras partes do sistema é a unidade de processamento digital (TOZETTO, 2012). No presente trabalho será composta por um microcontrolador já dotado de diversos periféricos necessários ao funcionamento completo da unidade. Portanto, o estudo da unidade basicamente se resume ao estudo do microcontrolador a ser utilizado pelo projeto.

5.1.1 Propriedades de Processamento Necessárias ao Sistema

Neste item são listadas algumas propriedades importantes na definição de escolha do microcontrolador observando-se as necessidades de projeto do SMV.

5.1.1.1 Velocidade de execução de instruções

A velocidade de execução de instruções é muito importante, visto que, além de efetuar as leituras de sinais do acelerômetro, o instrumento deve processá-las numericamente, armazenar na memória e enviá-las através do método de comunicação escolhido. Além disso, deve controlar os circuitos do sistema de transmissão de dados. Assim, é desejável que a CPU (*Central Processing Unit*) execute as instruções com velocidade suficiente para oferecer uma boa taxa de atualização dos dados. Através de ensaios efetuados com as rotinas de leitura do acelerômetro, chega-se a um valor ideal superior a 20 milhões de instruções de cálculo executadas a cada segundo.

5.1.1.2 Arquitetura e Processamento de Variáveis

Um fator importante para a velocidade com que as instruções de cálculo são executadas é a preparação da estrutura para o trabalho com variáveis, pois dependendo da forma como as unidades de soma e multiplicação são implementadas no *hardware* do microcontrolador, a execução de algum cálculo pode ser lenta ou rápida. Ainda, como o instrumento trabalhará com medições de sinais físicos de baixa amplitude, poderá depender de filtragem digital para a correta estabilidade dos dados. Logo, é desejável que a arquitetura do microcontrolador seja preparada para executar estruturas de multiplicação em laço, comuns à aplicação de filtros digitais em *softwares*.

5.1.1.3 Memória de Acesso Randômico

Como serão efetuadas conversões de sinais com vários bits de resolução e posteriormente filtragem digital - com a acumulação de diversas leituras - exige-se a presença de uma quantidade apreciável de memória RAM (*"Random Access memory"*). Como exemplo, para uma sequência de amostragem de 3000 amostras de aceleração, armazenadas em variáveis de 16 *bits*, chega-se a aproximadamente 6kB apenas para armazenagem das amostras.

5.1.1.4 Memória de Programa

Como abordado anteriormente, o microcontrolador será responsável pela leitura de sinais e pelo processamento digital dos mesmos, além de controlar os circuitos do sistema de transmissão de dados. Logo, todas essas funções consomem quantidade apreciável de memória de programa, tornando necessária a presença de boa quantidade da mesma.

A determinação da quantidade de memória de programa necessária para determinada aplicação é uma tarefa complicada, pois depende não apenas da aplicação em si, mas também de diversos outros fatores. Entre eles, pode-se citar a arquitetura do microcontrolador, o seu modo de funcionamento, a linguagem de programação escolhida, o compilador utilizado, a versão do compilador utilizado,

além da própria experiência do programador (PEREIRA, 2003). Assim, uma das melhores maneiras de determinar a quantidade de memória necessária para determinada aplicação é a realização de ensaios práticos com pequenos segmentos de funções a serem realizadas pelo produto final do projeto.

Logo, conforme ensaios realizados anteriormente à execução do projeto, o processamento de variáveis de ponto flutuante necessárias para os cálculos filtragem consome elevada quantidade de instruções. Sendo assim, através de testes experimentais, chega-se a uma previsão de gasto de memória de programa de mais de $64kB$, significando que deve ser selecionado um microcontrolador com espaço de memória de programa superior a esse.

5.1.1.5 Pinos de Entrada/Saída

O SMV dependerá da unidade digital para realizar as principais operações em seu circuito, tais como: efetuar a leitura do acelerômetro, processá-las, armazená-las e, posteriormente, enviá-las através do método de comunicação. Assim, a quantidade de pinos de entrada/saída necessários para o funcionamento do SMV pode ser estimada.

A grande maioria dos acelerômetros encontrados no mercado possuem interface de comunicação digital serial do tipo SPI ou I²C, logo torna-se essencial que o microcontrolador escolhido possua esses protocolos de comunicação implementados em *hardware*.

Outro ponto é a necessidade de enviar os dados para um sistema computacional mais complexo, como um PC (*Personal Computer*). Independentemente de como será feita essa comunicação, a maioria das interfaces de comunicação entre microcontrolador e PC trabalham com protocolos de comunicação seriais implementados em *hardware* tanto em microcontroladores quanto em PCs. Logo, torna-se necessário que o microcontrolador escolhido conte com essa porta de comunicação.

Além disso, é interessante que o dispositivo digital escolhido conte com mais alguns pinos excedentes de entrada/saída para controle físico dos circuitos de alimentação, aquisição e comunicação.

5.1.2 Microcontroladores Passíveis de Utilização

Analisando todas as necessidades abordadas anteriormente, chega-se ao momento da escolha da plataforma digital a ser utilizada, assim, pode-se listar algumas características das principais plataformas existentes no mercado que podem ajudar nesse processo.

5.1.2.1 Plataforma 8051

Uma das primeiras plataformas comerciais desenvolvidas sofre principalmente com a falta de desempenho na execução de instruções - devido à arquitetura CISC ("*Complex instruction Set Computer*") - e pela falta de periféricos, como canais de comunicação. Possui largura de barramento digital de dados de 8 bits (ATMEL, 2015).

5.1.2.2 Plataforma PIC

Embora tenha condições de execução de instruções melhores que as da plataforma 8051- devido à arquitetura RISC ("*Reduced Instruction Set Computer*") - e presença de periféricos, não possui grande suporte ao processamento digital de sinais, traduzindo-se em estrutura de *hardware* pouco desenvolvida com relação a procedimentos numéricos, podendo atrasar a execução de instruções de cálculo. Possui largura de barramento de 8 bits (PIC10) até 32 bits (PIC32) (MICROCHIP, 2015).

5.1.2.3 Plataforma dsPIC

Desenvolvida através do melhoramento da tecnologia PIC, tem velocidade de execução e presença de periféricos melhorada com relação aos dispositivos da família que o originou. Além disso, possui estrutura preparada para trabalho com cálculo numérico e largura de barramento de 16 bits, auxiliando na velocidade de trabalho com operações matemáticas (MICROCHIP, 2015). A Microchip, empresa produtora dos dispositivos PIC e dsPIC, denomina essa plataforma como *16-bit*

Digital Signal Controllers, devido a suas habilidades numéricas, em analogia aos dispositivos DSP (*“Digital Signal Processors”*), produzidas pela Texas Instruments.

5.1.2.4 Plataforma Atmel AVR

Família de microcontroladores produzida pela Atmel, possui arquitetura RISC e conta com estrutura de *hardware* pouco adaptada ao trabalho com cálculo numérico. Embora possua boa oferta de periféricos, a ausência de ferramentas numéricas de *hardware* limita sua utilização para o Processamento Digital de Sinais. Possui largura de barramento de 8 bits (AVR) e 32 bits (AVR32) (ATMEL, 2015).

5.1.2.5 Plataforma Arduino

Consiste em um conjunto de ferramentas de utilização livre para desenvolvimento de dispositivos eletrônicos desenvolvida com base em microcontroladores Atmel AVR (8 bits de barramento) ou ARM (32 bits de barramento). Seu desenvolvimento objetivou democratizar o desenvolvimento de aplicativos eletrônicos por amadores que não possuem conhecimentos mais aprofundados sobre ferramentas de processamento ou linguagens de programação mais específicas. A sua programação é feita através de linguagem de programação específica. Um dos entraves a sua aplicação em ferramentas mais robustas é a limitação de *hardware*, que não conta com preparação para trabalho com cálculo numérico (ARDUINO, 2015).

5.1.2.6 Plataforma ARM

Microcontrolador com plataforma de concepção nova, o ARM (*“Advanced RISC Machine”*) possui melhor desempenho na execução de instruções dentre as plataformas comparadas e boas condições de periféricos. Porém, a ausência de ferramentas de desenvolvimento e programação disponíveis o torna limitado. Além disso, a maioria dos dispositivos dessa família não tem arquitetura preparada especificamente para funções com grande exigência de desempenho numérico, limitando sua utilização em processamento digital de sinais. Possui largura de barramento digital de dados de 32 bits (ARM, 2015).

5.1.2.7 Plataforma Raspberry Pi

Desenvolvidos inicialmente para constituir um computador pessoal de baixíssimo custo, os dispositivos dessa família contam com microprocessadores de arquitetura ARM com largura de barramento de 32 *bits*. Como esses dispositivos trabalham com sistemas operacionais embarcados, suas configuração e operação dependem da utilização de programação em sistemas como Linux, Android, Windows CE, entre outros, e sua capacidade de processamento é superior, assim como a quantidade de periféricos. Entretanto, sua aplicação em dispositivos de tempo real é complicada, sendo que os SDKs (*Software Development Kit*) disponíveis para aplicações críticas são pagos (RASPBERRY PI, 2015).

5.1.2.8 Plataforma Beaglebone Black

Dispositivo desenvolvido pela Texas Instruments com base em um microprocessador ARM de 32 bits, também trabalha com sistemas embarcados. Da mesma maneira que o Raspberry Pi, o *hardware* implementado nessa plataforma é superior, assim como as opções de conectividade. Porém, trabalha com sistemas operacionais embarcados e a sua aplicação em rotinas críticas é complicada, necessitando de um pacote de desenvolvimento de tempo real pago (TI, 2015).

5.1.3 Microcontrolador Escolhido

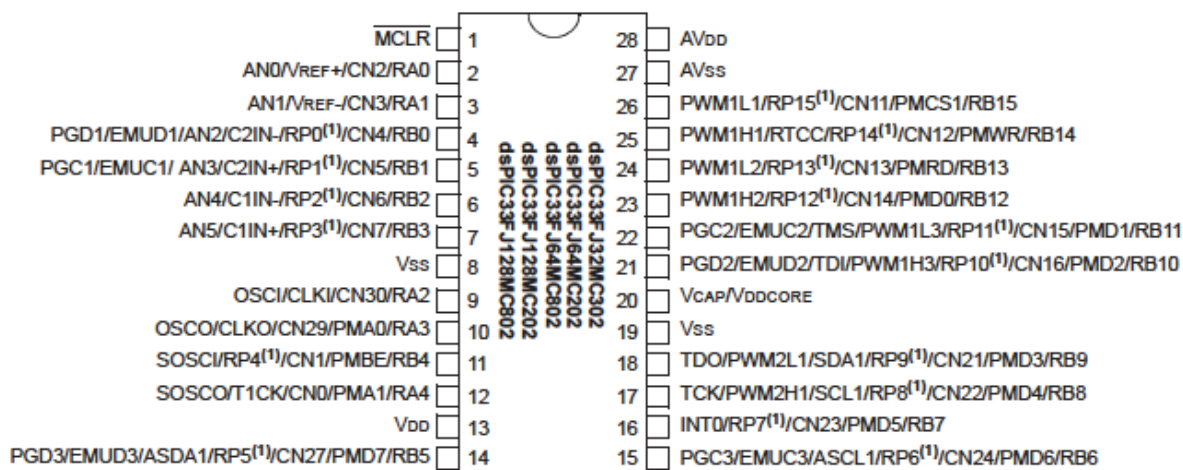
Analisando as vantagens e desvantagens de cada plataforma apresentada no item anterior, opta-se pela escolha da plataforma dsPIC, em especial um microcontrolador da série dsPIC33F preparado para controle de processos. A sua nomenclatura completa é dsPIC33FJ128MC802-I/SP e suas características são:

- a) Execução de instruções em até 40MIPS, com ciclo de 25ns;
- b) Arquitetura preparada para execução de tarefas numéricas;
- c) Presença de DMA;
- d) 16kB de memória RAM;
- e) 128kB de memória Flash para programa;

- f) Oscilador interno;
- g) Presença de portas de comunicação seriais SPI, I²C e Serial TTL implementadas em *hardware*;
- h) Encapsulamento DIP;
- i) Até 21 pinos de I/O;

A Figura 14 mostra a organização dos pinos de saída dos microcontroladores dessa família.

Figura 14: dsPIC33FJ128MC802 *pinout*



Fonte: Adaptado de Microchip (2008).

5.2 Escolha do Acelerômetro

A finalidade principal do SMV é realizar a mensuração contínua de vibrações. Logo, o principal componente envolvido nesse processo é o acelerômetro. Para sua escolha, realiza-se uma pesquisa paramétrica com diversos modelos comercialmente disponíveis, selecionando-se o mais indicado para a aplicação.

5.2.1 Propriedades Necessárias ao Acelerômetro do SMV

Neste item são enumeradas diversas características importantes ao sensor escolhido observando-se as necessidades de projeto do SMV.

5.2.1.1 Tecnologia construtiva do acelerômetro

Conforme o revisado no item 3.4, existem diversas tecnologias de construção de acelerômetros, dentre as quais, pode-se citar os piezoelétricos, piezoresistivos e capacitivos MEMS.

Os acelerômetros piezoelétricos oferecem alta sensibilidade, apresentando ampla faixa de resposta em frequência. Em contrapartida, como o sensor trabalha com a geração de carga através do efeito piezoelétrico, necessita-se de caros amplificadores de carga, fato que limita sua utilização a casos específicos.

Já os acelerômetros piezoresistivos caracterizam-se por serem excelentes em faixas de frequência abaixo de 1Hz , possibilitando sua utilização em medições estáticas. Porém, como trabalham com *strain gages*, possuem uma elevada dependência de compensação de temperatura. Além disso, o tamanho e o peso do sensor são impeditivos para aplicações em que o tamanho seja importante.

Em contrapartida, a tecnologia de acelerômetros capacitivos MEMS atende à maioria das especificações de faixa dinâmica de funcionamento, além de possuir todas as vantagens de ser integrado em uma pastilha de silício. A maioria deles já possui circuitos internos de condicionamento de sinal e compensação, facilitando muito sua utilização. Ainda, possuem sistemas de funcionamento de baixo consumo, permitindo aplicações com limitação de energia disponível. Cabe salientar que a grande maioria dos sensores disponíveis comercialmente são construídos com essa tecnologia, o que lhes torna uma opção de grande utilidade e de ótimo custo-benefício.

5.2.1.2 Quantidade de Eixos de Medição

A análise de OAEs através da AMO permite a verificação de diversos modos de oscilação em várias direções. Assim, a análise da estrutura pode ser feita nos três eixos de medição, exigindo um acelerômetro que execute medições nas três direções.

5.2.1.3 Sensibilidade do Acelerômetro

Como visto no item 4.1.2, quantificar a sensibilidade necessária para atender à demanda de projeto do SMV é uma tarefa difícil. Porém, consultando-se a folha de dados de componentes utilizados para a mesma função, encontram-se valores sempre próximos a $1mG$ ou $0,00981 m/s^2$. No caso de acelerômetros com saída digital, o menor valor quantificável digitalmente também deverá ser esse. Outro ponto a observar – já que a maioria dos sensores de aceleração comerciais possui resolução dependente do valor de fundo de escala – é se o sensor consegue respeitar essa resolução mínima com o valor de fundo de escala definido para esse projeto.

5.2.1.4 Fundo de Escala de Medição do Acelerômetro

Conforme o item 4.1.2, o fundo de escala é o valor máximo de aceleração a ser mensurado pelo sensor. Por sua vez, Braido (2014) efetuou as medições de aceleração em dois viadutos, utilizando-se de um celular dotado com acelerômetro, medindo o valor máximo de $0,1835G$. Entretanto, o valor encontrado no dispositivo GP2Lx da Sensr LLC - que serve como balizador ao desenvolvimento do sistema estudado nesse trabalho - é de $\pm 6G$. Assim, define-se o valor mínimo de $\pm 6G$ como objetivo para a escolha do acelerômetro.

5.2.1.5 Faixa Dinâmica do Acelerômetro

Segundo Bachmann (1991), a maioria das OAEs e das estruturas passíveis de estudo dinâmico possuem frequência de vibração entre $2Hz$ e $14Hz$, com valores máximos de aproximadamente $14Hz$. De acordo com os conhecimentos de Processamento Digital de Sinais, a faixa dinâmica – ou largura de banda – de um sistema de sensoriamento ou amostragem deverá ser dez vezes maior que a maior frequência encontrada para a variável de interesse (COUCH II, 1993). Dessa maneira, o acelerômetro está habilitado a registrar frequências de até $140Hz$.

5.2.1.6 Tensão de Alimentação do Acelerômetro

O projeto deve contar com a alimentação através de baterias e energia renovável. Logo, a tensão de trabalho do acelerômetro deverá ser compatível com essas características. Além disso, torna-se interessante que o sensor possua sistemas de baixo consumo, objetivando a extensão da duração das baterias.

5.2.1.7 Saída de Dados do Acelerômetro

Um dos objetivos do projeto é manter o custo relativamente baixo se comparado aos equipamentos existentes. Assim, um acelerômetro que exija um pesado *hardware* de instrumentação não é viável. Dessa maneira, opta-se por acelerômetros com saídas digitais – preferencialmente seriais - que já possuem compensação interna contra variações de temperatura e umidade relativa e não exigem aparato analógico muito avançado.

5.2.2 Acelerômetros Passíveis de Utilização

De posse das características necessárias levantadas anteriormente, analisa-se as opções disponíveis no mercado. Dentre os principais fornecedores de tecnologia em sensoriamento de acelerações estão grandes empresas produtoras de semicondutores de diversas finalidades como a Analog Devices, a ST Microelectronics e a Freescale Semiconductor. Assim, faz-se uma breve descrição de cada opção de projeto pesquisada.

5.2.2.1 Família ADXL345 da Analog Devices

Esta família de acelerômetros MEMS fabricada pela Analog Devices conta com modelos de sensores de três eixos de medição, com pequeno tamanho físico e baixo consumo de energia. A saída de dados digitais é realizada através de palavras de 16 *bits*, com possibilidade de comunicação serial SPI e I²C. A sensibilidade do sensor é dada por leituras de 13 *bits* para medições de até 16*G*, resultando em uma sensibilidade de 4*mG* (ANALOG DEVICES, 2009).

5.2.2.2 Família LIS2D e LIS3D da ST Microelectronics

Esses sensores fabricados pela ST Microelectronics são anunciados pelo fabricante como extremamente precisos para funções de *motion-sensing*, possibilitando medições em três eixos. Eles contam com modos de baixa energia e possuem ainda máquina de estados integrada, permitindo o reconhecimento de modificações na aceleração sem a necessidade de comando do microcontrolador mestre. A saída de dados é efetuada através de portas de comunicação seriais SPI e I²C. Sua sensibilidade de leitura é de aproximadamente $244\mu G$ para faixa de $\pm 2G$ (ST, 2012).

5.2.2.3 Família Xtrinsic MMA845xQ da Freescale Semiconductor

Fabricados pela Freescale Semiconductor, esses transdutores contam com medições em três eixos e sensibilidade aumentada para utilização em detecção de movimento, de orientação e de queda livre. Contam ainda com máquina de estados integrada, possibilitando a ativação de saídas de interrupção para o microcontrolador. A resolução do sensor digital de até 14 *bits* para medições até $\pm 2G$ permite uma sensibilidade de medição de até $976\mu G$. Contudo, para valores de fundo de escala maiores como $\pm 4G$ e $\pm 8G$ a resolução se mantém, fazendo com que o mesmo não atenda às necessidades de projeto com relação à resolução. Possui canal de comunicação serial I²C (FREESCALE, 2010).

5.2.2.4 Família MPU-6000/MPU-6050 da Invensense

A linha MPU-60X0 da Invensense é pioneira em oferecer em uma única pastilha de silício um conjunto que possui acelerômetro de três eixos, um giroscópio de três eixos e ainda um sensor de temperatura integrado (INVENSENSE, 2013). Além disso, todos os sensores têm seus dados processados por conversores analógico-digitais de 16 *bits*, com faixas de medição de aceleração de $\pm 2G$, $\pm 4G$, $\pm 8G$ e $\pm 16G$, o que oferece uma resolução de $244\mu G$ para a faixa de $\pm 8G$. Por outro lado, toda a comunicação é feita através de um canal serial I²C, restando a

possibilidade de conectar uma bússola eletrônica diretamente ao dispositivo através de uma porta serial I²C auxiliar (INVENSENSE, 2015).

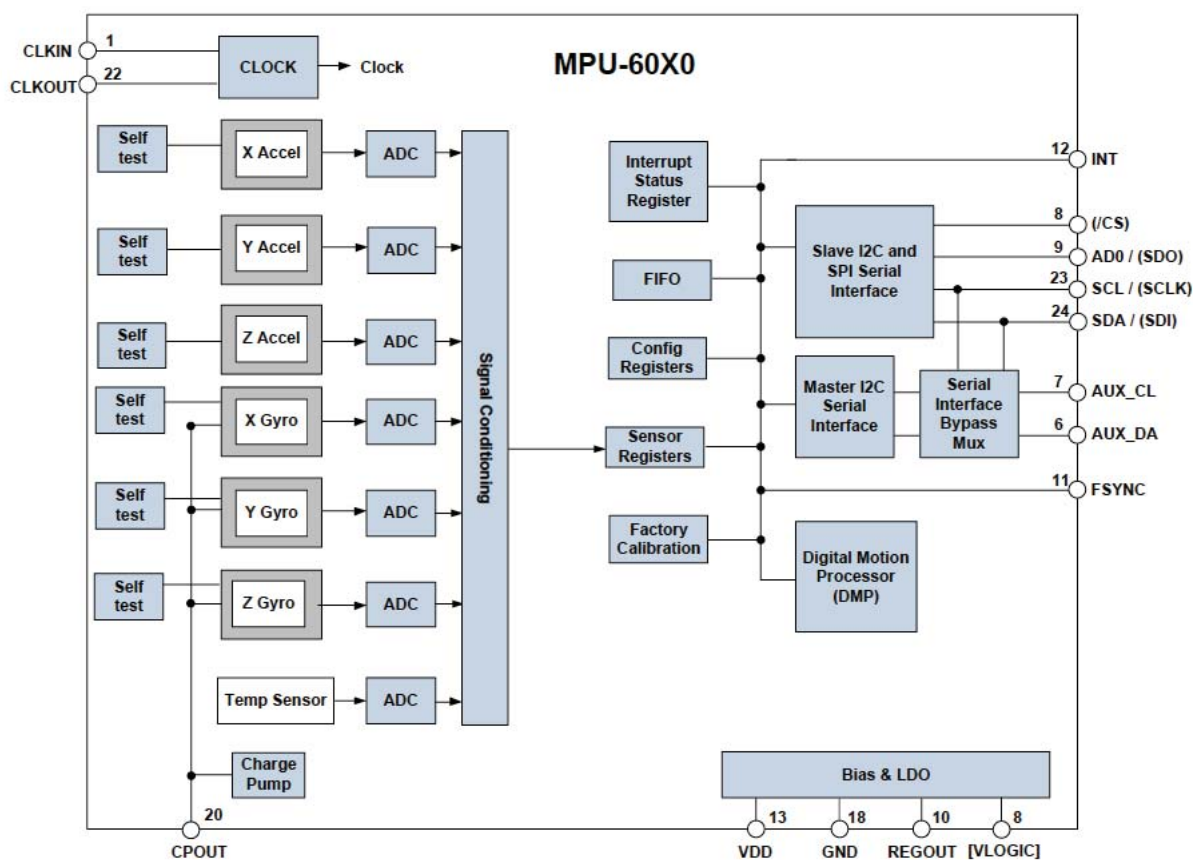
5.2.3 Acelerômetro Escolhido

A escolha do acelerômetro efetuou-se observando as propriedades apresentadas no item 5.2.1. Com relação à tecnologia construtiva, à quantidade de eixos sensores, à faixa dinâmica, à tensão de alimentação e à saída de dados, todos cumprem com o necessário sob o aspecto de projeto. Portanto, a sensibilidade dos sensores da família ADXL345 e MMA845xQ é insuficiente para o objetivado com esse dispositivo, limitando a escolha aos acelerômetros das famílias LIS, da ST Microelectronics, e MPU-6050, da Invensense. Finalmente, a escolha do acelerômetro é feita através da pesquisa de disponibilidade comercial e custos dos sensores junto aos fornecedores de componentes nacionais, além das possibilidades técnicas adicionais do sensor. Assim, o acelerômetro MPU-6050 foi escolhido para utilização no projeto do SMV. As principais características desses sensores são:

- a) Alimentação de 2,375V até 3,46V;
- b) Possui sensor de aceleração, giroscópio e sensor de temperatura;
- c) Escala programável de $\pm 2G/\pm 4G/\pm 8G/\pm 16G$;
- d) Saída digital de 16 bits;
- e) Interface serial I²C;
- f) Duas interrupções programáveis;
- g) Auto-teste;
- h) Consumo de corrente de até 3,6mA com modo *low power* de 70 μ A;
- i) Resistente a choques de até 10000G;

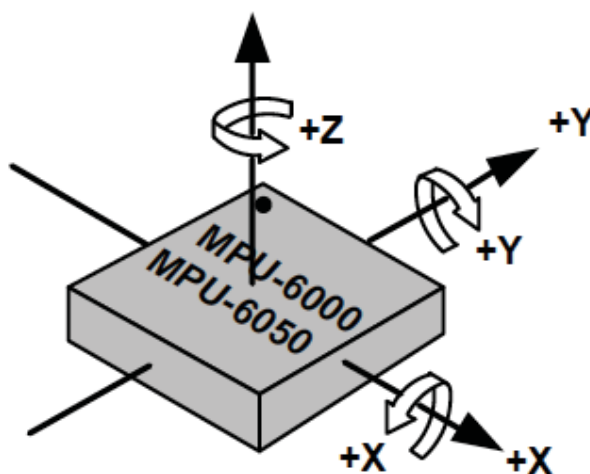
A Figura 15 mostra o diagrama de blocos da estrutura interna do acelerômetro enquanto a Figura 16 mostra a orientação espacial do sensor.

Figura 15: Diagrama de Blocos do Acelerômetro MPU-60X0



Fonte: Adaptado de Invensense (2013).

Figura 16: Acelerômetro da Família MPU-60X0

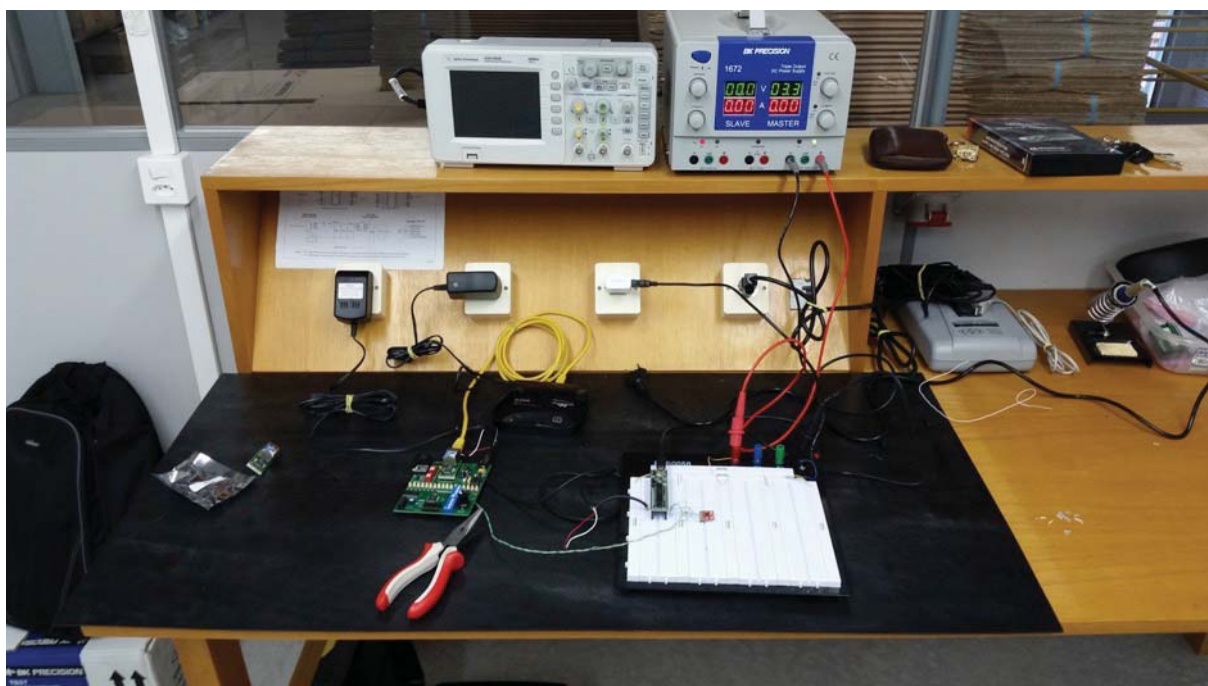


Fonte: Adaptado de Invensense (2013).

5.3 Testes dos Sensores

Com a escolha da plataforma de processamento e do acelerômetro concluída, passa-se ao procedimento de teste dos componentes escolhidos. Desse modo, a melhor maneira de executar essa tarefa é a montagem dos componentes em *proto-board*. Para isso, utilizou-se o kit de desenvolvimento da Microchip Microstick 2, que já possui em seu circuito uma interface de programação e alimentação do sistema, munido com o microcontrolador dsPIC33FJ128MC802 em conjunto com o acelerômetro. Através da consulta ao *datasheet* do acelerômetro, desenvolveu-se a rotina de comunicação I²C programada em C e compilada através do compilador CCS IDE, da *Custom Computer Software*. Após alguns ajustes, a leitura da palavra digital de medição do acelerômetro foi adquirida e pôde ser acessada através de comunicação serial entre o microcontrolador e um computador pessoal. De posse desses dados, tornou-se possível, através do *software* Mathematica plotar o primeiro conjunto de dados provenientes do sensor em um único eixo. Através da Figura 17 pode-se visualizar a montagem inicial de teste dos componentes.

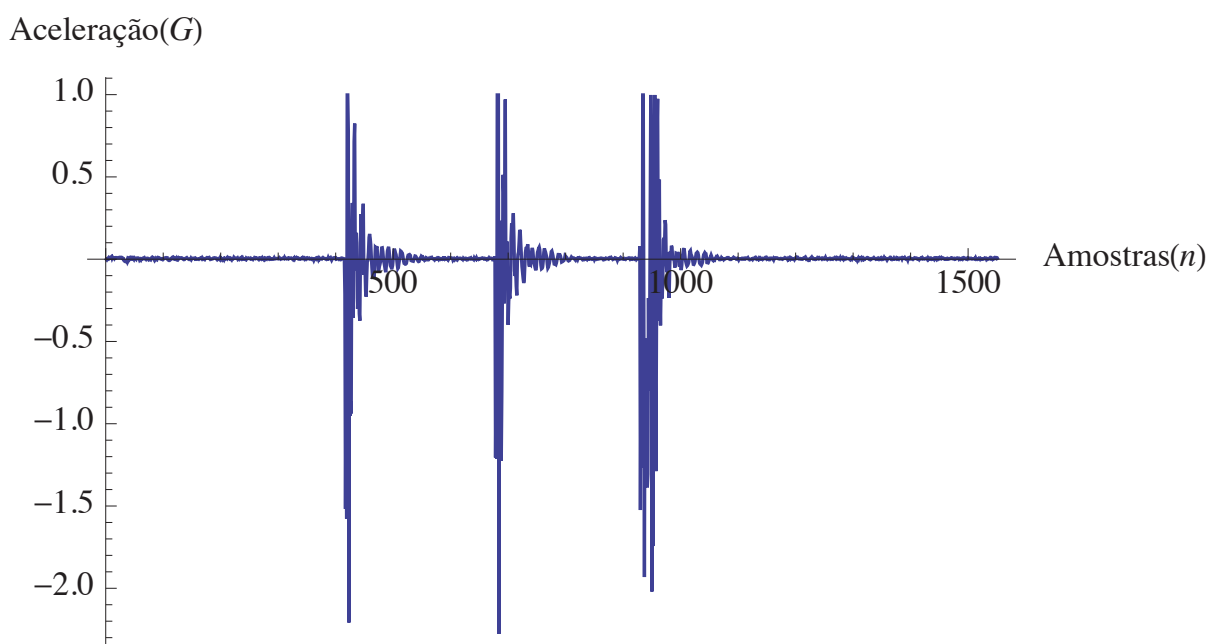
Figura 17: Montagem Inicial de Teste do Sensor



Fonte: do Autor.

Plotando-se os primeiros dados extraídos do sensor – apenas em um eixo por vez - através de comunicação serial, pode-se visualizar o gráfico da Figura 18 plotado, utilizando-se o software Mathematica. A excitação utilizada para a leitura foi composta de três impactos leves na bancada, onde o acelerômetro estava instalado.

Figura 18: Análise da Resposta do Acelerômetro



Fonte: do Autor.

No eixo vertical, pode-se visualizar a escala ajustada para aceleração no eixo Z, já normalizada para valores em G. No eixo horizontal pode-se ver o número de amostras coletadas, ainda sem base temporal de referência.

5.4 Escolha e Desenvolvimento do Método de Comunicação

Um dos principais requisitos é a necessidade de coletar dados muito especializados em locais de difícil acesso e levá-los até ambientes computacionais de análise. Isso significa levar volumes grandes de dados lidos em locais remotos até computadores instalados em laboratório, sem a necessidade de que o pesquisador instale-se no local da estrutura a ser analisada para coletar os dados. Além disso, o acompanhamento desses dados deve ser feito de maneira contínua e

estendida, possibilitando a aplicação de diversos procedimentos numéricos para a análise da estrutura. Assim, as possibilidades de escolha de métodos de comunicação tornam-se escassas. No item 5.4.1 listam-se algumas propriedades importantes à escolha do método de comunicação.

5.4.1 Propriedades Necessárias ao método de Comunicação

As estruturas, nas quais se espera aplicar o SMV , estão em locais externos e expostos à ação do tempo. Ademais, o acesso a essas localidades é complicado tanto pela distância como pela impossibilidade física de que uma pessoa esteja regularmente coletando dados. Logo, seguem-se algumas características importantes ao projeto do método de comunicação.

5.4.1.1 Acesso Remoto

Devido às exigências físicas dos locais de instalação – normalmente na parte inferior de estruturas de obras de arte especiais - o SMV deve ser projetado para que exija acesso físico à parte da estrutura em que é aplicado apenas durante a sua montagem e desmontagem, reduzindo assim o custo monetário e o risco de acidentes. Assim, deseja-se um equipamento que possua capacidade de transmitir seus dados remotamente.

5.4.1.2 Coleta de Dados sem Fios

Caso haja impossibilidade de estabelecer acesso remoto à aplicação, a coleta de dados deve ser feita da forma mais fácil e rápida possível. Caso a coleta seja feita *in loco*, não é interessante que o usuário precise conectar cabos ou discos de armazenamento ao equipamento, uma vez que ele pode estar em locais isolados ou de difícil acesso. Com tal característica, a coleta de dados sem fio torna-se uma importante vantagem se comparada aos sistemas tradicionais de monitoramento.

5.4.1.3 Velocidade de Comunicação

Como o SMV deve efetuar leituras de acelerações a uma taxa relativamente alta, o método de comunicação deve suportar, no mínimo, uma taxa de transmissão compatível com o envio de todas as leituras do equipamento, sem perdas de dados por atrasos na comunicação. Levando-se em consideração que a taxa de amostragem do acelerômetro deverá ser de 140 amostras por segundo, como visto no item 5.2.1.5, pode-se calcular a taxa de transmissão mínima necessária. A quantidade de dados em cada amostra deverá ser a soma dos *bytes* de dados de tempo com os *bytes* de dados de aceleração. Desse modo, o número de *bytes* de cada amostra é calculado e é dado pela Equação 1, na qual N_b é o número de *bytes* total, N_{bt} é o número de *bytes* para informação de tempo e N_{bd} é o número de *bytes* de dados. Dessa maneira, conta-se um *byte* para o ano da amostra, um para o mês, um para o dia, um para a hora, um para o minuto, um para o segundo e um para a amostra sequencial no segundo, o que resulta em 7 *bytes*. Já para a aceleração, são dois *bytes* para cada eixo dimensional, resultando em seis *bytes* totais.

$$N_b = N_{bt} + N_{bd} = 7 + 6 = 13B \quad (1)$$

Na Equação 2 calcula-se a taxa de transmissão mínima R através da taxa de amostragem f_s e do número de bytes por amostra N_b , resultando em uma taxa de transmissão de 14560 *bits* por segundo para cada acelerômetro a ser instalado.

$$R = f_s \cdot N_b = 140 \cdot 13 = 1820Bps = 14560bps \quad (2)$$

5.4.1.4 Possibilidade de Comunicação com Computador

O método de comunicação deve prever a entrega de dados em um computador, já que as informações serão analisadas em ambiente numérico computacional, possibilitando inclusive a plotagem de dados e sua armazenagem. Somado a isso, o manuseio dos pacotes de transmissão deve ser feito de maneira

simples, sem que haja necessidade de grande conhecimento de programação por parte do operador.

5.4.1.5 Comunicação em Tempo Real

A pesquisa de Hu (2013) traz recomendações com relação a novos sistemas de aquisição de dados. Uma delas é a análise em tempo real dos dados de vibração, que se utilizados em conjunção com outros equipamentos de monitoramento podem trazer facilidades de pesquisa interessantes ao campo da Análise Modal Operacional. Logo, é interessante que o método de comunicação suporte esse tipo de monitoramento.

5.4.2 Métodos de Comunicação Passíveis de Utilização

Os processos de desenvolvimento de técnicas de comunicação utilizados em diversos tipos de aplicação estão em processo de convergência para três métodos principais: a comunicação por cabos, a comunicação por linhas de potência e a comunicação por radiofrequência (RAMOS, 2013). Nesses métodos h diferentes configurações que podem ser utilizadas no projeto do SMV. Observando-se as propriedades enumeradas no item 5.4.1, torna-se possível a escolha do método dentre o conjunto de opções disponíveis. Assim, neste item, serão listados os métodos passíveis de utilização encontrados na literatura.

5.4.2.1 Comunicação através de Cabos

A comunicação através de cabos é uma das primeiras opções quando se pensa na transmissão de dados, haja vista que os circuitos necessários para esse tipo de tráfego são mais simples. Atualmente é uma das técnicas mais utilizadas para comunicação em ambiente industrial, pois existem opções com grande imunidade a ruído, como por exemplo, os pares trançados e a fibra ótica (SOLOMAN, 2012). Outro ponto a destacar é a possibilidade de altas taxas de transferência de dados. Todavia, essa técnica é aplicável somente para pequenas distâncias, já que o custo para implementação desse tipo de rede é alto e apresenta

pouca flexibilidade. Além disso, impossibilita a aplicação de monitoramento em longas distâncias.

5.4.2.2 Comunicação através de Linhas de Potência

Esse tipo de tecnologia de comunicação vem sofrendo um incremento considerável na sua utilização ao longo dos últimos anos (RAMOS, 2013). Consiste em utilizar a rede elétrica de distribuição como caminho físico para a transferência de dados, inserindo portadoras de alta frequência junto ao sinal alternado da rede elétrica. Entretanto, os circuitos de modulação e demodulação são caros e consomem elevadas quantidades de energia, além da exigência de autorização da concessionária de energia para a utilização dessa tecnologia. Outro fator preponderante e que impede sua utilização é que nem sempre a estrutura a ser instrumentada possui acesso à rede de distribuição de energia elétrica.

5.4.2.3 Comunicação através de *link* de Radiofrequência Dedicado

Os métodos de comunicação através de *links* de radiofrequência dedicados são utilizados nos casos em que a comunicação através de cabos é dificultada ou apresenta um custo de aplicação mais alto. Porém, a aplicação da comunicação não é totalmente livre, porque as frequências de operação devem obedecer à determinação de canais específicos pré-determinados pelas diversas entidades reguladoras de telecomunicações ao redor do mundo (RAPPAPORT, 2009). Isso acontece para que não haja interferência entre os diversos equipamentos que se comunicam através de ondas eletromagnéticas. Dessa maneira, a oferta de bandas de frequência passíveis para utilização oficial se resume à banda ISM (*Industrial Scientific and Medical*), reduzindo as possibilidades de equipamentos disponíveis para a construção de links de comunicação dedicados. Ainda assim, existem importantes alternativas que utilizam protocolos de livre utilização, como as redes *wireless* 802.11, *bluetooth* e Zigbee (RAMOS, 2013). Entretanto, um fator comum a todas é o alcance limitado, não permitindo comunicações entre pontos com distâncias superiores a 10km. Isso impossibilita a sua aplicação em locais com

distância superior a essa, entre o ponto de monitoramento da OAE e o computador em que são processadas as informações.

5.4.2.4 Comunicação através da Internet

O aumento das facilidades de acesso à internet vem impulsionando sua utilização em larga escala para o monitoramento de dados. Atualmente, a maioria dos processos e produtos possuem dispositivos eletrônicos interconectados através da rede mundial de computadores, lançando trilhões de *bytes* de dados a todo momento na internet (REGALADO, 2014). Sendo assim um novo fenômeno chamado IoT (*Internet of Things*) vem ganhando espaço entre as instituições de pesquisa e indústrias ao redor do mundo, trazendo a cada dia mais dispositivos com capacidade de se conectar à rede mundial de computadores, sendo denominadas como “coisas”. As vantagens desse tipo de integração com a rede são inegáveis, pois a internet pode se expandir através de diversos métodos de comunicação (IERA *et al.*, 2010). Dessa maneira, a conexão de sensores, através de uma rede baseada em internet, torna possível que os dados coletados cheguem a qualquer lugar no mundo com um pequeno atraso de alguns milissegundos, podendo ser considerado um sistema de leitura em tempo real. Além disso, toda comunicação através da rede mundial de computadores é padronizada através de protocolos bem estruturados, como o TCP (*Transmission Control Protocol*) que é responsável pelo controle e qualidade de comunicação e o IP (*Internet Protocol*), responsável pelo endereçamento nas redes (FOROUZAN, 2010).

5.4.3 Método de Comunicação Escolhido

A possibilidade de acesso remoto, coleta de dados sem fio, velocidade de comunicação alta, conexão direta com computador e comunicação em tempo real são requisitos essenciais ao projeto do SMV. Assim, por cumprir com todas as possibilidades listadas no item 5.4.1, a comunicação através da internet é escolhida para a transmissão de dados do SMV. Por utilizar o protocolo TCP/IP, a implementação da comunicação, através de rede LAN (*Local Area Network*) ou WLAN (*Wireless Local Area Network*), possibilita ainda que o número de

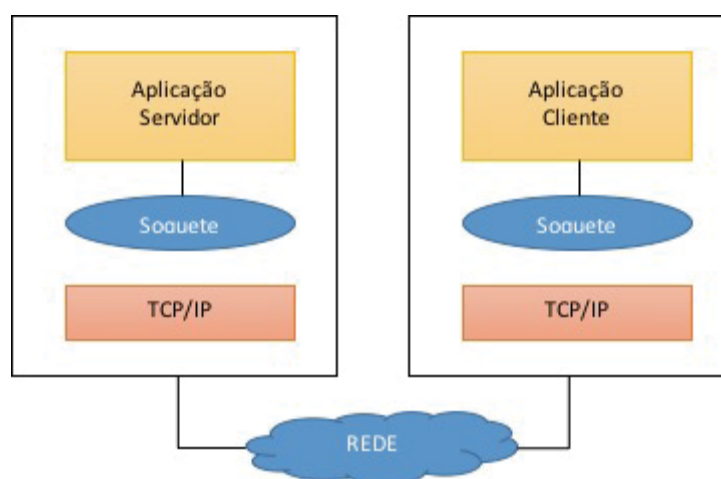
acelerômetros utilizados ao instrumentar uma OAE seja limitado apenas pelo valor físico máximo de endereçamento do *hub* responsável pela rede e por sua disponibilidade de banda de dados para comunicação. Outro fator preponderante para escolha dessa tecnologia é a flexibilidade desse tipo de comunicação. Atualmente, o acesso à internet pode ser feito através de redes de telefonia fixa, redes de TV a cabo, serviço de dados através de linhas de distribuição de energia elétrica, rede de telefonia móvel, dentre outros. Logo, a cobertura através desses diversos modos de transmissão faz com que a maioria dos locais conte com rede de internet atualmente. Ainda assim, para casos em que não haja cobertura de rede de dados, a simples utilização de uma rede WLAN permite que o pesquisador colete os dados periodicamente, sem haver necessidade de conectar cabos ou dispositivos de memória, bastando apenas que ele conecte seu *notebook* a rede WLAN do equipamento enquanto visita o local da pesquisa. Finalmente, a escolha desse tipo de tecnologia segue a crescente tendência de criação de aplicativos IoT, que nada mais é do que a conexão de aplicativos antes isolados da rede – como por exemplo, sensores, equipamentos, sistemas, atuadores e mesmo telefones móveis – à internet (IERA, FLOERKEMEIER, *et al.*, 2010). Isso somente é possível devido aos recentes desenvolvimentos de tecnologia de conexão à rede mais baratos (REGALADO, 2014).

5.4.4 Desenvolvimento do Método de Comunicação

Tendo em vista que o método de comunicação escolhido é a internet, desenvolveu-se a ferramenta de comunicação utilizada no projeto. Como o perfil de aplicação de comunicação do dispositivo é o envio de dados do acelerômetro continuamente através da internet – sem que haja necessidade de maiores detalhes de comunicação entre o sensor e o equipamento preparado para a recepção de dados-utilizou-se uma configuração servidor-cliente. Nessa metodologia de transmissão de dados, o servidor é um dispositivo capaz de compartilhar dados com outro dispositivo, nomeado de cliente (DE SOUSA, 2004). Assim, pode-se nomear o SMV instalado na OAE como o servidor de dados e o equipamento que efetuará o acesso a esses dados remotos como cliente.

Por outro lado, como a comunicação através da internet sempre passa através de camadas de enlace TCP/IP, os dados enviados através da rede mundial de computadores deverão ser direcionados seguindo esse protocolo. Dentre as diversas camadas existentes nesse protocolo complexo, a camada de aplicativo é responsável pela compatibilidade entre diversos sistemas que utilizam a internet – como, por exemplo, Macintosh, Windows e Unix – e também entre os diversos aplicativos desenvolvidos diretamente pelos usuários (SCRIMGER, 2003). Dentro dessa camada existem os soquetes, que são definidos como pontos finais de comunicação, responsáveis por estabelecer uma conexão única entre o servidor e o cliente, usando-se o número de IP em que o servidor conecta-se à rede e à porta definida para comunicação, não importando detalhes mais específicos da rede em que se localizam o servidor e o cliente (FASANO, 2000). Assim, usam-se os serviços de soquete disponíveis nessa camada do protocolo TCP/IP para que se possa estabelecer uma conexão direta entre o servidor – no caso, o SMV - e o cliente, que pode ser um computador pessoal. A Figura 19 demonstra o modo mais simples de conexão através de soquete.

Figura 19: Enlace de Comunicação através de Soquete



Fonte: Adaptado de Fasano (2000).

5.4.4.1 Conexão do *hardware* com a Rede TCP/IP

Embora a comunicação através da internet traga inúmeras vantagens, o acesso a sistemas com microprocessadores embarcados não é propriamente facilitado, pois a interface TCP/IP depende de diversas camadas físicas intrincadas – como o hardware de comunicação isolado, chamado de PHY (*Physical Layer*) – e complexas camadas de estruturas de software que não estão inclusas na maioria dos dispositivos encontrados comercialmente (MOKARZEL, 2004). Entretanto, existe no mercado uma variedade de dispositivos que se propõem a facilitar o desenvolvimento de aplicações microprocessadas para Internet, uma vez que já possuem o *hardware* e o *software* necessários para interligação com redes TCP/IP e se comunicam com protocolos mais simples, como os microcontroladores encontrados no mercado. Entre as opções disponíveis pode-se destacar o XPort, da empresa Lantronix (LANTRONIX, 2015), o W3100A da Linchip (MOKARZEL, 2004), o W5100 da Wiznet (WIZNET, 2015) e o EZ Web Lynx, da empresa CCS (LYNX, 2015), todos com a característica comum de efetuar a interface com o sistema microprocessado através de um canal serial, possibilitando a conexão com o microcontrolador do SMV. Assim, como todos possuem características bastante semelhantes, a escolha se deu com base na disponibilidade de componentes. Escolheu-se o dispositivo EZ Web Lynx para efetuar a interface do *hardware* do SMV com a rede TCP/IP. Com base nas definições do item 5.4.1.3, estabeleceu-se o *baud rate* da comunicação serial em 57600bps.

5.4.4.2 Coleta de Dados da Rede TCP/IP

Com os dados disponíveis na rede de internet, resta ainda a coleta dessas informações e também sua organização, de maneira que possa ser utilizada por pesquisadores que necessitem usar os dados de aceleração do SMV em suas pesquisas. Evidentemente, esses dados serão utilizados em ambientes computacionais e a disponibilização diretamente nesse tipo de sistema simplifica muito o trabalho do pesquisador. Logo, cabe o desenvolvimento de uma ferramenta

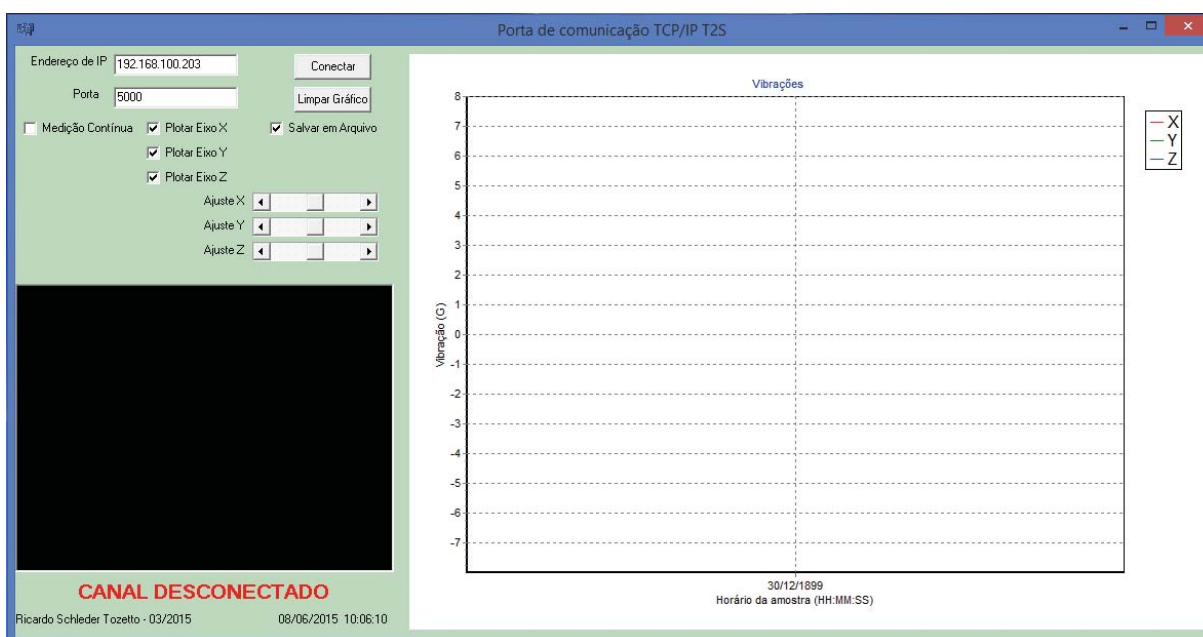
de *software* que colete essas informações e as disponibilize de maneira eficiente aos estudiosos da área de dinâmica de estruturas.

Segundo Deitel (2006) a utilização de computadores sofreu uma importante escalada com a criação das linguagens de programação de alto nível. Sendo assim, ferramentas importantes passaram a ser criadas facilmente, sem que haja a necessidade de um especialista no *hardware* do computador para que seja feita a programação do código-fonte das ferramentas. Dentre essas linguagens, pode-se destacar a linguagem C++, Java e Delphi, sendo que todas elas possuem programação orientada a objetos, permitindo rapidez no desenvolvimento de aplicativos. Dessa maneira, torna-se interessante a utilização desse tipo de linguagem de programação para a construção de um aplicativo que seja capaz de coletar as informações do SMV e organizá-las em ambiente computacional.

Por sua vez, o C++ é linguagem de programação originada através do estabelecimento de classes na linguagem C (MEYERS, 2011). Logo, possui uma semelhança muito forte com essa linguagem de programação e é o caminho natural para programadores C (ALVES, 2007) que desejam construir ferramentas de *software* em sistemas operacionais, como é o caso do autor do presente trabalho. Assim, essa linguagem de programação de alto nível é escolhida como ferramenta para a construção do aplicativo necessário para a coleta de dados do SMV.

A partir dessa escolha, foi construída uma ferramenta de comunicação através da rede de internet que tem a capacidade de receber pacotes de informação do equipamento SMV através dos soquetes disponíveis na camada de aplicativo do protocolo TCP/IP, seguindo a arquitetura de enlace servidor-cliente. Posteriormente, esses dados são processados com relação a seu conteúdo, decodificados e podem ser plotados em um gráfico disponível na própria ferramenta, além de serem salvos em um arquivo de texto para processamento numérico externo. A Figura 20 mostra o *design* do aplicativo criado para realizar a tarefa de coletar os dados do SMV e salvá-los em arquivo. O nome do aplicativo criado para tal função é porta.exe.

Figura 20: Design do Aplicativo porta.exe



Fonte: do autor.

5.5 Testes de Funcionamento do Método de Comunicação

Com o sistema de comunicação estabelecido e funcional, foi utilizada uma rede de comunicação do tipo LAN no laboratório para a verificação de funcionamento dos componentes aos ajustes de programa necessários. Com base no mesmo *hardware* montado em *proto-board*, utilizado no item 5.3, executou-se a verificação das informações transmitidas através da rede interna, obtendo-se sucesso na transmissão e na integridade de informações. Porém, ainda restava o desenvolvimento da base de tempo no SMV, para que o mesmo oferecesse amostras com informações temporais de leitura.

5.5.1 Dados de Informação Temporal

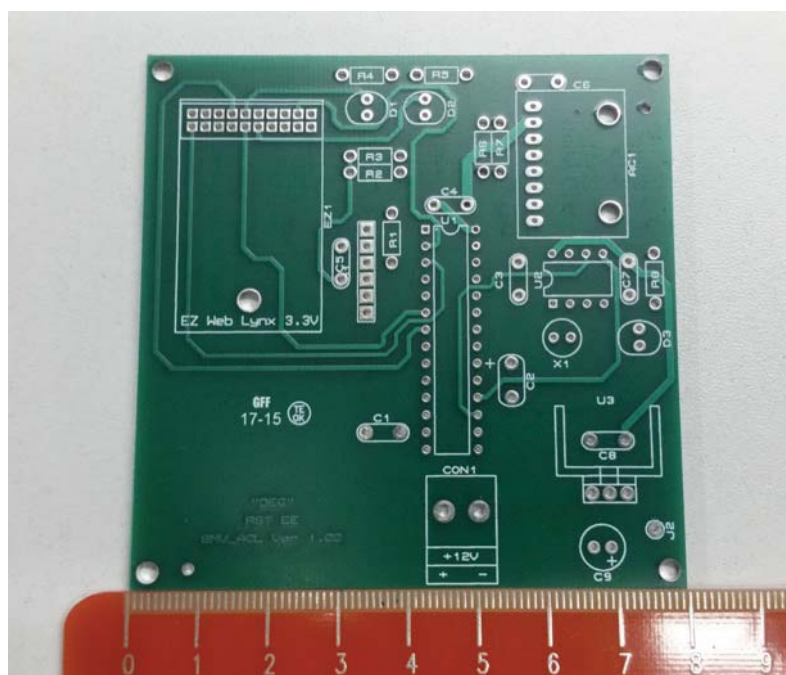
Tendo em vista a necessidade de identificar o momento em que as amostras ocorrem, cabe o desenvolvimento de algum método que possa oferecer esse tipo de informação de maneira confiável. Para executar essa tarefa, a alternativa mais simples seria associar o momento da chegada da amostra no aplicativo “porta.exe” com o momento de leitura da amostra no SMV, que é praticamente o mesmo – separado por algumas dezenas de milissegundos – da leitura no dispositivo,

acessando os registros de tempo do computador em que está sendo executado o processo de recepção dos dados. No entanto, devido ao grande número de amostras que o dispositivo é capaz de fornecer a cada segundo, os pacotes de dados chegam até o computador em blocos, impedindo assim a correta divisão temporal. Para contornar esse problema, utilizou-se um dispositivo do tipo *Real Time Clock* (RTC), que fornece a informação de tempo ao microcontrolador do SMV. Assim, o sistema ordena as amostras que consegue efetuar por segundo com base no tempo do RTC, transmitindo essa informação de sequência ao aplicativo porta.exe, que por sua vez calcula o intervalo de tempo entre cada uma delas e soma ao instante de tempo do primeiro dado, fornecendo a base temporal para cada amostra.

5.5.2 Desenvolvimento e Montagem da PCI

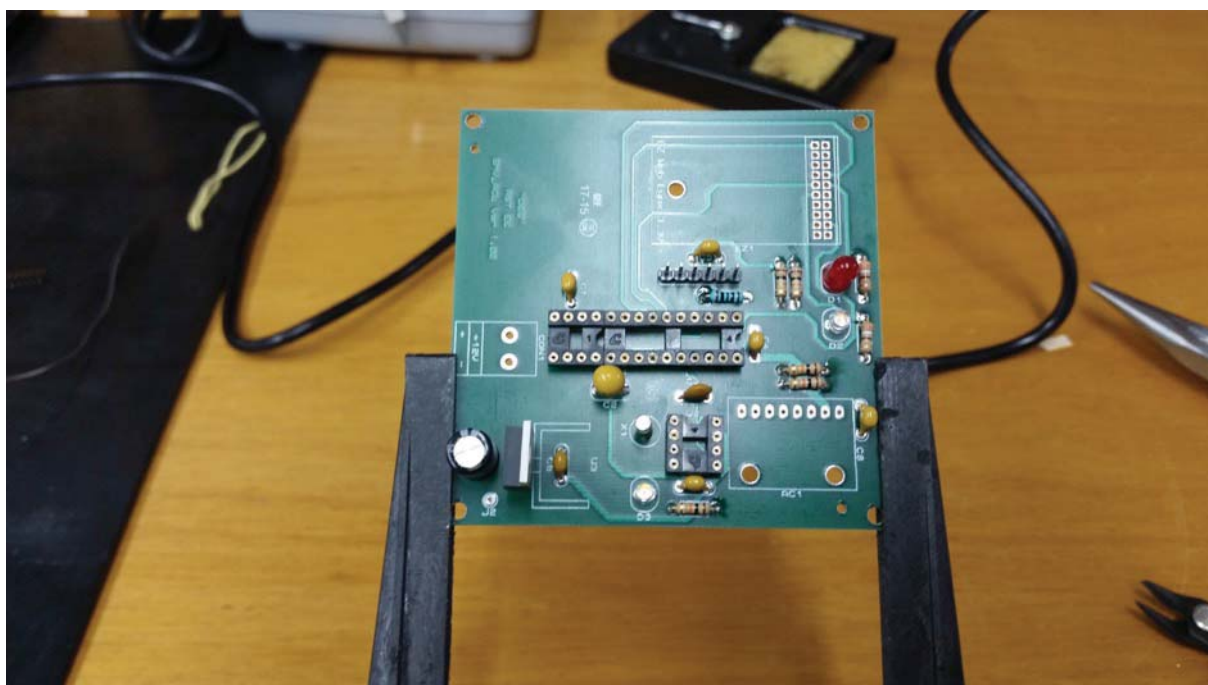
Como os testes iniciais com o sistema na configuração proposta mostraram-se satisfatórios, foi possível desenvolver o primeiro protótipo do dispositivo. Com base no esquema elétrico proveniente dos testes com *proto-board*, projetou-se a PCI (Placa de Circuito Impresso) através do *software* Proteus. Já pensando na instalação física do equipamento em OAEs, foi escolhida como invólucro uma caixa metálica de passagem, com vedação contra umidade e gases, além de suporte para parafusos de fixação. Assim, a PCI já foi projetada para montagem nesse modelo específico de caixa, facilitando a montagem no invólucro. Após aprovação, enviou-se o projeto da PCI para produção em empresa especializada. Posteriormente, com a chegada da PCI protótipo, efetuou-se a montagem da placa com os componentes de projeto, como se pode ver nas Figura 21, Figura 22 e Figura 23.

Figura 21: PCI sem os Componentes



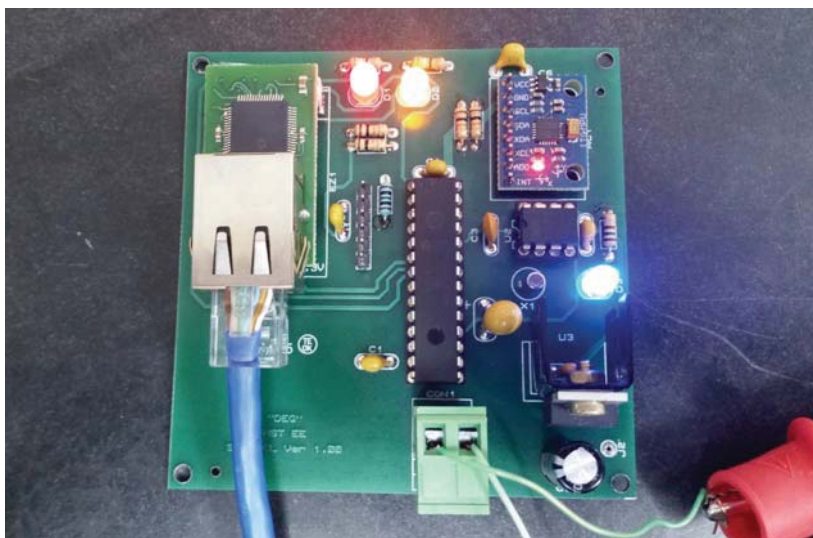
Fonte: do autor.

Figura 22: Processo de Montagem da PCI



Fonte: do autor.

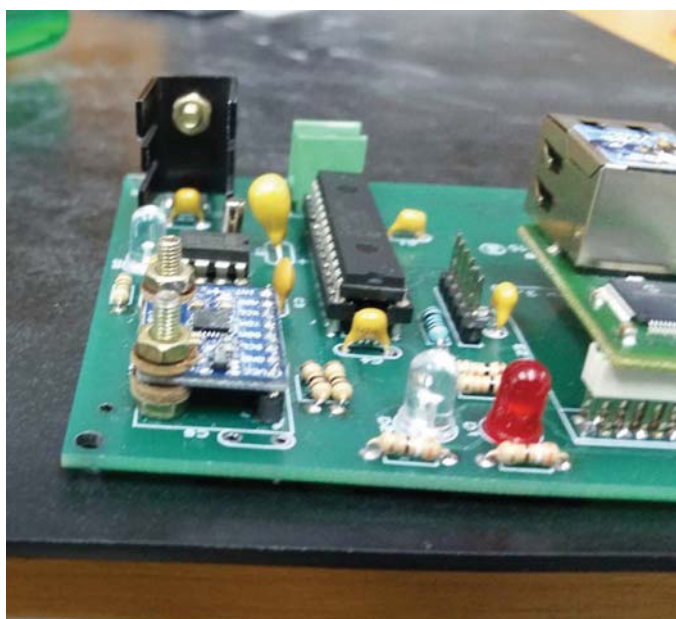
Figura 23: PCI Montada



Fonte: do autor.

Cabe ressaltar que após os primeiros testes de funcionamento, o acelerômetro foi instalado na PCI utilizando-se de conexão mecânica firme, usando parafusos M3X16mm, conforme a Figura 24. Nessa etapa, redobrou-se a atenção com relação ao alinhamento de montagem do acelerômetro com a placa, com o objetivo de manter o conjunto todo alinhado para posterior teste e análise das acelerações em cada direção e sentido.

Figura 24: Montagem Mecânica do Acelerômetro



Fonte: do autor.

Finalmente o dispositivo foi montado no invólucro metálico, respeitando sempre os alinhamentos dos eixos de medição, conforme a Figura 25.

Figura 25: SMV já Montado no Invólucro



Fonte: do autor.

5.5.3 Resultados dos Testes de Funcionamento

Ao final dos procedimentos de montagem, o sistema passou por ajuste de programa para que executasse as aquisições através de uma frequência de amostragem fixa. Após isso, atingiu-se o valor de 303 amostras por segundo, sendo que cada amostra possui dados de medição com 16 *bits* de precisão nos três eixos de medição, com valor de fundo de escala de $\pm 8G$.

5.6 Calibração em Laboratório

Com o dispositivo SMV já montado no invólucro e com o sistema de comunicação funcional, passou-se à etapa de verificação dos valores medidos através da comparação com um instrumento padrão. O objetivo desses testes funcionais foi analisar a acurácia dos valores de aceleração lidos pelo SMV, analisando as frequências captadas pelo sistema através da FFT (*Fast Fourier Transform*) do sinal e também as amplitudes lidas pelo sistema com relação às mostradas pelo equipamento de referência. Dessa maneira, já que é interessante que o experimento decorra com excitações conhecidas e controladas, utiliza-se o

shaker disponível no LESE-UPF (Laboratório de Estruturas), que consiste em um oscilador mecânico com frequência controlada através da alimentação do motor, regulada por um conversor de frequência. Assim, pode-se produzir uma oscilação horizontal com frequência controlada com o equipamento. Como comentado no item 4.2.1, os testes foram realizados em paralelo com a utilização do sistema de aquisição de dados da National Instruments modelo CDAQ-9188XT, munido com um módulo de leitura diferencial analógica de sensores NI 9234 e um acelerômetro triaxial modelo 356A01 da PCB Piezotronics, com laudo de calibração para cada eixo de medição de aceleração. O acesso aos dados foi realizado através da escrita de um programa em ambiente LabVIEW utilizando a função – chamada no ambiente de programação LabVIEW de sub-VI – DAQAssistant, que permitia a visualização dos dados em tempo real e também exportar os dados de aceleração para planilhas do programa Microsoft Excel, onde os dados podem ser tratados para posterior avaliação.

5.6.1 Preparação do Ensaio

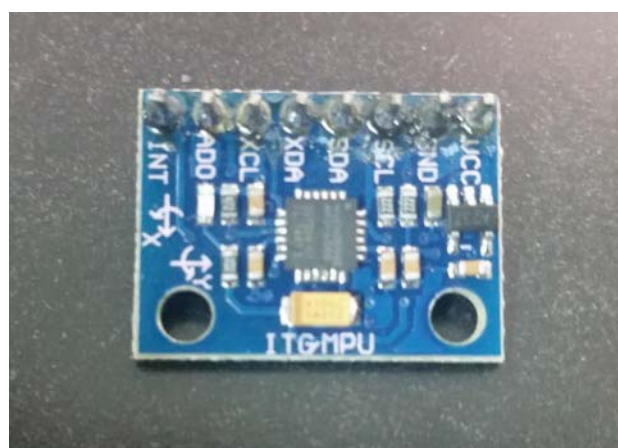
Inicialmente foram tomados alguns cuidados com a instalação dos sensores na plataforma vibratória do *shaker*. Como a plataforma oscila – teoricamente - em apenas uma direção, opta-se por alinhar o SMV e o acelerômetro 356A01 na mesma direção de vibração. Para isso, tanto o acelerômetro do SMV quanto o da PCB Piezotronics possuem em seu corpo o desenho dos eixos de orientação para medição, conforme mostram as Figura 26 e Figura 27.

Figura 26: Orientação do Acelerômetro da PCB Piezotronics



Fonte: do autor.

Figura 27: Orientação do Acelerômetro do SMV



Fonte: do autor.

Por facilidade de instalação, ambos eixos Y dos dois acelerômetros são alinhados à plataforma vibratória. Urge lembrar que, durante a montagem do SMV no invólucro, foi tomado o cuidado de manter o alinhamento do acelerômetro com a caixa metálica, facilitando assim a sua instalação. Outro cuidado importante tomado durante a preparação foi a instalação dos dois sensores utilizando-se de fita dupla-

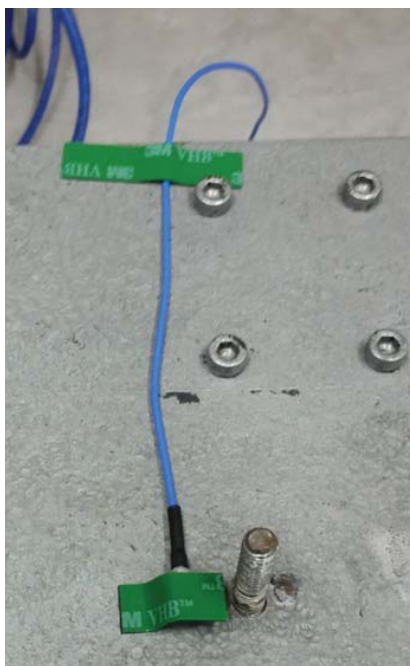
face, garantindo assim que não haveria deslocamento relativo entre os dois sensores e a plataforma oscilatória do *shaker*, conforme mostram as Figura 28, Figura 29 e Figura 30.

Figura 28: Fixação do SMV no *shaker* através de Dupla-face

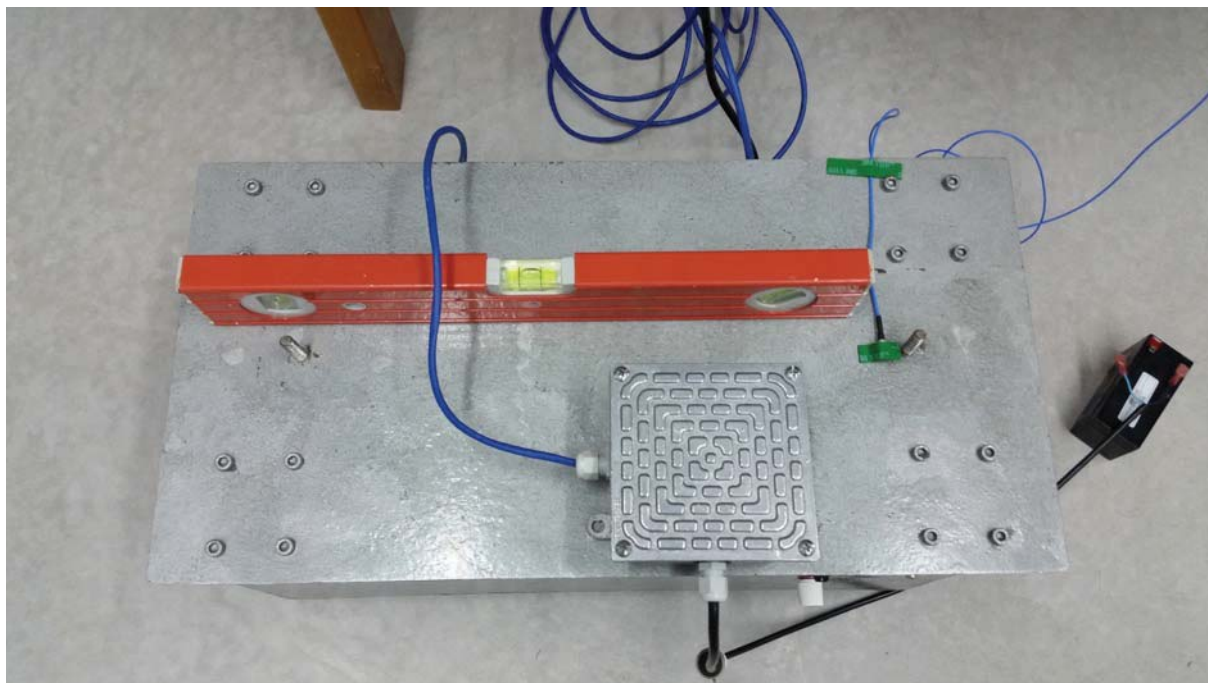


Fonte: do autor.

Figura 29: Fixação do Acelerômetro da PCB Piezotronics no *shaker*

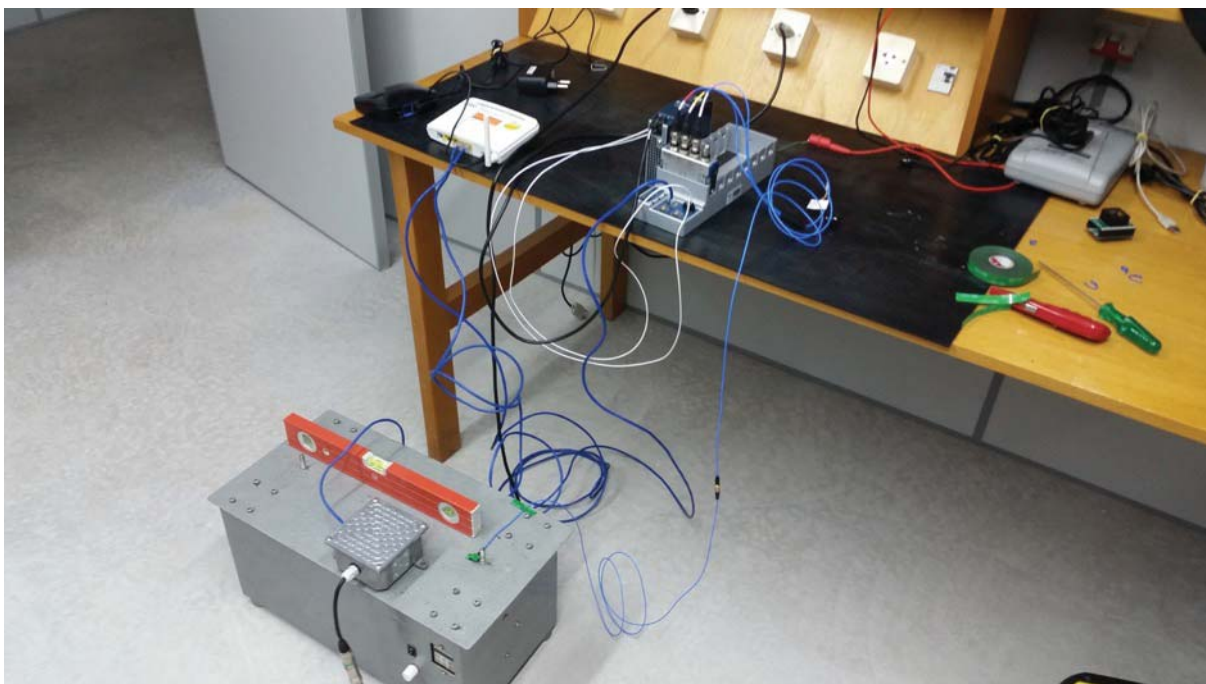


Fonte: do autor.

Figura 30: Fixação dos Dois Sensores no *shaker*

Fonte: do autor.

No caso do acelerômetro da PCB Piezotronics, devido ao seu pequeno tamanho, instalou-se fita dupla-face tanto na face inferior como na superior do acelerômetro, garantindo assim sua fixação. Após a fixação dos dois acelerômetros na plataforma do *shaker*, ele foi nivelado no piso – evitando assim oscilações relativas entre o *shaker* e o chão – e garantindo assim o alinhamento relativo dos eixos de medição do acelerômetro com o eixo horizontal e, evitando a leitura de valores residuais de aceleração da gravidade no eixo Y dos sensores, conforme mostra a Figura 31.

Figura 31: Verificação do Nivelamento do *shaker*

Fonte: do autor.

Já com as instalações mecânicas verificadas, realizou-se as montagens elétricas dos dispositivos de medição. No caso do CDAQ-9188XT, há a necessidade da montagem da fonte de alimentação chaveada NI-PS-15, com alimentação em corrente alternada de $220V_{ca}$ e saída $24V_{cc}$ para alimentação do CDAQ-9188XT. Ainda, deve-se montar o módulo de leitura analógica NI 9234 em um dos *slots* do sistema de aquisição de dados e conectar as suas entradas de medição com os cabos de sinal provenientes do acelerômetro da PCB Piezotronics. Além disso, o sistema de aquisição de dados da National Instruments comunica-se com o computador através de uma rede LAN, devendo possuir um *hub* para a conexão com a rede. Por outro lado, o SMV necessita apenas da montagem da alimentação elétrica $12V_{cc}$ - que no caso foi obtida a partir de uma bateria $12V$ - e a conexão com a rede LAN.

Após a montagem elétrica preliminar do conjunto de ensaio, configurou-se a rede LAN e WLAN do laboratório para que o computador responsável pelo ensaio esteja conectado em rede aos dois sistemas. Utilizando os *softwares* porta.exe, de autoria própria, e NIMAX da National Instruments, testa-se o funcionamento dos dois sistemas.

5.6.2 Metodologia do Ensaio de Calibração

Com o sistema de medição da National Instruments e do SMV prontos, passou-se à realização do ensaio propriamente dito. O objetivo é ajustar a frequência do *shaker* em valores pré-definidos - dentro da faixa dinâmica de vibrações que o SMV deve medir - e acionar a aquisição de dados tanto do *software* escrito em ambiente LabVIEW quanto do *software* porta.exe para que ocorram ao mesmo tempo. Assim, ao final existirão dados de aquisição dos dois sistemas realizados ao mesmo tempo, restando ainda a análise numérica dos dados para verificação de valores e posterior averiguação.

Os valores de frequência escolhidos para o teste são de 0 a 15Hz, com intervalos de 2,5Hz entre medições. É importante observar que a duração dos ensaios foi escolhida com base na suficiência de amostras para a realização da Análise de Fourier no *software* Microsoft Excel. Além disso, a taxa de amostragem do sistema de aquisição de dados ficou fixada em 1652 amostras por segundo, enquanto a do SMV foi de 303 amostras por segundo.

Após a aquisição das amostras, os dados foram exportados para o *software* Microsoft Excel, em que foi feita a separação dos dados suficientes para a realização da Análise de Fourier. Posteriormente, foi realizada a Análise de Fourier - na qual se obtém a frequência principal de medição (DUHAMEL; VETTERLI, 1990) - e também a análise gráfica dos dados temporais, na qual se verifica a amplitude e a forma das oscilações medidas.

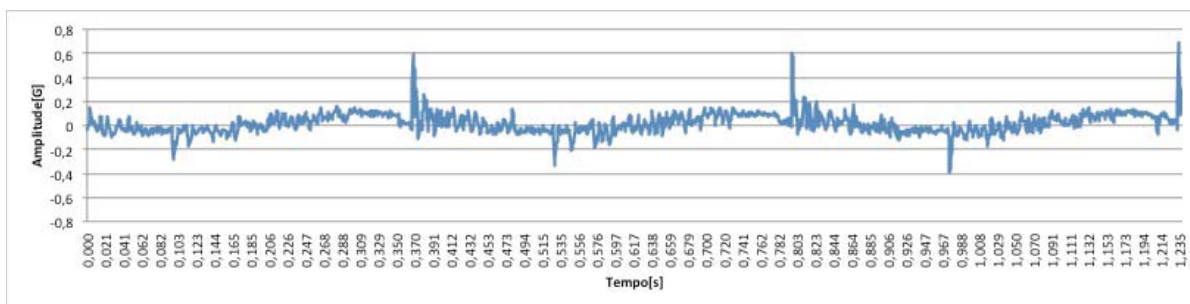
5.6.3 Resultados do Ensaio de Calibração

A realização do ensaio teve o intuito de verificar as respostas no domínio do tempo e da frequência do SMV comparadas com as respostas do sistema de aquisição de dados da National Instruments. Assim, seguem os resultados do equipamento, explicitados na forma gráfica e numérica.

5.6.3.1 Gráficos da Resposta no Domínio do Tempo

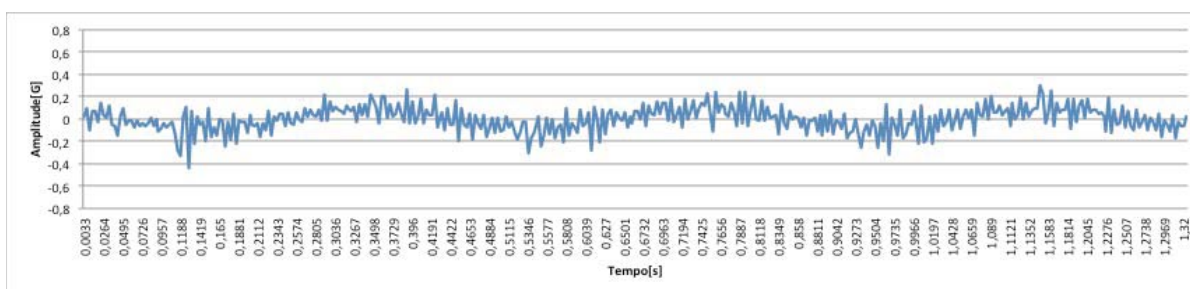
Os segmentos de dados de análise dos dois equipamentos foram plotados no domínio do tempo, com o objetivo de verificar as amplitudes e as formas de onda. Nas Figura 32 a Figura 43 são apresentados os dados obtidos com o SAD (Sistema de Aquisição de Dados) da National Instruments e o SMV. Cabe ressaltar que os intervalos de plotagem foram ajustados para que o gráfico pudesse ser analisado quanto à amplitude e à distorção do sinal, não possuindo qualquer intenção de medição de frequências.

Figura 32: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 2,5Hz com o SAD



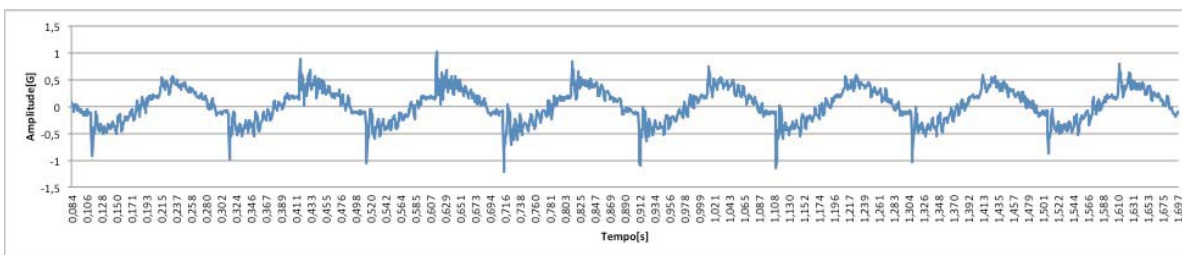
Fonte: do autor.

Figura 33: Resposta temporal detectada durante o ensaio de 2,5Hz com o SMV.



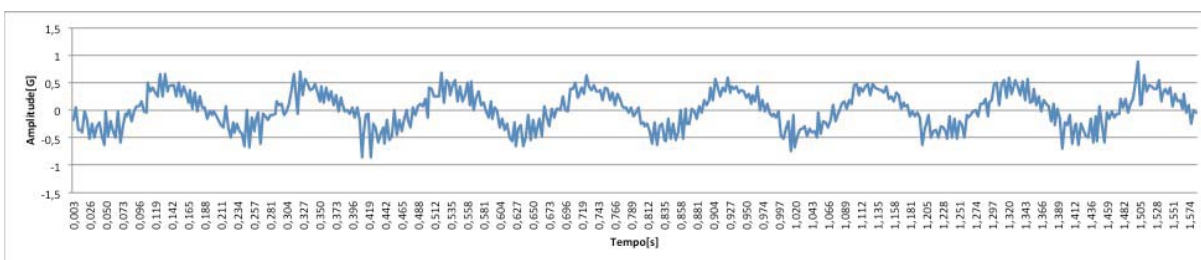
Fonte: do autor.

Figura 34: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 5Hz com o SAD



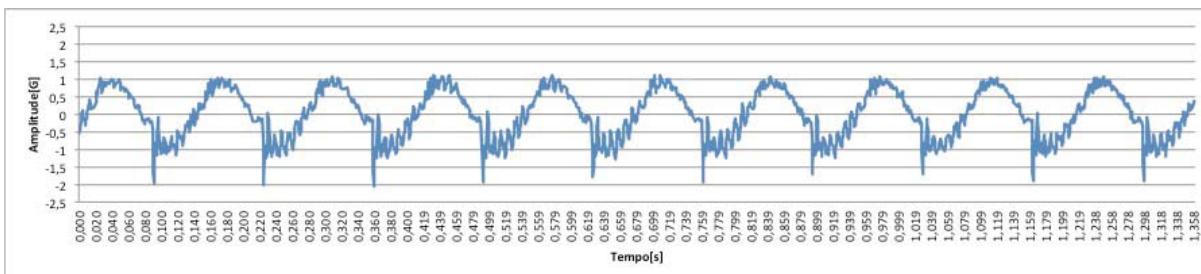
Fonte: do autor.

Figura 35: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 5Hz com o SMV



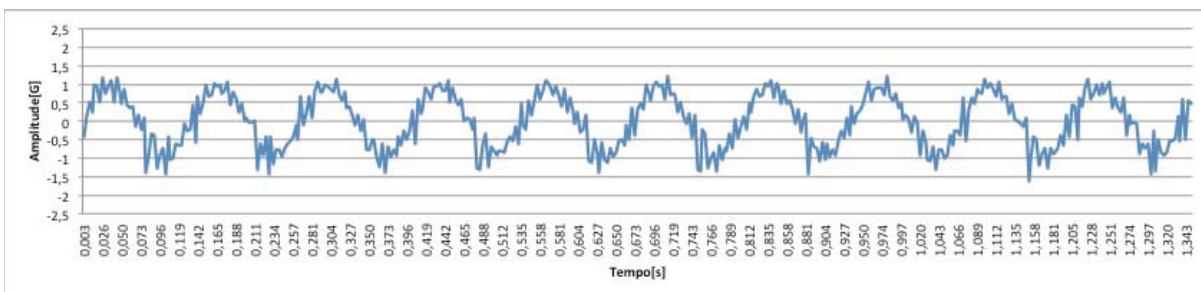
Fonte: do autor.

Figura 36: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 7,5Hz com o SAD



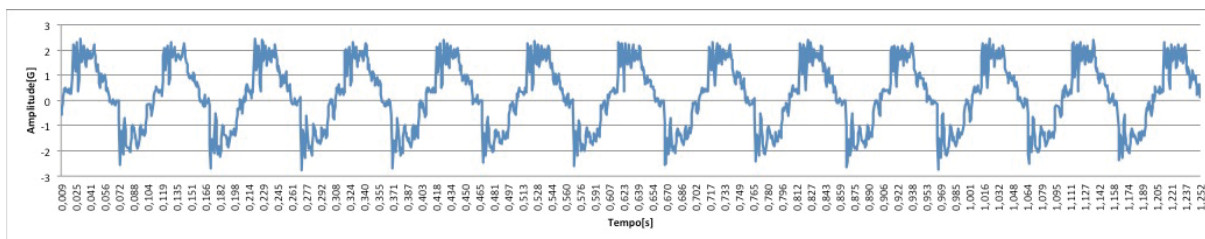
Fonte: do autor.

Figura 37: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 7,5Hz com o SMV



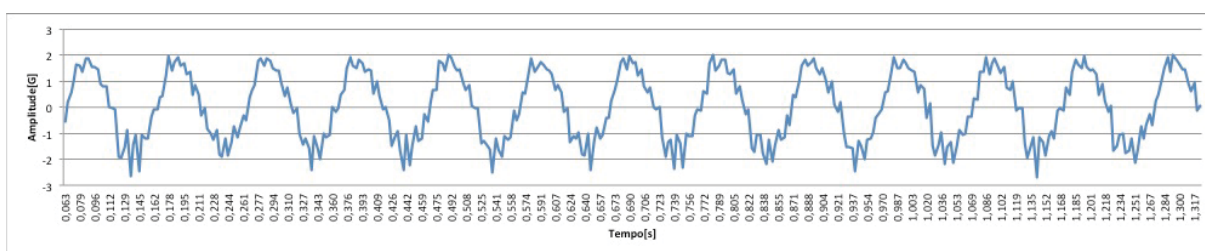
Fonte: do autor.

Figura 38: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 10Hz com o SAD



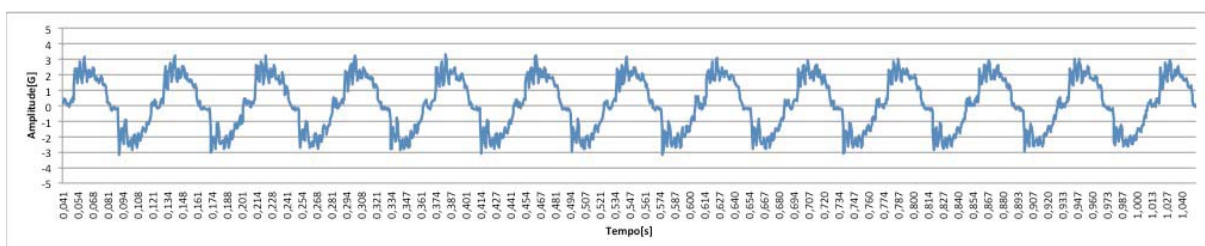
Fonte: do autor.

Figura 39: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 10Hz com o SMV



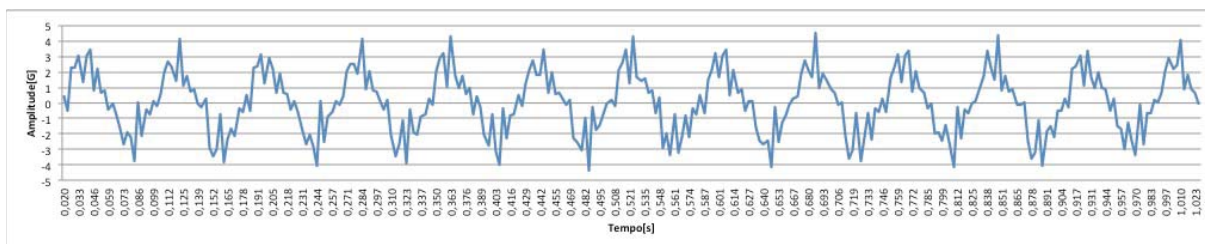
Fonte: do autor.

Figura 40: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 12,5Hz com o SAD



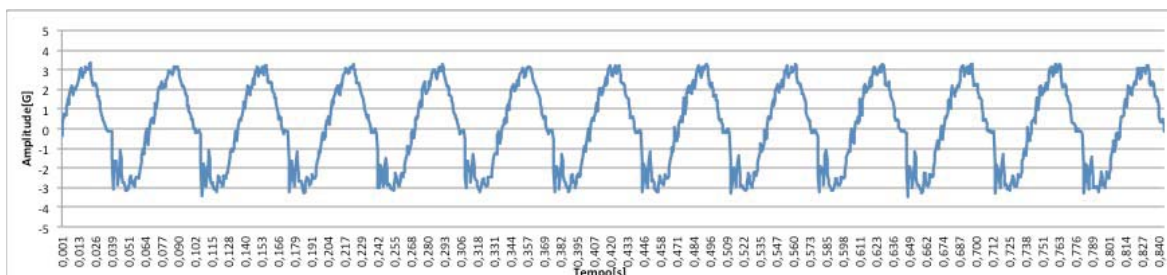
Fonte: do autor.

Figura 41: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 12,5Hz com o SMV



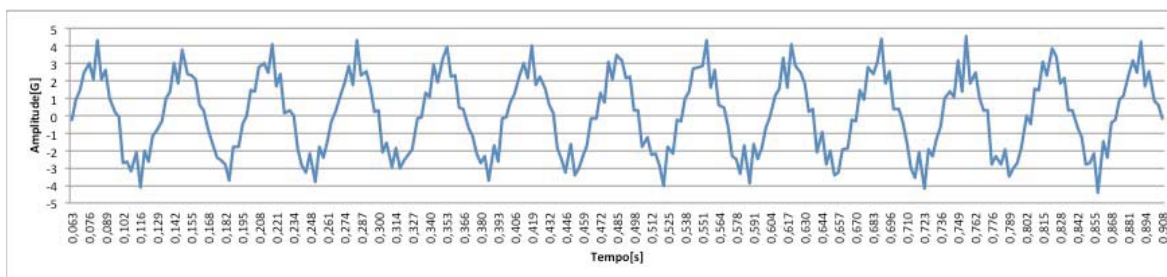
Fonte: do autor.

Figura 42: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 15Hz com o SAD



Fonte: do autor.

Figura 43: Resposta Temporal Detectada durante o Ensaio de 15Hz com o SMV

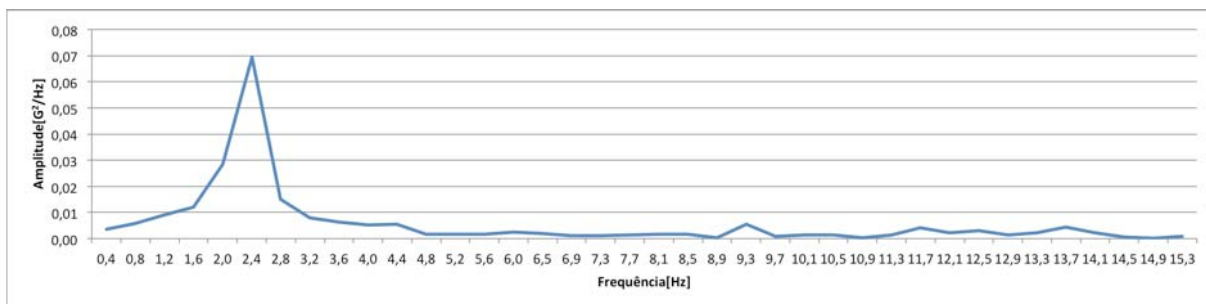


Fonte: do autor.

5.6.3.2 Gráficos da Resposta no Domínio da Frequência

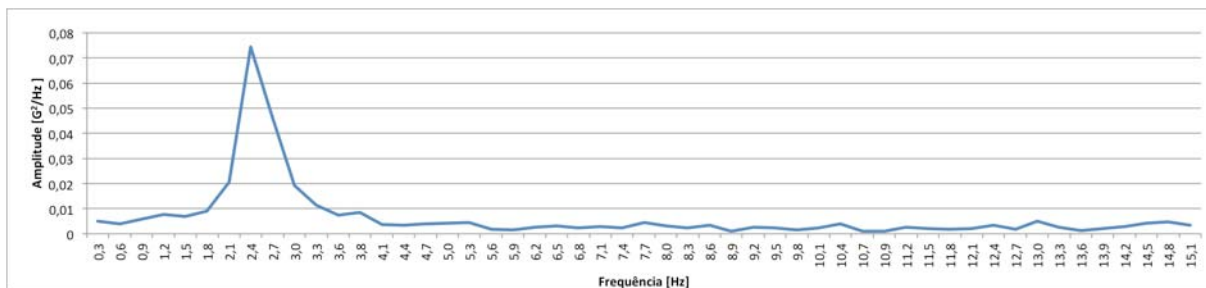
As funções de densidade espectral de potência geradas pela FFT aplicada aos dados dos ensaios com o SAD da National Instruments e o acelerômetro do SMV podem ser visualizadas nas Figura 44 e Figura 55. Cabe observar que os resultados são apresentados sequencialmente, com o objetivo de facilitar a comparação.

Figura 44: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 2,5Hz com SAD



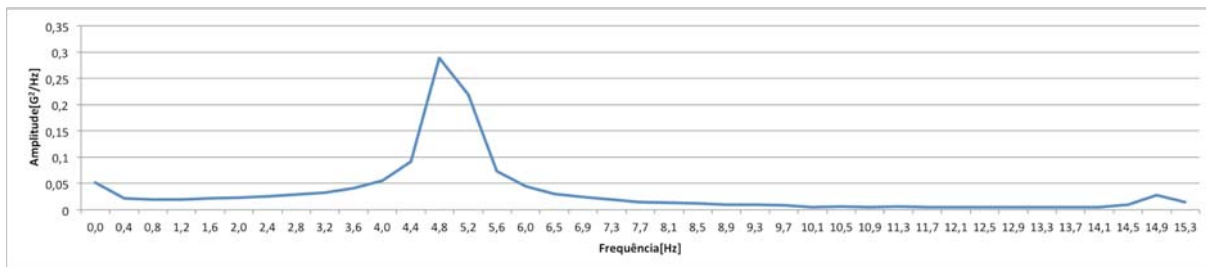
Fonte: do autor.

Figura 45: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 2,5Hz com o SMV



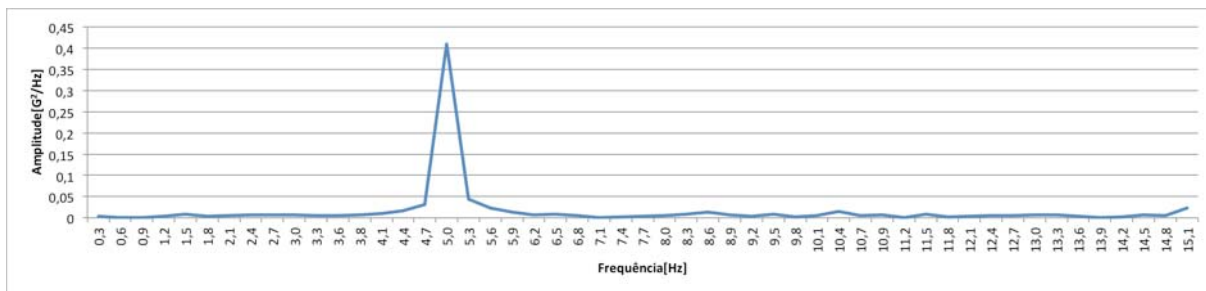
Fonte: do autor.

Figura 46: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 5Hz com SAD



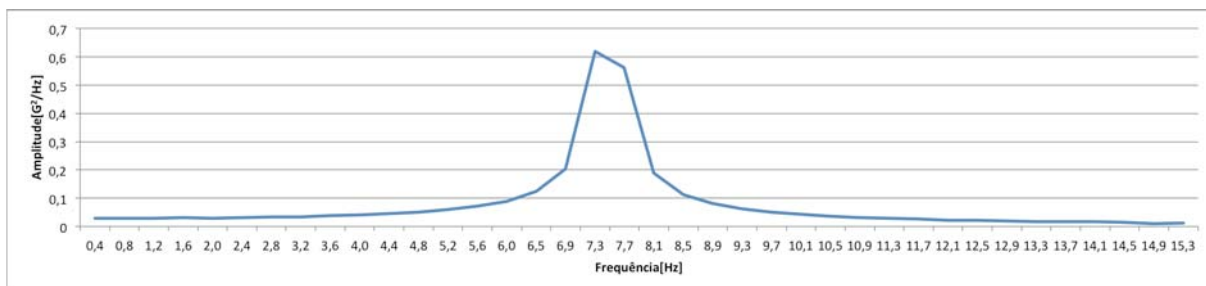
Fonte: do autor.

Figura 47: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 5Hz com o SMV



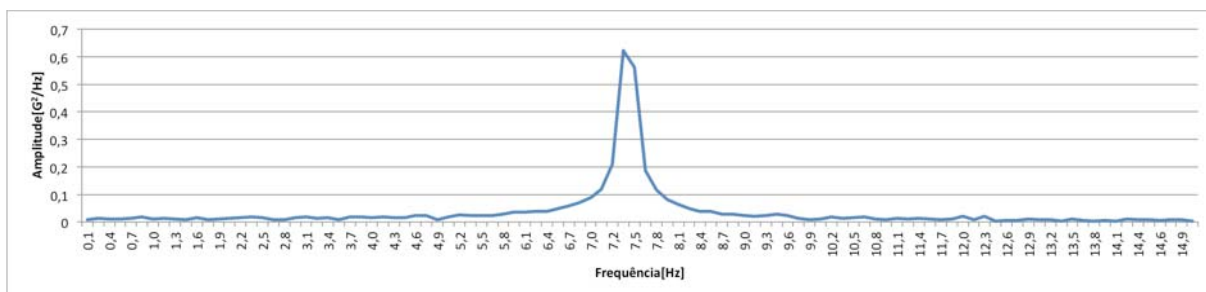
Fonte: do autor.

Figura 48: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 7,5Hz com SAD



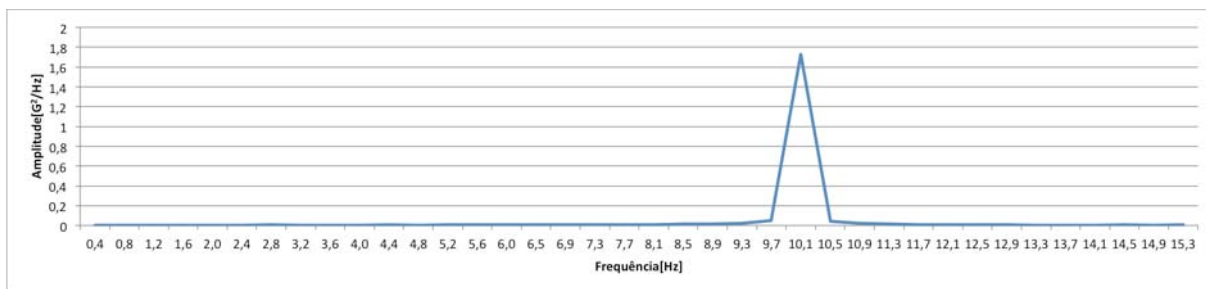
Fonte: do autor.

Figura 49: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 7,5Hz com o SMV



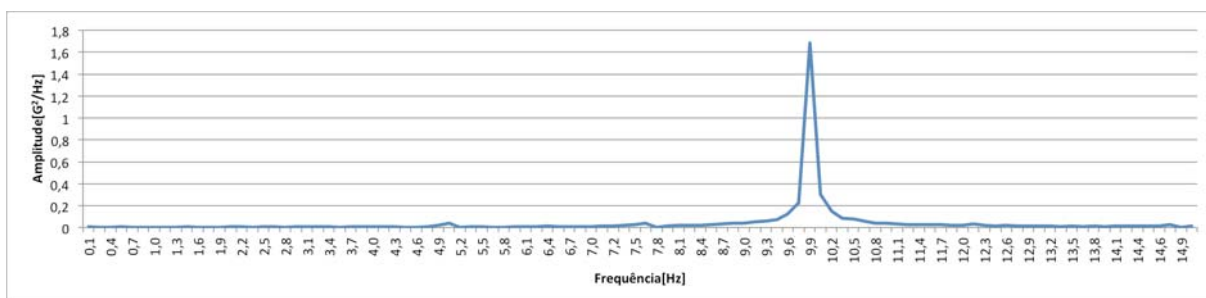
Fonte: do autor.

Figura 50: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 10Hz com SAD



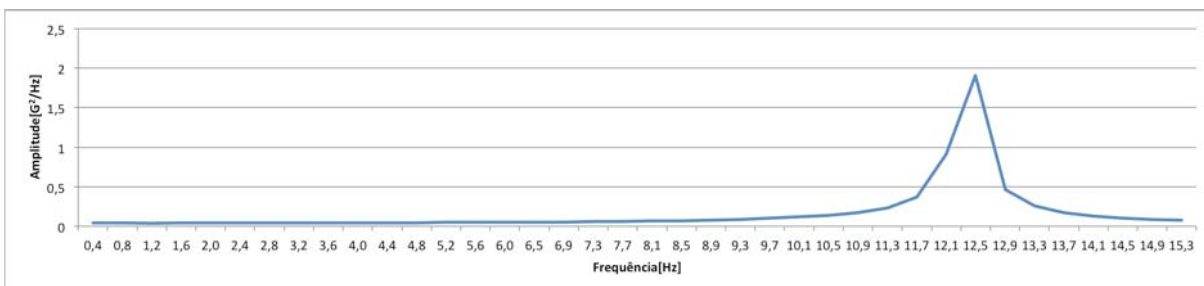
Fonte: do autor.

Figura 51: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 10Hz com o SMV



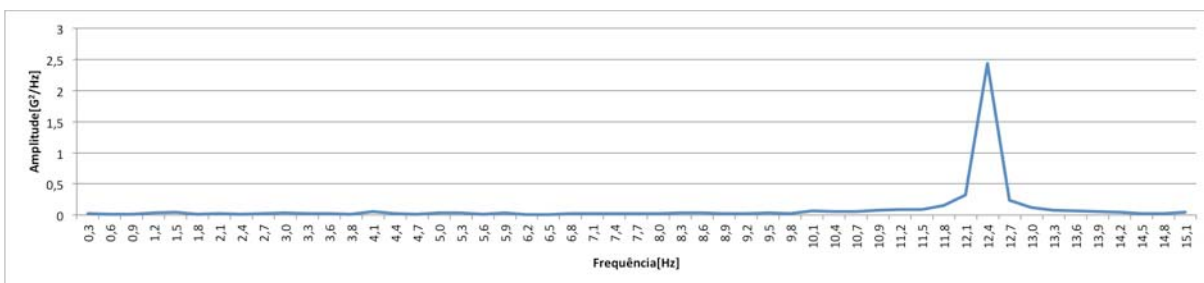
Fonte: do autor.

Figura 52: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 12,5Hz com SAD



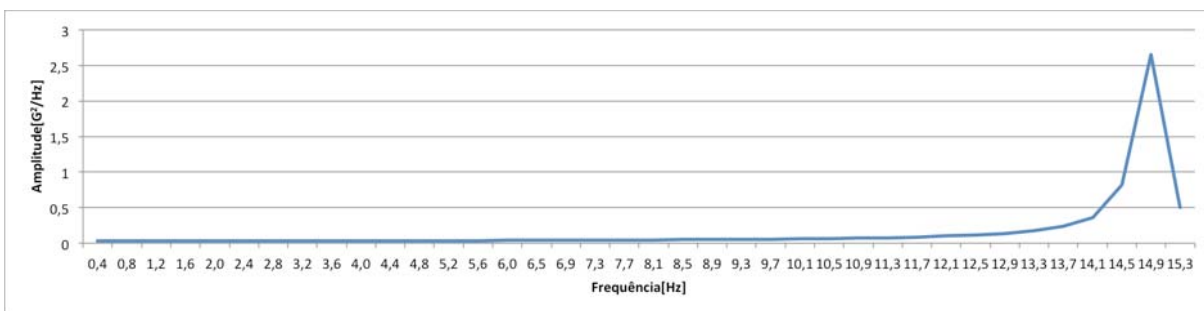
Fonte: do autor.

Figura 53: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 12,5Hz com o SMV



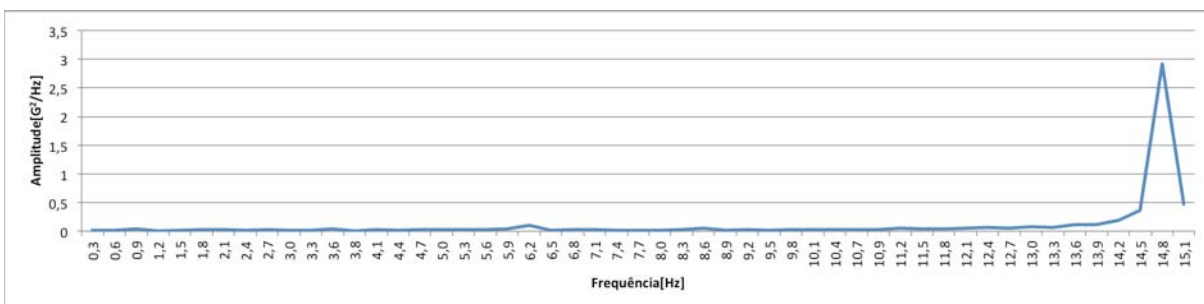
Fonte: do autor.

Figura 54: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 15Hz com SAD



Fonte: do autor.

Figura 55: Densidade Espectral de Potência para o Ensaio de 15Hz com o SMV



Fonte: do autor.

5.6.3.3 Valores Encontrados durante a Análise de Fourier

De posse das tabelas geradas pelo *software* Microsoft Excel durante o procedimento de Análise de Fourier dos dados coletados dos dois sistemas, pode-se verificar mais facilmente os pontos de maior amplitude no resultado da FFT. Assim, os valores encontrados estão demonstrados no Quadro 1.

Quadro 1: Pontos de Maior Amplitude na Análise dos Resultados do Ensaio

Frequência ajustada no <i>shaker</i>	Frequência dominante SAD	Frequência dominante SMV	Variação percentual
2,5Hz	2,4Hz	2,4Hz	0%
5Hz	4,8Hz	5,0Hz	4,2%
7,5Hz	7,3Hz	7,4Hz	1,4%
10Hz	10,1Hz	9,9Hz	2%
12,5Hz	12,5Hz	12,4Hz	0,8%
15Hz	14,9Hz	14,8Hz	0,7%

5.6.4 Discussão dos Resultados dos Ensaio

Uma das primeiras características que fica evidente na comparação dos gráficos da resposta temporal do SAD da National Instruments e do SMV é a distorção de formas de onda, causada principalmente pela diferença entre as duas taxas de amostragem utilizadas nos dois equipamentos. Embora o equipamento da National Instruments revele detalhes de oscilações com frequência mais alta incluídas na medição do ensaio, dentro da faixa de medição proposta para o trabalho, os dois equipamentos fornecem informações semelhantes. Outro ponto de análise foi a respeito da forma de onda apresentada pelos dois equipamentos. Ela demonstrou que a oscilação gerada pelo *shaker* não é perfeitamente senoidal, ressaltando-se ainda vibrações de frequência mais alta provenientes do ventilador

embutido no equipamento para resfriamento do motor. Ainda em análise ao gráfico da resposta temporal dos equipamentos, é interessante destacar que, excetuando as vibrações de alta frequência incluídas no ensaio, os valores médios de amplitude para as oscilações de banda mais estreita são coincidentes, atestando assim que para a faixa dinâmica proposta no trabalho os dois equipamentos têm performance semelhante.

Na análise dos gráficos e números da resposta em frequência das medições, mais uma vez observa-se a diferença causada pela taxa de amostragem diferente. Enquanto o SMV indica picos de frequência mais proeminentes, o sistema da National Instruments acusa picos muito parecidos, porém, com largura maior. Isso pode ser explicado pela maior taxa de amostragem no SAD. Porém, analisando-se os dados dentro da faixa de medição proposta para o trabalho com estruturas de baixa frequência, os dois equipamentos indicam valores muito próximos ou iguais para as frequências dominantes nos ensaios.

Assim, conclui-se que para a aplicação em medições de oscilações com até 15Hz, o SMV mostra-se apto para a detecção de frequências dentro dessa faixa, oferecendo ainda leituras de amplitude fidedignas com o sistema composto pelo acelerômetro da PCB Piezotronics e o SAD da National Instruments.

5.7 Escolha e Desenvolvimento da Alimentação Elétrica

Com o sucesso obtido através do desenvolvimento e teste do dispositivo, passou-se à etapa de desenvolvimento da alimentação elétrica do SMV. Logo, conforme descrito no item 4.1.4, o equipamento deverá operar em locais sem a presença de redes de distribuição de energia elétrica, dificultando assim a construção de fontes de alimentação elétrica convencionais, alimentadas por redes de distribuição 110V ou 220V em corrente alternada.

A primeira alternativa quando se pensa em alimentação elétrica *off-grid* - ou seja, longe das redes de distribuição - é a geração de energia no próprio local. Para tal função existem diversas técnicas como a geração através de geradores convencionais a diesel, centrais hidrelétricas, centrais termelétricas, sistemas eólicos, sistemas de energia oceânica, sistemas baseados em células a combustível e os sistemas baseados em energia solar (REIS, 2015). Dentre todas essas

alternativas, a solução mais aplicável é a energia solar devido a sua baixa complexidade se comparada às outras soluções. Outro aspecto que torna interessante sua utilização é a geração de energia em corrente contínua, em tensões de aproximadamente $18V$, dependendo do painel solar fotovoltaico escolhido, encaixando-se perfeitamente com a necessidade de alimentação do SMV. Além disso, como o SMV deve permanecer em funcionamento durante a noite – período no qual não há geração de energia solar fotovoltaica – um banco de baterias deve ser dimensionado com o objetivo de garantir seu funcionamento.

5.7.1 Dimensionamento do Painel Solar e Baterias

O dimensionamento do sistema solar foi efetuado utilizando-se os dados de consumo levantados durante as etapas iniciais de teste e calibração através da medição de tensão de alimentação e corrente de consumo. O valor encontrado de consumo foi de $0,66W$ por cada acelerômetro no SMV. Dessa maneira, calculando-se uma quantidade de quatro nós sensores para a utilização no ensaio em campo do SMV, além dos requisitos do *hub* de comunicação e possível *modem* 3G, chega-se ao valor de $5W$ de consumo total do sistema completo. A partir desse dado, visitou-se uma variedade de *sites* especializados em energia solar fotovoltaica que fornecem calculadoras de dimensionamento solar, onde se solicitam dados de consumo, e o dimensionamento do sistema fotovoltaico é feito automaticamente. Finalmente, utilizando os dados coletados nas calculadoras de dimensionamento solar, escolhe-se um sistema composto por uma placa solar fotovoltaica de $55Wp$, um banco de baterias de $28Ah$ e um carregador de baterias específico para utilização em sistemas fotovoltaicos de $5A$.

5.7.2 Instalação e Conexão do Sistema Fotovoltaico

Após a compra do conjunto solar fotovoltaico, efetuou-se a sua instalação para testes de funcionamento em laboratório. Segundo Reis (2015), a correta instalação do painel deve ser feita direcionando-se o painel no sentido norte, com uma inclinação com relação à horizontal de ângulo igual à latitude – no caso 28

graus - da região de instalação, atingindo-se o máximo de captação de energia. A Figura 56 mostra a instalação do painel solar fotovoltaico.

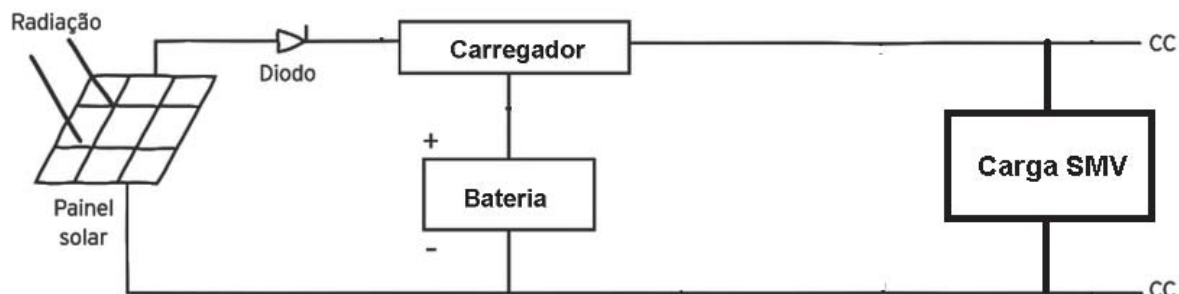
Figura 56: Instalação Experimental do Painel Solar Fotovoltaico



Fonte: do Autor.

Posteriormente, é feita a conexão elétrica do sistema, seguindo o diagrama da Figura 57.

Figura 57: Diagrama Elétrico do Sistema de Alimentação



Fonte: do Autor.

5.7.3 Teste de Funcionamento do Sistema Fotovoltaico

Para assegurar seu funcionamento, o sistema de alimentação elétrica foi montado e deixado em teste de laboratório em conjunto com o SMV por um prazo total de 90 dias. Nesse tempo, ele apresentou bom funcionamento e estabilidade na alimentação mesmo em dias com pouca incidência solar.

5.8 Teste na OAE

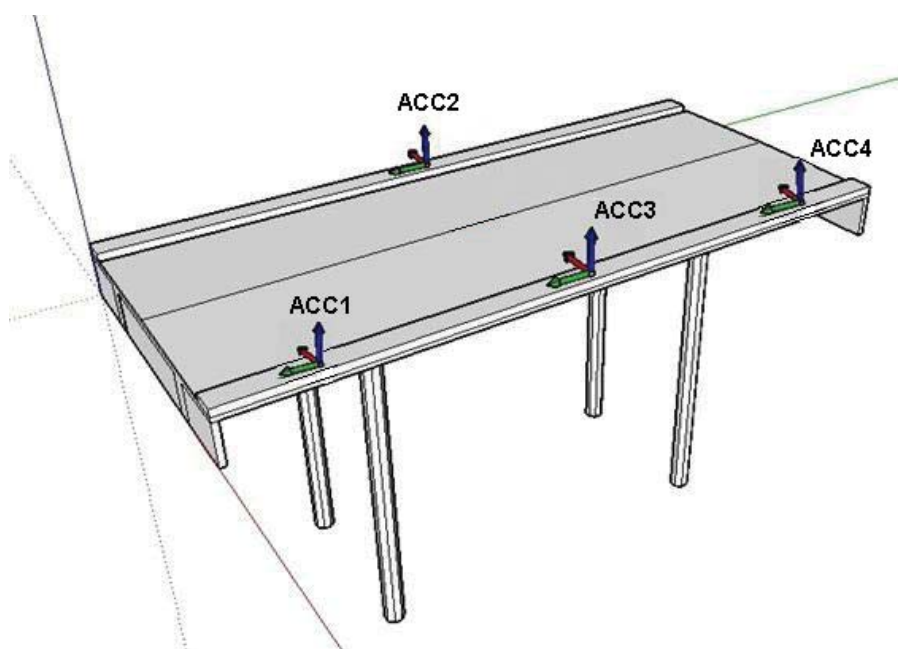
Uma das aplicações principais do dispositivo desenvolvido é a sua utilização em pontes, viadutos e passarelas, assim, a opção escolhida para o teste de campo foi um viaduto, caracterizado no item 4.3.1. Devido a sua proximidade com a área urbana, havia a possibilidade de depredação ou furto do equipamento, assim, o ensaio foi realizado durante a tarde de quatorze de março de 2016, com o deslocamento da equipe até o local, com a instalação de quatro sensores fixados diretamente no concreto do viaduto, com a ligação elétrica dos equipamentos e, finalmente, com a realização de trinta minutos de monitoramento no horário de pico de tráfego de veículos da rodovia. Após a realização do ensaio-teste, o equipamento foi retirado.

5.8.1 Fixação dos Quatro Sensores

A fixação dos sensores ao viaduto teve que ser feita na parte superior do tabuleiro da estrutura, uma vez que a altura do vão central demandava equipamento especial de grande porte para acessar a parte inferior da OAE e, a dureza do concreto com que a estrutura foi moldada, dificultou o processo de furação. Dessa maneira, a disposição dos sensores de aceleração segue a forma apresentada na Figura 58, que foi escolhida para maximizar a leitura dos sinais de vibração provenientes da estrutura. Os acelerômetros ACC2 e ACC3 foram posicionados exatamente sobre o meio do viaduto com o objetivo de captar as oscilações de maior amplitude. Além disso, os acelerômetros ACC1 e ACC4 foram instalados próximos à cabeceira para a detecção de outros modos de vibração além do principal. Com relação à fixação, os elementos de medição foram instalados utilizando parafusos e buchas, garantindo assim sua correta ancoragem junto à estrutura do viaduto.

A Figura 59 mostra a disposição dos acelerômetros ACC4, ACC3 e ACC1 próximos ao guardacorpo do viaduto.

Figura 58: Disposição dos Sensores de Aceleração no Viaduto



Fonte: do Autor.

Figura 59: Disposição dos Acelerômetros ACC4, ACC3 e ACC1 no Viaduto



Fonte: do Autor.

5.8.2 Ligações dos Sensores

O ensaio realizado teve duração máxima de duas horas, portanto, não sendo necessária a instalação do sistema de alimentação solar, optando-se pelo emprego do conjunto de quatro baterias utilizados no teste da alimentação solar, totalizando uma capacidade de $28Ah$. Ainda, a alimentação do *hub* de rede foi efetuada através do mesmo sistema de baterias, facilitando a execução do teste em campo. Outro aspecto a ser comentado foi a utilização das próprias pingadeiras de exaustão pluvial do viaduto para a passagem dos cabos de rede e alimentação, facilitando a instalação do sistema. A Figura 60 mostra a passagem dos cabos através da pingadeira, enquanto a Figura 61 mostra o computador, baterias e *hub* instalados na parte inferior do viaduto.

Figura 60: Passagem dos Cabos pela Pingadeira no Viaduto



Fonte: do Autor.

Figura 61: Sistema Instalado, com Computador, Baterias e Hub



Fonte: do Autor.

5.8.3 Metodologia para Execução do Ensaio

Após a fixação e ligação dos sensores e o teste da rede de comunicação entre o computador cliente e os sensores, foi iniciado o período de monitoramento contínuo das respostas oscilatórias do viaduto. Tal período perdurou das 17:12 até as 17:42 do dia quatorze de março de 2016, segunda-feira, o que caracteriza um horário de trânsito intenso de veículos através da BR-285, de acordo com informações obtidas no posto da Polícia Rodoviária Federal de Passo Fundo, via em que está localizado o viaduto. Porém, a duração do teste não pôde ser maior devido à necessidade de desmontagem e retirada do sistema antes do anoitecer, o que dificultaria o processo, além de torná-lo mais arriscado. Ademais dos acelerômetros, foi utilizada uma câmera digital para a filmagem do tráfego que cruzava a rodovia, estabelecendo-se assim mais parâmetros para a análise da estrutura.

Depois da coleta de informações, prosseguiu-se para a etapa de análise, na qual os dados brutos obtidos a partir dos arquivos de texto gerados por cada sensor

de aceleração são janelados, ou seja, tem um certo período de leitura selecionado e separado. As janelas temporais foram escolhidas através da identificação da passagem de veículos nos gráficos, gerados com ajuda do *software* Microsoft Excel, e também com ajuda das filmagens. O ideal é selecionar o instante em que há vibrações livres na estrutura, ou em outras palavras, o momento em que o viaduto vibra após a passagem de um veículo sem nenhuma interferência proveniente de algum outro veículo, apresentando somente seus modos de oscilação naturais. Esse processo foi feito manualmente no presente trabalho, mas em *softwares* comerciais de análise modal é feito automaticamente. Após a separação das janelas, é aplicada a FFT ao sinal – ainda no ambiente do *software* Microsoft Excel - no domínio do tempo, gerando assim sua resposta no domínio da frequência. Cabe ressaltar que todos os resultados gerados foram calculados com um intervalo de 512 amostras, intervalo mais adequado à análise das vibrações livres na estrutura, com o objetivo de uniformizar as respostas discretas de frequência. A partir daí, foi feita a identificação das frequências naturais de cada janela, gerando uma série de resultados. Cabe salientar que apenas os resultados coletados no eixo vertical foram analisados.

5.8.4 Análise dos resultados do ensaio

A análise das janelas escolhidas gerou um total de 48 resultados de frequência natural, sendo que são 12 instantes diferentes para cada acelerômetro. Para a correta interpretação dos sinais, o tempo total de 30 minutos foi dividido em quatro períodos diferentes, nos quais foi possível associar os valores de aceleração com as imagens obtidas pela câmera. Assim, para simplificação da apresentação dos resultados, os períodos foram chamados de A, B, C e D. Foram analisados cinco instantes do período A, quatro instantes do período B, dois instantes do período C e um instante do período D. O Quadro 2 mostra os valores de frequência natural encontrados para o período A, o Quadro 3 mostra os valores para o período B e o Quadro 4 mostra os valores para os períodos C e D.

Quadro 2: Valores de Frequência Natural Encontrados no Período A

Instante	A1	A2	A3	A4	A5
Acelerômetro ACC1	12,43Hz	12,43Hz	16,57Hz	21,30Hz	12,43Hz
Acelerômetro ACC2	12,43Hz	12,43Hz	12,43Hz	12,43Hz	12,43Hz
Acelerômetro ACC3	12,43Hz	11,84Hz	12,43Hz	11,84Hz	11,84Hz
Acelerômetro ACC4	19,53Hz	12,43Hz	15,98Hz	21,90Hz	12,43Hz

Quadro 3: Valores de Frequência Natural Encontrados no Período B

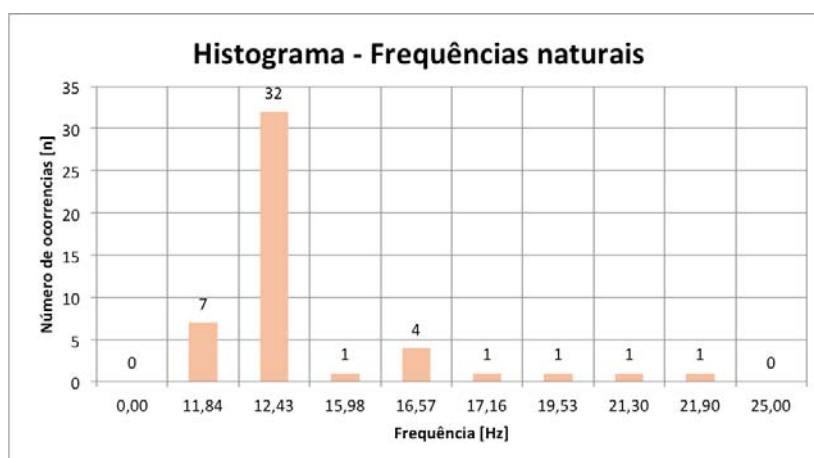
Instante	B1	B2	B3	B4
Acelerômetro ACC1	12,43Hz	12,43Hz	12,43Hz	12,43Hz
Acelerômetro ACC2	12,43Hz	12,43Hz	12,43Hz	12,43Hz
Acelerômetro ACC3	11,84Hz	12,43Hz	12,43Hz	12,43Hz
Acelerômetro ACC4	12,43Hz	12,43Hz	12,43Hz	12,43Hz

Quadro 4: Valores de Frequência Natural Encontrados nos Períodos C e D

Instante	C1	C2	D1
Acelerômetro ACC1	12,43Hz	17,16Hz	11,84Hz
Acelerômetro ACC2	12,43Hz	16,57Hz	12,43Hz
Acelerômetro ACC3	12,43Hz	11,84Hz	12,43Hz
Acelerômetro ACC4	11,84Hz	16,57Hz	16,57Hz

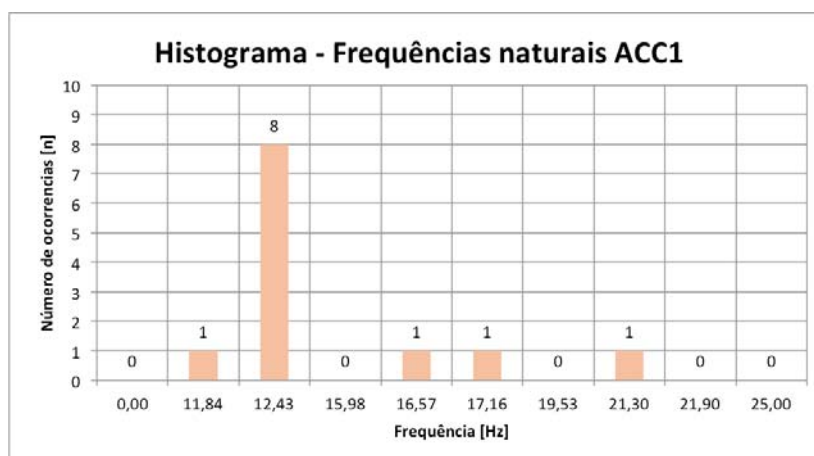
Realizando-se a análise estatística dos dados, são gerados cinco histogramas para as quantidades de ocorrências das frequências encontradas na análise de Fourier das amostras de sinal. A análise do total dos dados pode ser vista na Figura 62, enquanto a análise individual por acelerômetro pode ser vista nas Figura 63, Figura 64, Figura 65 e Figura 66. Ainda, na Figura 67 pode-se visualizar o resultado da FFT aplicada aos dados de uma das janelas de análise.

Figura 62: Histograma de Valores de Frequência Encontrados no Ensaio



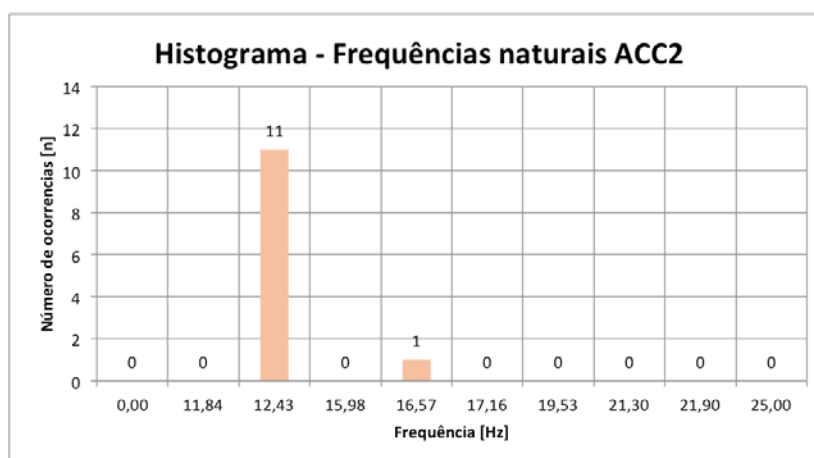
Fonte: do Autor.

Figura 63: Histograma de Valores de Frequência Encontrados no ACC1



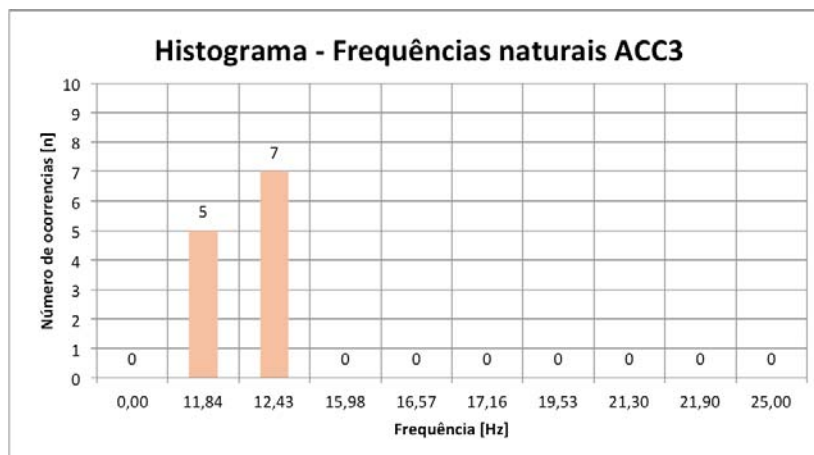
Fonte: do Autor.

Figura 64: Histograma de Valores de Frequência Encontrados no ACC2



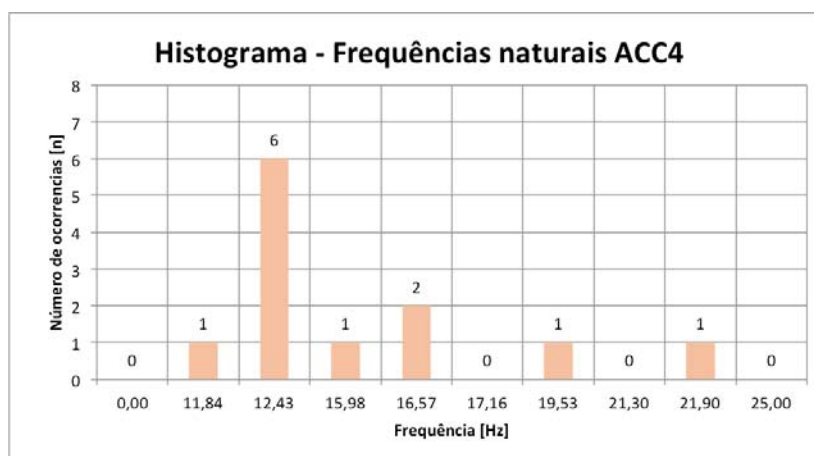
Fonte: do Autor.

Figura 65: Histograma de Valores de Frequência Encontrados no ACC3



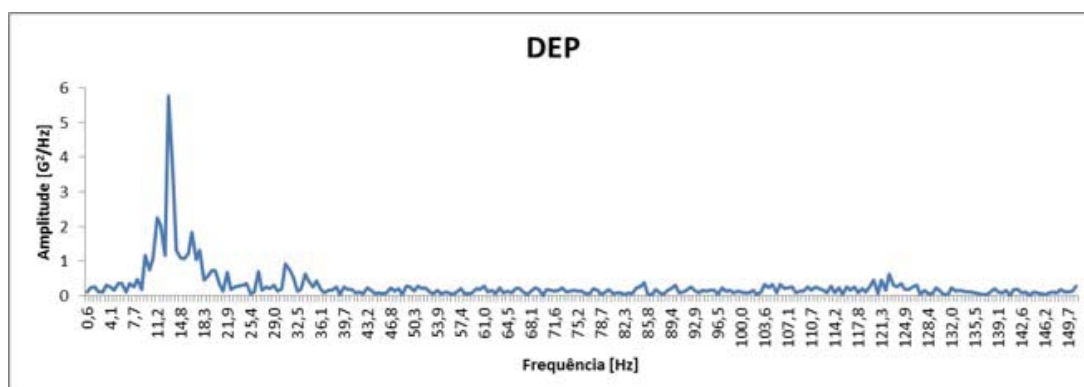
Fonte: do Autor.

Figura 66: Histograma de Valores de Frequência Encontrados no ACC4



Fonte: do Autor.

Figura 67: Densidade espectral de potência de uma das janelas de análise.



Fonte: do Autor.

5.8.5 Comparação com os Resultados Anteriores do Viaduto

No item 4.4 deste trabalho descreve-se a metodologia de teste planejada para o equipamento que consiste na comparação com os resultados de ensaios anteriores realizados no viaduto, no trabalho de Braido (2014). Nesse estudo, o autor realiza o ensaio de medição de acelerações com a utilização de um celular, em três posições sobre o meio do vão, aproximadamente, onde foram instalados os acelerômetros ACC2 e ACC3. O Quadro 5 mostra os valores encontrados durante o ensaio de Braido (2014) no Viaduto, bem como sua média.

Quadro 5: Frequências Naturais Encontradas no Ensaio de Braido (2014)

Amostra	Frequência
Amostra 1	12,31Hz
Amostra 2	13,08Hz
Amostra 3	11,72Hz
Amostra 4	12,60Hz
Amostra 5	14,45Hz
Amostra 6	13,08Hz
Amostra 7	7,81Hz
Média	12,15Hz

Já o Quadro 6 mostra os valores médios encontrados com cada acelerômetro do SMV e também a media geral entre todas as 48 amostras coletadas.

Quadro 6: Médias das Frequências Naturais Encontradas com o SMV

Acelerômetro	Média das frequências naturais encontradas
Acelerômetro 1	13,86Hz
Acelerômetro 2	12,77Hz
Acelerômetro 3	12,18Hz
Acelerômetro 4	14,75Hz
Média geral	13,39Hz

À primeira vista, os resultados possuem incongruência, já que as médias dos resultados de Braido (2014) diferem da média geral do SMV em mais de 1Hz ou 10,2%. Entretanto, cabe observar que os ensaios feitos por Braido (2014) foram efetuados somente sobre o meio do viaduto e não sobre as cabeceiras. Assim, torna-se interessante analisar somente os acelerômetros ACC2 e ACC3 que efetuaram a leitura em tal posição. O Quadro 7 mostra os resultados incluindo-se a análise com a média de ACC2 e ACC3.

Quadro 7: Médias das Frequências Naturais Encontradas com o SMV

Acelerômetro	Média das frequências naturais encontradas
Acelerômetro 1	13,86Hz
Acelerômetro 2	12,77Hz
Acelerômetro 3	12,18Hz
Acelerômetro 4	14,75Hz
Média geral	13,39Hz
Média ACC2 e ACC3	12,48Hz

Comparando o valor da média dos acelerômetros ACC2 e ACC3 com a média das amostras de Braido (2014) verifica-se grande semelhança, com desvio percentual inferior a 3%.

5.8.6 Discussão dos Resultados dos Ensaios

À primeira vista, os valores encontrados no trabalho de referência e durante o ensaio com o Viaduto mostraram-se incongruentes. Porém, após uma análise mais detalhada, considerando-se apenas o centro do viaduto como medida de comparação e igualando as condições de amostra, chega-se a um resultado excelente. A explicação para tal efeito é a presença de frequências mais altas nas leituras dos acelerômetros ACC1 e ACC4 do SMV, localizados próximos às cabeceiras do viaduto. Tais leituras podem ser explicadas pela interação dos veículos com o pavimento e também pela interação entre veículos, durante a passagem de dois carros ou caminhões ao mesmo tempo. Caso o trabalho de Braido (2014) trouxesse medições inclusive nesses pontos do viaduto, as leituras poderiam coincidir ainda mais.

6 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi projetar, desenvolver e testar um protótipo de um sistema de monitoramento dinâmico de estruturas de baixa frequência, capaz de efetuar medições contínuas de vibrações que sirvam aos procedimentos de análise modal operacional e de identificação estrutural. Em seguida, através de um processo de desenvolvimento, seguindo a metodologia explicitada nesta dissertação, chegue-se ao final da pesquisa com todos os objetivos alcançados e até expandidos. Os resultados alcançados, durante os processos de calibração e teste, atingiram os objetivos originalmente previstos, e permitem expandir o campo de aplicações do sistema, em outros tipos de estruturas, mantendo a expectativa de simplicidade e baixo custo. Além disso, cabe salientar que o conteúdo dessa pesquisa gerou um depósito de patente junto ao INPI (Instituto Nacional de Propriedade Industrial), sob o número de protocolo BR1020160056926.

O sistema está habilitado para efetuar medições de vibrações e transmitir as informações obtidas através de uma rede de dados, para que as informações sejam armazenadas em um computador e possam ser posteriormente analisadas por um especialista. Para isso, componentes de *hardware* e *software* foram construídos e testados em um cuidadoso processo de desenvolvimento, começando pela calibração junto ao acelerômetro de precisão e o sistema de aquisição de dados da *National Instruments*, seguidos pelos ensaios em laboratório da viga metálica e finalizando com a etapa mais importante, o teste de aplicação no Viaduto, que confirmaram as pesquisas anteriores com a estrutura e acabaram por revelar a eficácia do sistema desenvolvido.

O desenvolvimento desse sistema é uma pequena parte do que pode ser feito com relação ao estudo de estruturas através da ajuda do campo de Instrumentação Eletrônica. O ramo de pesquisa pode ser continuado com uma avaliação mais aprofundada de diversos tipos de estruturas civis em que o equipamento pode ser aplicado, além da continuação do estudo com o Viaduto, incluindo o uso de *softwares* comerciais de análise modal operacional. Sob o ponto de vista do sistema, melhoramentos com o método de alimentação - explorando o campo de *Energy Harvesting* - podem ser efetuados. Além disso, a pesquisa acerca de novos métodos

de comunicação, novas tecnologias de sensores e mesmo a utilização de sistemas embarcados ou *smart devices* nunca pode ser descartada. Finalmente, conclui-se que o sistema desenvolvido nesta dissertação pode ser utilizado a longo prazo como ferramenta de Gerenciamento de Infraestrutura em pontes, viadutos e passarelas, fornecendo dados de utilização e condição estrutural , tanto em nível de projeto como em nível de rede.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 9452:2016 - Vistorias de pontes e viadutos de concreto - Procedimento. **ABNT**, Abr 2016.

ALVES, W. P. **C++ Builder 6: Desenvolva Aplicações para Windows**. São Paulo: Editora Érica, 2007.

ANALOGDEVICES. Sensing Low-g Acceleration Using the ADXL345 Digital Accelerometer Connected to the ADuC7024 Precision Analog Microcontroller, 2009. Disponível em: <<http://www.analog.com/media/en/reference-design-documentation/reference-designs/CN0133.pdf>>. Acesso em: 10 Março 2015.

ARDUINO. Arduino Boards, 2015. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/Products>>. Acesso em: 7 Março 2015.

ARM. ARM Processors, 2015. Disponível em: <<http://www.arm.com/products/processors/index.php>>. Acesso em: 6 Março 2015.

ATMEL. 8051 Architecture Microcontroller. Atmel, 2015. Disponível em: <<http://www.atmel.com/products/microcontrollers/8051architecture/default.aspx?tab=overview>>. Acesso em: 2015 Março 2015.

ATMEL. Atmel AVR 8-bit and 32-bit Microcontrollers, 2015. Disponível em: <<http://www.atmel.com/products/microcontrollers/avr/default.aspx>>. Acesso em: 7 Março 2015.

BACHMANN. **Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines**. [S.l.]: Birkhäuser Verlag, v. 1, 1995. 241-246 p.

BACHMANN, H. et al. **Vibration Problemas in Structures: Practical Guidelines**. Berlim: Birkhauser, v. 1, 1991.

BALBINOT, A. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. Rio de Janeiro: LTC, v. 2, 2010.

BECKER, T. et al. Autonomous Sensor Nodes for Aircraft Structural Health Monitoring. **IEEE Sensors Journal**, v. 9, n. 11, p. 1589-1595, 2009.

BRAIDO, J. D. **Avaliação da Superestrutura de Pontes através de Parâmetros Dinâmicos**. Dissertação de Mestrado. Passo Fundo: UPF. 2014. p. 1-78.

BROWNJOHN, J. et al. Ambient vibration re-testing and operational modal analysis of the Humber Bridge. **Engineering Structures**, 32, 2010. 2003-2018.

COUCH II, L. W. **Digital and analog communication systems**. 5^a. ed. New Jersey: Pearson, 1993.

DE SOUSA, L. B. **TCP/IP Básico & Conectividade em Redes**. Segunda Edição. ed. São Paulo: Editora Érica, v. 1, 2004.

DEITEL, H. M. **C++: como programar**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006.

DNIT. **Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias**. Brasília: DNIT. Dezembro 2004. p. 1-255.

DOS SANTOS, C. A. N. **Retro-análise de estruturas de pontes por meio de técnicas teórico-numérico-experimentais**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ, 2013.

DUHAMEL, P.; VETTERLI, M. FAST FOURIER TRANSFORMS: A TUTORIAL REVIEW AND A STATE OF THE ART, v. 19, p. 259-299, 1990.

FASANO, A. Using Sockets. **C++ Builder Developers Journal**, v. 4, n. 4, Abril 2000.

FHWA. **Dynamic Bridge Substructure Evaluation and Monitoring**. McLean: Federal Highway Administration, v. 1, 2005.

FIGUEIREDO, L. et al. Aplicações de Acelerômetros. **Instituto Superior Técnico**, Lisboa, 2007. Disponível em: <<https://nebm.ist.utl.pt/repositorio/download/375>>. Acesso em: 10 Março 2015.

FOROUZAN, B. A. **Protocolo TCP/IP**. Porto Alegre: AMGH, 2010.

FREESCALE. Xtrinsic Accelerometer MMA845xQ Family, 2010. Disponível em: <http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/fact_sheet/MMA845XQFS.pdf?fasp=1&WT_TYPE=Fact%20Sheets&WT_VENDOR=FREESCALE&WT_FILE_FORMAT=pdf&WT_ASSET=Documentation&fileExt=.pdf>. Acesso em: 10 Março 2015.

GLOBO. Bom Dia Brasil. **Globo.com**, 28 Agosto 2014. Disponível em: <<http://g1.globo.com/bom-dia-brasil/noticia/2014/08/depois-de-9-meses-ponte-que-tremia-quando-carros-passavam-e-interditada.html>>. Acesso em: 11 Novembro 2014.

HU, W.-H. **Operational Modal Analysis and Continuous Dynamic Monitoring of Footbridges**. Tese de Doutorado. Porto: Universidade do Porto, 2013. 1-248 p.

HU, X.; WANG, B.; JI, H. A Wireless Sensor Network-Based Structural Health Monitoring System for Highway Bridges. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 28, p. 193-209, 2013. ISSN DOI: 10.1111/j.1467-8667.2012.00781.x.

HUSSAIN, H. K. et al. Evaluation Behavior of Qing Shan Concrete Bridge under Static Load Test. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 3, n. 7, p. 677-688, 2011.

IERA, A. et al. The Internet of Things. **IEEE Wireless Communications**, v. 17, n. 6, p. 8-9, 2010.

INVENSENSE. **MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification**. 3.4. ed. Sunnyvale: [s.n.], 2013.

INVENSENSE. MEMS Gyro-Accelerometer MPU6000/MPU6050. **INVENSENSE**, il 2015. Disponível em: <<http://www.invensense.com/mems/gyro/mpu6050.html>>. Acesso em: 16 Abril 2015.

JORGE, F. D. S.; RINTZEL, R. **Análise Morfológica das Principais Obras de Arte do Município de Passo Fundo**. Trabalho de disciplina de Obras de Arte. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, p. 1-49. 2010.

KIM, C. W.; KAWATANI, M.; KIM, K. B. Three-dimensional dynamic analysis for bridge–vehicle interaction with roadway roughness. **Computers and Structures**, v. 83, n. 19, p. 1627-1645, 2005.

KUMAR, J.; BAJPAI, R. Application pf Mems in Bridge Structures Monitoring Health Monitoring. **International Journal of Engineering and Innovative Technology**, 2, n. 4, 2012. 103-106.

LANTRONIX. Lantronix Device Networking. **Lantronix Embedder Networking and Embedder Serial to Ethernet**, 2015. Disponível em: <<http://www.lantronix.com/device-networking/embedded-device-servers/?tab=0>>. Acesso em: 29 Maio 2015.

LAROCCA, A. P. C.; SCHAAL, R. E. Monitoramento do Comportamento Dinâmico de uma passarela estaiada de madeira com GPS e Transdutor de Deslocamento. **Revista Minerva - Pesquisa e Tecnologia**, São Paulo, 3, n. 1, 2006. 47-55.

LYNX, E. W. EZ Web Lynx. **EZ Web Lynx 3.3V**, 2015. Disponível em: <https://www.ezweblynx.com/product_info.php?cPath=Store&products_id=EZWEBLYNX_3V>. Acesso em: 29 Maio 2105.

MCCULLAGH, J. J. et al. Long-term testing of a vibration harvesting system for the structuralhealth monitoring of bridges. **Sensors and Actuators A**, v. 217, p. 139-150, 2014.

MEYERS, S. **C++ Eficaz: 55 maneiras de aprimorar seus programas e projetos.** Porto Alegre: Bookman, 2011.

MICROCHIP. **dsPIC33FJ32MC302/304, dsPIC33FJ64MCX02/X04, and dsPIC33FJ128MCX02/X04 Data Sheet: High-Performance, 16-bit Digital Signal Controllers.** [S.l.]: Microchip, 2008.

MICROCHIP. **16-bit, 2015. Disponível em:** <<http://www.microchip.com/pagehandler/en-us/family/16bit/>>. Acesso em: 8 Março 2015.

MICROCHIP. **8-bit Resources, 2015. Disponível em:** <<http://www.microchip.com/pagehandler/en-us/family/8bit/>>. Acesso em: 8 Março 2015.

MILANI, C. J. **Subsídios para o diagnóstico das pontes do sistema viário do município de Pato Branco - Paraná.** Dissertação de Mestrado. Passo Fundo: UPF. 2010. p. 1-216.

MOKARZEL, M. P. **Internet Embedded: TCP/IP para Microcontroladores.** 1a edição. ed. São Paulo: Editora Érica, v. 1, 2004.

MORADI, M.; SIVOTHTHAMAN, S. MEMS Multisensor Intelligent Damage Detection for Wind Turbines. **IEEE Sensors Journal**, v. 15, n. 3, p. 1437-1444, 2015.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH BOARD. **Proposed Guideline for Reliability-Based Bridge Inspection Practices.** Transportation Research Board. Washington. 2014.

NTSB. **Collapse of I-35W Highway Bridge - Minneapolis, Minnesota.** National Transportation Safety Board. Minneapolis. 2007.

PAVI, S.; BORDIN, F.; VERONEZ, M. R. **O Uso do Laser Scanner Terrestre na Inspeção de Pontes e Viadutos de Concreto: uma Revisão Bibliográfica.** VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2014.

PENZ, R. S. **Desenvolvimento de um Inclinômetro com Tecnologia MEMS aplicado ao Monitoramento de Obras Geotécnicas.** Dissertação de Mestrado. Passo Fundo. UPF. 2014.

PEREIRA, F. **Microcontroladores PIC: Programação em C.** Terceira edição. ed. São Paulo: Editora Érica, v. 1, 2003. 15-28 p.

PRAVIA, Z. M. C.; BRAIDO, J. D. Measurements of bridges' vibration characteristics using a mobile phone. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 5, p. 721-743, Outubro 2015. ISSN 1983-4195.

RAMOS, J. D. S. **Instrumentação eletrônica sem fio: Transmitindo dados com módulos XBee ZigBee e PIC16F877A.** 1 Edição. ed. São Paulo: Editora Érica, v. 1, 2013. ISBN 978-85-365-0401-8.

RAPPAPORT, T. S. **Comunicações sem fio: princípios e práticas.** Segunda Edição. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, v. 1, 2009.

RASPBERRYPI. WHAT IS A RASPBERRY PI?, 2015. Disponível em: <<http://www.raspberrypi.org/help/what-is-a-raspberry-pi/>>. Acesso em: 10 Março 2015.

REGALADO, A. The Internet of Things. **Technology Review** , v. 117, n. 4, p. 68-69, 2014.

REIS, L. B. D. **Geração de energia elétrica.** Segunda Edição. ed. Barueri: Editora Manole, v. 1, 2015.

RIBAS, R. Unicamp. **Microsistemas Integrados (MEMS)**, 2011. Disponível em: <<http://www.ccs.unicamp.br/cursos/fee107/download/cap14.pdf>>. Acesso em: 10 Março 2015.

RYAN, T. W. et al. **Bridge Inspector's Reference Manual**. Arlington: Federal Highway Administration, 2012.

SARTORTI, A. L.; MASCIA, N. T. **Identificação de patologias em pontes**. 5º Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas. Curitiba: CINPAR. 2009.

SAZONOV, E. et al. Self-Powered Sensors for Monitoring of Highway Bridges. **IEEE Sensors Journal**, v. 9, n. 11, p. 1422-1429, 2009.

SCRIMGER, R. **TCP/IP, a bíblia**. Terceira edição. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, v. 1, 2003.

SENSR LLC. GP2Lx USB Accelerometer : SENSR LLC. **GP2Lx USB Accelerometer**: SENSR LLC, 2014. Disponível em: <<http://www.monitoringstructures.com/products/gp2lx-usb-accelerometer/>>. Acesso em: 28 Novembro 2014.

SOLOMAN, S. **Sensores e sistemas de controle na indústria**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

ST, M. 3-axis digital accelerometers for smarter, easier-to-use and energy-efficient portable devices, Setembro 2012. Disponível em: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/sales_and_marketing/promotional_material/flyer/flaccelerometers.pdf>. Acesso em: 10 Março 2015.

THOMAZINI, D.; DE ALBUQUERQUE, P. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. Oitava Edição. ed. São Paulo: Editora Erica, v. 1, 2011.

THORMANN, J. F. F. **PROARTE Programa de Reabilitação de Obras de Arte Especiais**. Brasília: DNIT. 2011.

TI. BeagleBone Black Development Board, 2015. Disponível em: <<http://www.ti.com/tool/beaglebk>>. Acesso em: 10 Março 2015.

TORFS, T. et al. Low Power Wireless Sensor Network for Building Monitoring. **IEEE Sensors Journal**, v. 13, n. 3, p. 909-915, 2013. ISSN DOI: 10.1109/JSEN.2012.2218680.

TOZETTO, R. S. **Wattímetro digital para baixas potências**. Trabalho de Conclusão de Curso. Passo Fundo: UPF. 2012.

VERZONI, J. E. O Aço vencendo obstáculos. **Construção Metálica**, 92, 2009. 4.

WARDLAW, J. L.; KARAMAN, I.; KARSILAYAN, A. I. Low-Power Circuits and Energy Harvesting for Structural Health Monitoring of Bridges. **IEEE Sensors Journal**, v. 13, n. 2, p. 709-722, Fevereiro 2013.

WHELAN, M. P.; GANGONE, M. V.; JANOYAN, K. D. Highway Bridge Assessment Using an Adaptive Real-Time Wireless Sensor Network. **IEEE Sensors Journal**, v. 9, n. 11, p. 1405-1413, Novembro 2009.

WIZNET. WIZNet Co. **W5100 WIZNet**, 2015. Disponível em: <<http://www.wiznet.co.kr/product-item/w5100/>>. Acesso em: 29 Maio 2015.

YAO, J. et al. Strain Gauge-enable Wireless Vibration Sensor Remotely Powered by Light. **IEEE Sensors Journal**, v. PP, n. 99, 2015. ISSN 10.1109/JSEN.2015.2437843.

YOON, S.-W. et al. Vibration Measurements of Steel Foot-bridges using Mobile-phone. **Applied Mechanics and Materials**, 470, 2014. 777-780.

ZHAO, J.; ZHANG, L. Structural Damage Identification Based on the Modal Data Change. **International Journal of Engineering and Manufacturing**, 4, 2012. 59-66.