

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

BRUNO DE MELO GEVAERD

**CARACTERIZAÇÃO DO USO DE UM SENSOR ACELERÔMETRO NA
AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DE UM VEÍCULO EM MOVIMENTO**

FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2019

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

BRUNO DE MELO GEVAERD

**CARACTERIZAÇÃO DO USO DE UM SENSOR ACELERÔMETRO NA
AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DE UM VEÍCULO EM MOVIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Orientador:

Prof. Dr. Eng. Marcelo Vandresen

Coorientador:

Prof. Dr. Eng. Gustavo Garcia Otto

FLORIANÓPOLIS, 2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Gevaerd, Bruno de Melo

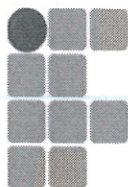
Caracterização do uso de um sensor acelerômetro na avaliação da dinâmica de um veículo em movimento / Bruno de Melo Gevaerd ; orientação de Marcelo Vandresen; coorientação de Gustavo Garcia Otto. - Florianópolis, SC, 2019.

84 p.

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

Inclui Referências.

1. Calibração back to back. 2. Geofone. 3. Acelerômetro. 4. Sistema de condicionamento e coleta de dados. I. Vandresen, Marcelo. II. Otto, Gustavo Garcia. III. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica. IV. Título.

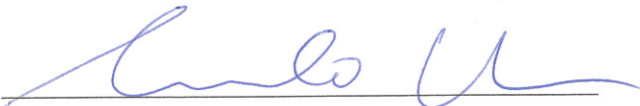


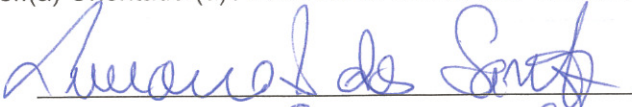
INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

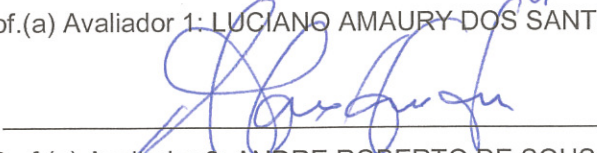
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

**ATA DA BANCA FINAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO DE ENGENHARIA
MECATRÔNICA DO INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA – Nº 0046**

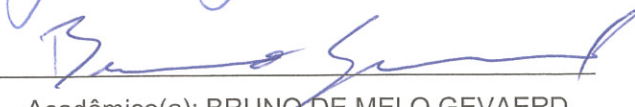
Aos quatro dias do mês de julho, de 2019, às 13:30h, o (a) estudante **BRUNO DE MELO GEVAERD** apresentou o seu Trabalho de Conclusão de Curso para julgamento à Banca Examinadora constituída pelos seguintes integrantes: Prof **MARCELO VANDRESEN** (orientador/presidente da banca/IFSC), Prof **LUCIANO AMAURY DOS SANTOS** (IFSC), Prof **ANDRÉ ROBERTO DE SOUSA** (IFSC) e o Sr. **GUSTAVO GARCIA OTTO**. A sessão pública de defesa foi aberta pelo Presidente da Banca, que apresentou a Banca Examinadora e deu continuidade aos trabalhos, fazendo uma breve referência ao TCC que tem como título **Caracterização do Uso de um Sensor Acelerômetro para a Avaliação da Dinâmica de um Veículo**. Na sequência, o(a) estudante teve até 30 minutos para a exposição de seu trabalho, e cada integrante da Banca Examinadora fez a arguição após a apresentação do mesmo. Finalmente, foi aberto um espaço aos presentes para eventuais perguntas ou comentários sobre o trabalho apresentado. Ouvidas as explicações do(a) estudante, a Banca Examinadora, reunida em caráter sigiloso, para proceder à avaliação final, deliberou pelo conceito 9. Foi dada ciência ao(a) estudante que a versão final do trabalho deverá ser entregue até o dia 10/08/2019 com as devidas alterações sugeridas pela banca. Nada mais havendo a tratar, a sessão foi encerrada às 14 h 30 min, dela sendo lavrada a presente ata, que, uma vez aprovada, foi assinada por todos os membros da Banca Examinadora e pelo(a) estudante.


Prof.(a) Orientador(a) / Presidente: MARCELO VANDRESEN


Prof.(a) Avaliador 1: LUCIANO AMAURY DOS SANTOS


Prof.(a) Avaliador 2: ANDRÉ ROBERTO DE SOUSA


Sr. GUSTAVO GARCIA OTTO


Acadêmico(a): BRUNO DE MELO GEVAERD

*“Experience is the name everyone
gives to their mistakes”*

Oscar Wilde

RESUMO

A pesquisa realizada neste trabalho visou caracterizar o uso de um sensor acelerômetro na avaliação da dinâmica vertical de veículo em movimento, com o desenvolvimento de um sistema de condicionamento e coleta de dados para esse sensor, bem como de ensaios para realizar análises do conjunto do sistema de coleta e sensor. Foi elaborado também, um estudo comparativo do sensor acelerômetro com um sensor geofone, pois este é o equipamento de medição instalado na pista de teste de pesagem em movimento do LabTrans/UFSC. O funcionamento do equipamento de coleta desenvolvido foi validado utilizando o sensor acelerômetro e um excitador de referência. Os valores de sensibilidade e de frequência obtidos nos ensaios com o excitador de referência, calculados a partir do acelerômetro, foram comparados e validados com o certificado de calibração do sensor. Para a avaliação dos sensores, foram utilizados um sistema comercial de coleta de dados e um excitador eletrodinâmico controlável. No ensaio com o excitador eletrodinâmico, foi realizada a montagem conhecida por calibração *back to back*, em que os sensores são instalados um acima do outro. Os resultados dos ensaios com os sensores revelaram conhecimento sobre a resposta deles, permitindo o entendimento das grandezas que estão sendo medidas. Além disso, foram obtidos detalhes sobre a necessidade de compatibilização do sinal do geofone com o acelerômetro. Por fim, foi concluído que o estudo atendeu às demandas da pesquisa, gerando conhecimento acerca dos sensores acelerômetro e do geofone, para uso desses sensores no desenvolvimento de um sistema embarcado de medição da dinâmica veicular, importante para o projeto de pesagem em movimento do LabTrans/UFSC.

Palavras-Chave: Calibração *back to back*. Geofone. Acelerômetro. Sistema de condicionamento e coleta de dados.

ABSTRACT

This work, shows the use of an accelerometer sensor in the evaluation of the vertical dynamics of a moving vehicle, through the development of a signal conditioning and data acquisition system for this sensor, as well as tests to perform analyzes of the collection system and sensor. It is also included a comparative study of the accelerometer sensor and a geophone sensor, which is installed in the experimental track of Weigh In Motion of LabTrans/UFSC research site. The development of the data acquisition equipment was validated using the accelerometer sensor and a calibration exciter. The sensitivity and frequency values calculated for the accelerometer, obtained through the test with the calibration exciter, were compared and validated with the sensors calibration certificate. For the evaluation of the sensors it was used a commercial data acquisition system and a controllable electrodynamic shaker. During the test with the electrodynamic shaker, a setup know as a back-to-back calibration was performed, where the sensors are installed one above the other. The test results brought knowledge about the sensors performance, allowing the understanding of the magnitudes that are being measured. In addition, it was obtained details on how to compatibilize the geophone signal with the accelerometer, as they measure different signals. The study achieved its demands, gaining knowledge over the accelerometer and geophone sensor, for the applicability of this sensors in the development of a vehicle dynamics measurement system, important for LabTrans/UFSC weigh in motion project.

Keywords: Back to back calibration. Geophone. Accelerometer. Signal conditioning and data acquisition system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de PPV	15
Figura 2 – Modelo conceitual PIAF	16
Figura 3 – Partes de um sensor acelerômetro do tipo IEPE	17
Figura 4 – Representação das vibrações de baixa e de alta frequência	19
Figura 5 – Representação gráfica da superposição das vibrações de baixa e de alta frequências.....	20
Figura 6 – Secção de sensor acelerômetro com tecnologia IEPE.....	23
Figura 7 – Partes internas de um geofone do tipo IEPE	24
Figura 8 – Curva de resposta típica de um sensor acelerômetro	26
Figura 9 – Vista superior de posição lateral de um veículo e leiaute básico de sistema de pesagem em movimento	29
Figura 10 – Resposta do sensor de pesagem para diferentes velocidades do veículo	30
Figura 11 – Ilustração das possíveis orientações de um veículo	30
Figura 12 – Fluxograma do programa desenvolvido para a coleta de dados	35
Figura 13 – Programa elaborado para controle e coleta de dados do sistema desenvolvido	36
Figura 14 – Interface do usuário durante ensaio com excitador de referência.....	37
Figura 15 – Placa com circuito eletrônico desenvolvido para o sensor acelerômetro	38
Figura 16 – Tela para configuração dos parâmetros da placa de aquisição de dados	40
Figura 17 – Circuito de alimentação e filtro passa altas	41
Figura 18 – Sistema de calibração VibrationVIEW e, em detalhe, a montagem <i>back to back</i>	45
Figura 19 – Equipamento comercial de controle, de condicionamento e de coleta de dados	46
Figura 20 – Excitador de referência e acelerômetro em teste	48
Figura 21 – Montagem <i>back to back</i> dos sensores e do excitador eletrodinâmico ...	49
Figura 22 – Parâmetros disponíveis no LabVIEW para cálculo da FFT	52
Figura 23 – Diagrama de balanceamento de um eixo.....	54

Figura 24 – Exemplo de máquina para balanceamento de eixos.....	55
Figura 25 – Aba de resultados da interface do <i>software</i> de balanceamento de eixos da NI.....	55
Figura 26 – Gráfico do estímulo manual do sensor acelerômetro	57
Figura 27 – Gráfico do cálculo da FFT referente ao estímulo manual do sensor acelerômetro	58
Figura 28 – Gráfico do cálculo da FRF do acelerômetro, convertido em escala dB, referente à caracterização do filtro passa altas	59
Figura 29 – Gráfico do sinal obtido pelo estímulo do excitador de referência	60
Figura 30 – Gráfico do cálculo da FFT do acelerômetro, convertido para sensibilidade, referente ao ensaio com excitador de referência.....	61
Figura 31 – Gráfico do cálculo da FRF dos acelerômetros, convertido para desvio de sensibilidade, referente ao ensaio com excitador eletrodinâmico até 6400 Hz	62
Figura 32 – Gráfico do cálculo da FRF dos acelerômetros, convertido para desvio de sensibilidade, referente ao ensaio com excitador eletrodinâmico até 25000 Hz	63
Figura 33 – Gráfico do cálculo da FRF do geofone, convertido para desvio de sensibilidade, referente ao ensaio com excitador eletrodinâmico até 200 Hz	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Trecho da tabela de arquivamento de dados coletados	51
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Lista e especificação de equipamentos e materiais	44
Quadro 2 – Lista de ensaios.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BNC – *Bayonet Neill Concelman*

CCO – Centro de Controle Operacional

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

ECP – Estação de Controle em Pista

FAPEU – Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária

FFT – Transformada Rápida de Fourier

FRF – *Frequency Response Function*

ICP® – *Integrated Circuit Piezoelectric*

IEPE – *Integrates Electronics Piezo-Electric*

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

IFSTTAR – Instituto Francês de Ciência e Tecnologia para Transportes,
Desenvolvimento e Redes

LabTrans – Laboratório de Transporte e Logística

LVA – Laboratório de Vibração e Acústica

NI – *National Instruments*

PIAF – Posto Integrado Automatizado de Fiscalização

PPV – Posto de Pesagem Veicular

QFV – Quadro de Fabricantes de Veículos

RMS – Raiz do Valor Quadrático Médio

RSE – *Reference Single Ended*

SI – Sistema Internacional de Unidades

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

USB – *Universal Serial Bus*

SUMÁRIO

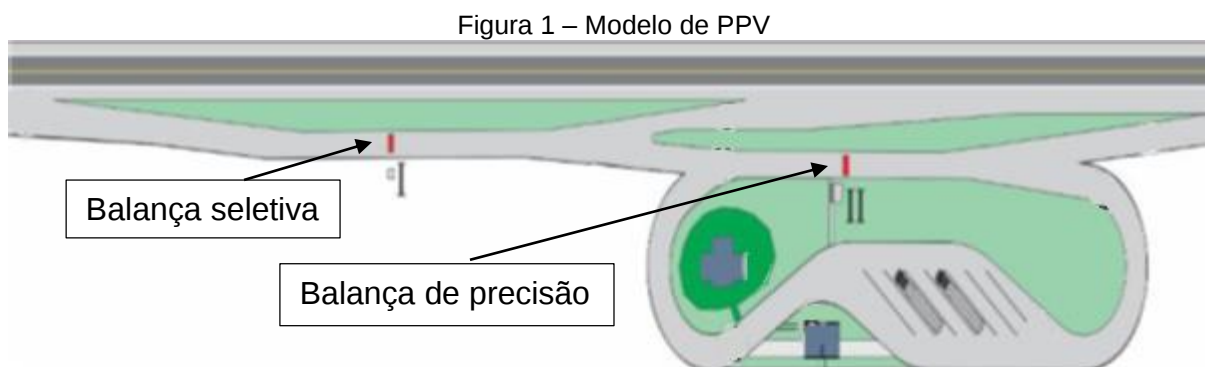
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Justificativa e relevância	17
1.2 Objetivo geral	18
1.3 Objetivos específicos.....	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Conceito de dinâmica veicular	19
2.2 Conceitos de aceleração e de velocidade	21
2.2.1 Aceleração	21
2.2.2 Velocidade.....	22
2.3 Sensores acelerômetros e geofones	22
2.3.1 Sensor acelerômetro	22
2.3.2 Sensor geofone	24
2.4 Calibração de sensores	25
2.4.1 Calibração de acelerômetros.....	26
2.4.2 Calibração de geofones.....	27
2.5 Pesagem em movimento	28
2.5.1 Temperatura.....	28
2.5.2 Sensibilidade lateral do sensor.....	28
2.5.3 Velocidade de deslocamento	29
2.5.4 Dinâmica do veículo	30
3 METODOLOGIA	32
3.1 Tipo de pesquisa	32
3.1.1 Classificação quanto aos objetivos da pesquisa – pesquisa exploratória	32
3.1.2 Classificação quanto à natureza da pesquisa – pesquisa qualitativa	33
3.1.3 Classificação quanto à escolha do objeto de estudo – experimento	33
3.2 Desenvolvimento e construção de um sistema de aquisição de dados	34
3.2.1 Lógica de construção e programação do sistema	34
3.2.1.1 Programação.....	35
3.2.1.2 Interface do sistema	36
3.2.2 Materiais.....	37

3.2.2.1 Sensores	37
3.2.2.1.1 Acelerômetro	38
3.2.2.1.2 Geofone.....	38
3.2.2.2 Condicionamento do sensor acelerômetro	38
3.2.2.3 Placa de aquisição de dados.....	39
3.2.3 Procedimento de construção	39
3.2.4 Verificação do funcionamento do sistema	42
3.3 Equipamentos para execução dos ensaios	44
3.3.1 Equipamentos e materiais	44
3.3.2 Procedimento dos ensaios	44
3.3.2.1 Montagem	45
3.3.3.2 Condicionamento de sinais e aquisição de dados.....	46
3.3.3.3 Controle do excitador eletrodinâmico	47
3.3.3.4 Parâmetros dos ensaios.....	47
3.3.3.4.1 Excitador de referência.....	47
3.3.3.4.2 Condicionamento de sinal	48
3.3.3.4.3 Excitador eletrodinâmico	48
3.3.3.5 Verificação do funcionamento do sistema de condicionamento e aquisição de dados desenvolvido.....	50
3.3.3.6 Estruturação dos dados coletados	50
3.3.3.6.1 Sistema de coleta de dados desenvolvido	50
3.3.3.6.2 Sistema de coleta de dados comercial	50
3.3.3.7 Estruturação dos relatórios de resultados analisados	51
3.4 Análise de dados	51
3.4.1 Análise do sistema de condicionamento e coleta de dados desenvolvido	52
3.4.2 Verificação dos parâmetros do sensor acelerômetro em teste.....	52
Os dados de interesse foram o sinal em que ocorrem o pico de frequência e a sua magnitude em RMS. A FFT foi calculada utilizando-se um bloco de programação do LabVIEW, a qual foi selecionada em virtude de seus parâmetros, conforme podem ser observados na Figura 21.....	53
3.4.3 Comparação entre os sensores acelerômetro.....	53
3.4.4 Comparação entre o geofone e o acelerômetro	53
3.5 Proposição de aplicação do sensor acelerômetro para trabalhos futuros ..	53
 4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	 57
4.1 Resultados obtidos	57

4.1.1 Ensaio de funcionamento do equipamento desenvolvido	57
4.1.2 Ensaio de caracterização do filtro passa altas desenvolvido.....	59
4.1.3 Ensaio com excitador de referência	59
4.1.4 Ensaio com excitador eletrodinâmico	61
4.1.4.1 <i>Ensaio back to back acelerômetros</i>	61
4.1.4.2 <i>Ensaio back to back geofone e acelerômetro</i>	63
4.2 Análise e discussão dos resultados	64
4.2.1 Ensaio de funcionamento do equipamento	64
4.2.2 Ensaio de caracterização do filtro passa altas desenvolvido.....	65
4.2.3 Ensaio com excitador de referência	65
4.2.4 Ensaio com excitador eletrodinâmico	65
4.2.4.1 <i>Ensaio back to back acelerômetros</i>	66
4.2.4.2 <i>Ensaio back to back geofone e acelerômetro</i>	66
 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	 67
 REFERÊNCIAS	 71
 ANEXO	 73
ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO SENSOR ACELERÔMETRO	74
ANEXO B – DATASHEET DO GEOFONE	75
ANEXO C – PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS USB-6008	76
ANEXO D – DATASHEET DO TRANSISTOR BC557C	77
ANEXO E – DOCUMENTAÇÃO DO MANUAL DA NI SOBRE BALANCEAMENTO DE EIXOS	78
ANEXO F – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO ACELERÔMETRO DE REFERÊNCIA	84

1 INTRODUÇÃO

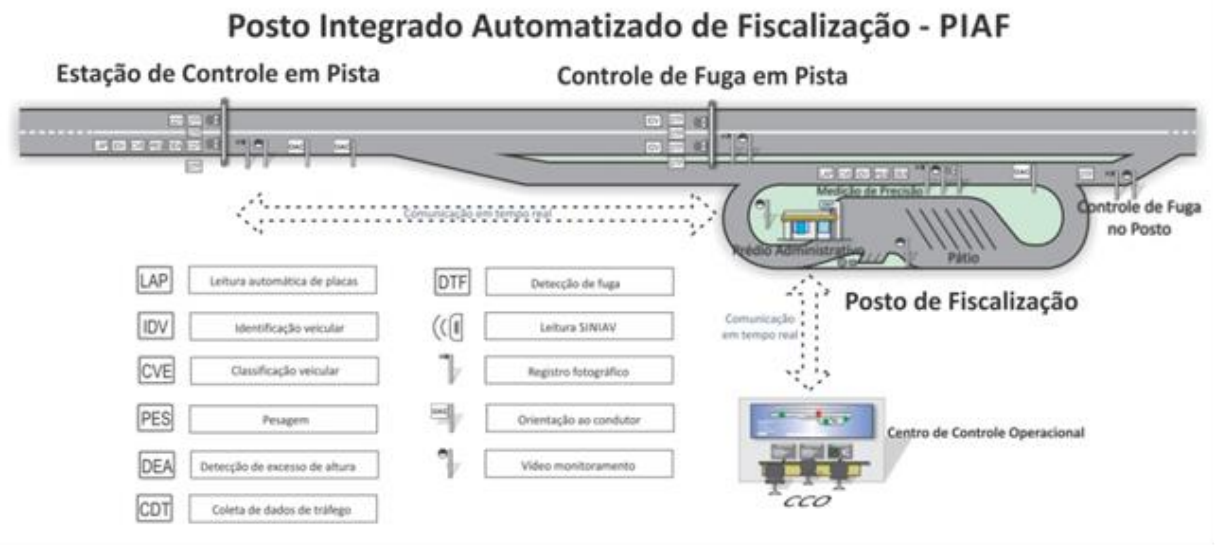
O transporte de cargas no Brasil é predominantemente realizado por caminhões, através das rodovias do país. A forma com que o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT, 2019) realiza a pesagem de veículos pesados é a mesma desde a década de 1970, com a implementação do antigo modelo dos Postos de Pesagem Veicular (PPV). Esse modelo faz com que todos os veículos de carga adentrem o posto e passem por uma balança de pré-seleção. Os veículos que potencialmente apresentam sobrepeso, de acordo com o manual de Quadro de Fabricantes de Veículos (QFV, 2012), são encaminhados à balança de precisão. A estrutura desse tipo de posto pode ser observada na Figura 1.



Fonte: Adaptado de Souza (2017, p. 19).

O DNIT está se atualizando tecnologicamente e criando um novo conceito de postos, chamado de Posto Integrado Automatizado de Fiscalização (PIAF), que visa facilitar e minimizar o impacto no tráfego, podendo ser observado na Figura 2. Existem duas principais diferenças no novo modelo: a primeira é que o agente rodoviário, responsável por lavrar as multas, não precisa mais estar presente no posto, pois está sendo implementado o Centro de Controle Operacional (CCO) remoto; a segunda, direcionada à parte tecnológica, é que a balança seletiva é instalada na via, onde o veículo é pesado na velocidade diretriz e é, em seguida, encaminhado automaticamente para a balança de precisão. Salienta-se que o novo formato de balança seletiva é intitulado de Estação de Controle em Pista (ECP).

Figura 2 – Modelo conceitual PIAF



Fonte: DNIT (2016), página web.

Idealizando-se um avanço tecnológico que promova a melhora da fiscalização direta, o Laboratório de Transporte e Logística (LabTrans, 2019), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC, 2019), em um projeto custeado pelo DNIT, está realizando um estudo que pensa em um método que funcionaria de forma semelhante a de um radar de velocidade, porém sendo um “radar de peso”, equipamento que deve ser totalmente automatizado e remoto. Esse modelo apresenta algumas barreiras para sua implementação, tanto legais quanto tecnológicas, sendo o seu principal interesse a qualidade metrológica de uma estação remota.

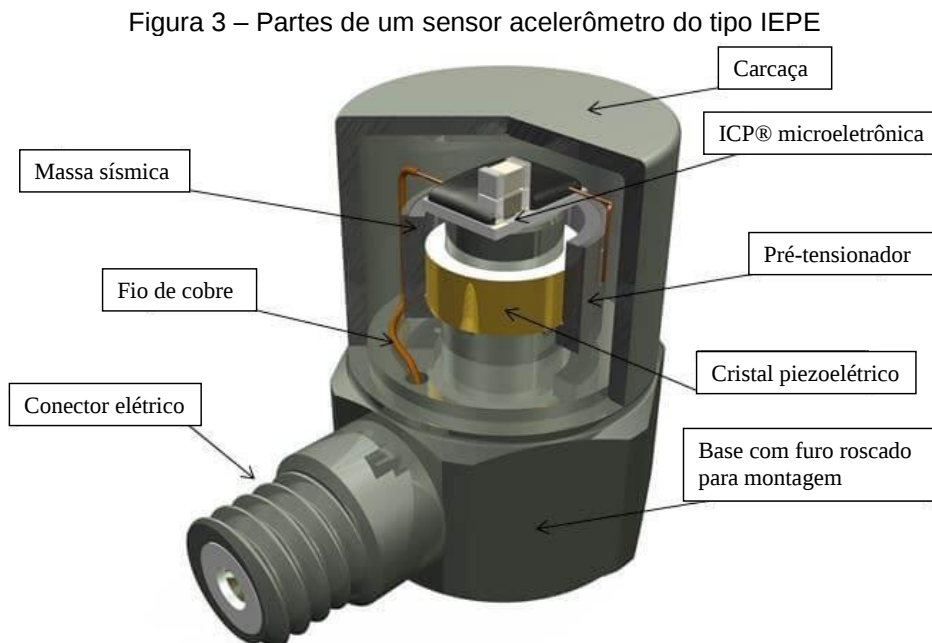
Um dos mais relevantes erros estudados em um sistema de pesagem em movimento pode ser considerado a dinâmica vertical da carga ao veículo quando este trafega pelo equipamento. Outros elementos de erro (como, por exemplo, a temperatura do pavimento e a posição lateral do veículo sobre o sensor) são, também, fatores de interesse na correção do peso do veículo em movimento sob análise. Uma das formas de medição que está sendo estudada pelo LabTrans/UFSC é o uso de uma malha de sensores que medem a velocidade de deslocamento do pavimento asfáltico, antes, durante e depois dos sensores de pesagem, prevendo-se o estado da carga durante a pesagem, o que possibilita a correção do peso mediante esses dados.

Considerando-se o contexto acima descrito, este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) visa caracterizar o uso de sensores do tipo acelerômetro, elaborando-se toda a montagem em bancada e utilizando-se de equipamentos do Laboratório de

Vibração e Acústica (LVA, 2019), da UFSC, para caracterizar o uso de um sensor acelerômetro na avaliação da dinâmica de um veículo em movimento.

1.1 Justificativa e relevância

Este TCC pretende auxiliar no desenvolvimento de um segmento do projeto de pesquisa de pesagem em movimento do LabTrans/UFSC, fomentado pelo DNIT, por intermédio da Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária (FAPEU, 2019). É válido mencionar que esse laboratório dispõe de oito sensores do tipo acelerômetro, os quais devem ser utilizados na instrumentação de um veículo de testes. Aliás, os acelerômetros são da tecnologia *Integrated Electronics Piezo-Electric* (IEPE), também comumente conhecida como *Integrated Circuit Piezoelectric* (ICP®). Na Figura 3, pode ser observado um acelerômetro típico do tipo IEPE. Esse tipo de sensor requer uma fonte de corrente constante, a qual foi construída para os ensaios elaborados neste TCC. Salienta-se, ainda, que está disponível no LVA um sistema comercial de coleta de dados que servirá para avaliar, de forma comparativa, o desempenho do sistema desenvolvido.



Fonte: Traduzido de PCB PIEZOELECTRONICS (s/d), página web.

Ao se estudar as características do acelerômetro no TCC e ao gerar o conhecimento técnico referente a essa tecnologia, será possível, futuramente, mensurar a dinâmica vertical de um veículo de testes, durante passagens controladas na pista de testes de pesagem. Com isso, é razoável considerar a possibilidade de confrontar os dados mensurados com os dados dos sensores instalados no pavimento desse mesmo trecho. A pista de testes é um sítio de pesagem em movimento localizado na cidade de Araranguá/SC, percorrendo um trecho de, aproximadamente, dois quilômetros da BR-101, no sentido sul. Dentre as tecnologias implementadas no trecho de testes, recentemente, foi instalada uma malha de geofones antes e depois das balanças de pesagem em movimento de alta velocidade, em um trecho com cerca de 40 metros de comprimento, para prever, no momento em que o veículo é pesado, sua dinâmica vertical.

1.2 Objetivo geral

Este TCC tem o objetivo principal de: caracterizar o uso de um sensor do tipo acelerômetro, na avaliação da dinâmica vertical de um veículo em movimento de alta velocidade, no âmbito da pesagem veicular.

1.3 Objetivos específicos

Para atender ao objetivo principal deste trabalho, será necessário concluir os objetivos específicos:

- estudar os diferentes tipos de sensores acelerômetros aplicados em veículos;
- elaborar um sistema eletroeletrônico para a alimentação, o condicionamento e a coleta de dados de sensor acelerômetro;
- realizar ensaios dos sensores em excitadores eletrodinâmicos;
- analisar os dados gerados nos ensaios;
- estruturar relatório com as informações relevantes obtidas;
- propor o uso do sensor acelerômetro estudado em um exemplo.

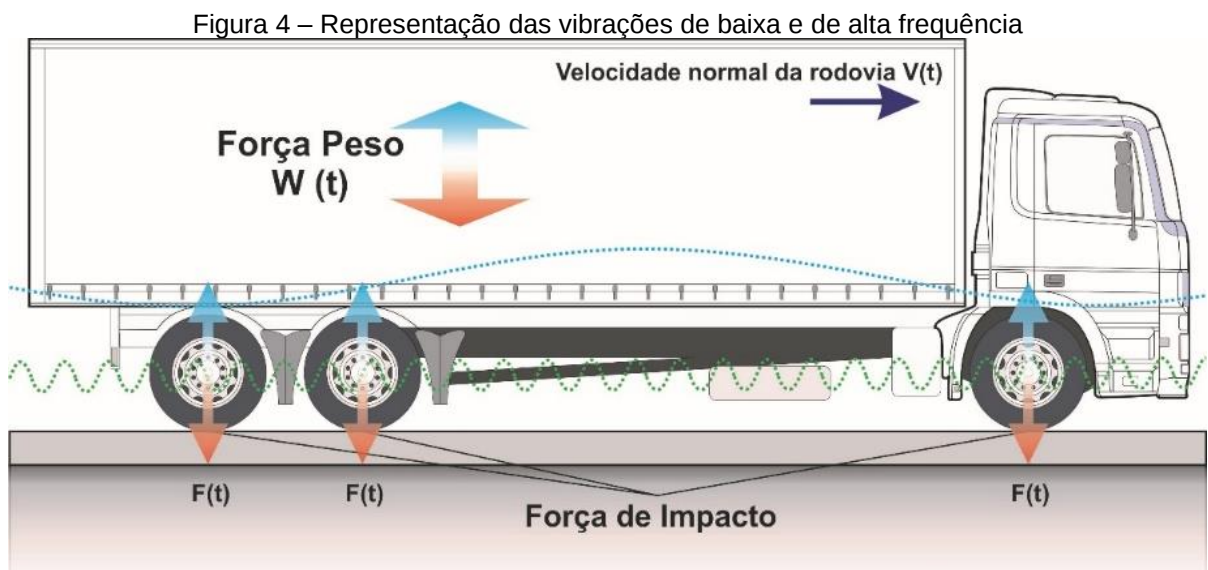
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo revela informações acerca do conteúdo teórico para a elaboração deste TCC, tanto quanto a busca na literatura sobre o assunto.

Primeiramente, comenta-se sobre os conceitos de dinâmica vertical veicular e das medidas físicas de aceleração e de velocidade. Em seguida, explana-se sobre sensores acelerômetro e geofone, que medem aceleração e velocidade, respectivamente. Após a explicação dos tipos de sensores utilizados neste TCC, parte-se para a teoria de calibração de sensores. Assim, conduz-se para o mérito da pesagem em movimento e suas atribuições.

2.1 Conceito de dinâmica veicular

A dinâmica veicular está relacionada ao comportamento de um veículo em locomoção, durante a qual ocorrem vibrações de baixa e de alta frequência. As vibrações de baixa frequência são a resposta da massa elasticamente sustentada na interação entre carga transportada e suspensão. Por sua vez, as de alta frequência estão relacionadas à resposta da massa não elasticamente sustentada e correspondem à vibração do contato do pneu com o pavimento (CEBON, 1991). A Figura 4 ilustra um caminhão com as vibrações de baixa e de alta frequência representadas pelas linhas pontilhadas em azul e em verde, respectivamente.



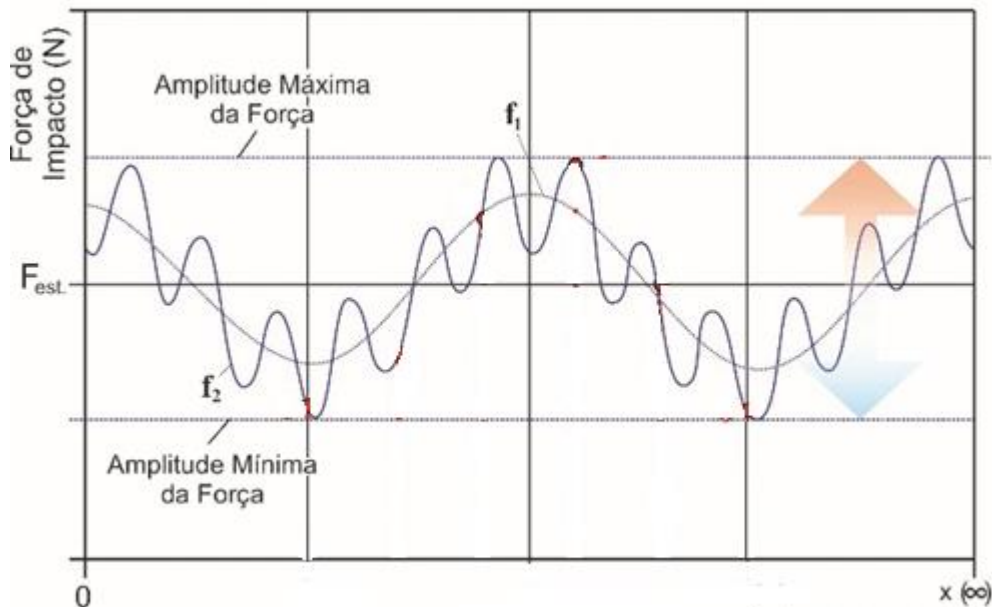
Fonte: DNIT (2011).

As oscilações do veículo são sobrepostas devido ao impacto gerado sobre o pavimento. A medição dessas oscilações pode ser realizada de diferentes formas, por exemplo, dependendo do local de instalação de sensores, sendo influenciada pelo comportamento das vibrações de alta e de baixa frequências. A medição com sensores instalados no pavimento onde um veículo trafega vai apresentar uma curva que mostra a mistura de ambos os sinais de baixa e de alta frequência. De forma análoga, a instalação de sensores no chassi de um veículo também demonstra a composição dessas frequências. Somente quando o sensor estiver instalado na carroceria ou no eixo das rodas seria possível medir separadamente a oscilação.

É possível entender essa lógica quando se raciocina sobre a absorção de impacto pelo amortecedor de um veículo, componente que pode ser interpretado como um filtro passa baixas, pois, por mais que a roda vibre em uma alta frequência, o amortecedor absorve os impactos e transmite para a cabine somente baixas frequências. O uso de filtros digitais e as análises no domínio da frequência podem ser utilizados para decompor e para caracterizar essas frequências nos sensores instalados tanto no chassi quanto no pavimento.

A representação da superposição das vibrações de alta e de baixa frequências podem ser visualizadas na Figura 5.

Figura 5 – Representação gráfica da superposição das vibrações de baixa e de alta frequências



Fonte: DNIT (2011).

As vibrações de um veículo, quando analisadas no domínio da frequência, resultam em baixas frequências na ordem de 1,5 Hz a 4,5 Hz, para a massa elasticamente sustentada, e nas altas frequências na ordem de 8 Hz a 15 Hz, para a massa não elasticamente sustentada (CEBON, 1990).

2.2 Conceitos de aceleração e de velocidade

No âmbito da pesagem em movimento de veículos, umas das contribuições no erro do cálculo do peso é a oscilação do veículo. Para aumentar a precisão de um sistema de pesagem, é interessante medir essas oscilações e prever, no momento da pesagem, se o veículo está comprimindo ou se está flutuando no momento da pesagem e, com isso, aplicar um fator de correção para ele, mediante informações de calibração do sistema.

De acordo com Albertazzi e Sousa (2013, p. 3), a medição é “[...] o procedimento experimental pelo qual o valor momentâneo de uma grandeza física (mensurando) é determinado como um múltiplo e/ou uma fração de uma unidade, estabelecida por um padrão e reconhecida internacionalmente”. Aliás, existem duas formas básicas de medição: por comparação, que determina o valor do mensurando comparando-se com um segundo objeto de referência; e por indicação que apresenta, para o usuário, em uma forma visual, o valor mensurado (ALBERTAZZI; SOUSA, 2013).

O conceito da grandeza física de aceleração e velocidade são descritas nas seções subsequentes.

2.2.1 Aceleração

O conceito físico da aceleração é quando um objeto, ou partícula, altera sua velocidade no tempo. Ou seja, ao se alterar a velocidade de algo no tempo, é possível calcular a aceleração desse objeto. A unidade de aceleração no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o metro por segundo ao quadrado, m/s^2 .

Segundo Halliday & Resnick (2016, p. 20), à medida que “[...] a velocidade de uma partícula varia, diz-se que a partícula sofreu uma aceleração (ou foi acelerada)”. Assim, “[...] a aceleração de uma partícula em um dado instante é a taxa com a qual a velocidade está variando nesse instante.”.

2.2.2 Velocidade

A velocidade é uma forma de expressar o deslocamento de algo no tempo. Essa grandeza física é diretamente relacionada à aceleração, e vice-versa. Pode-se calcular a velocidade a partir de uma medida de aceleração, e a forma mais comum para isso é integrar a velocidade para se obter um valor de aceleração, ou seja, aplicar a fórmula matemática da integral. Para calcular a velocidade a partir da aceleração, deve-se derivar a aceleração, o que significa aplicar a fórmula matemática da derivada. A unidade da velocidade no SI é o metro por segundo, m/s.

Conforme Halliday & Resnick (2016, p. 18),

[...] quando falamos “rapidez”, em geral estamos pensando na rapidez com a qual um objeto está se movendo em um determinado instante, ou seja, na velocidade instantânea (ou, simplesmente, velocidade), v . A velocidade em um dado instante é obtida a partir da velocidade média reduzindo o intervalo de tempo Δt até torná-lo próximo de zero.

Ao se ter o conhecimento acerca dessas grandezas físicas, parte-se para a explanação de dois tipos de sensores que podem ser utilizados para realizar a medição da aceleração e da velocidade.

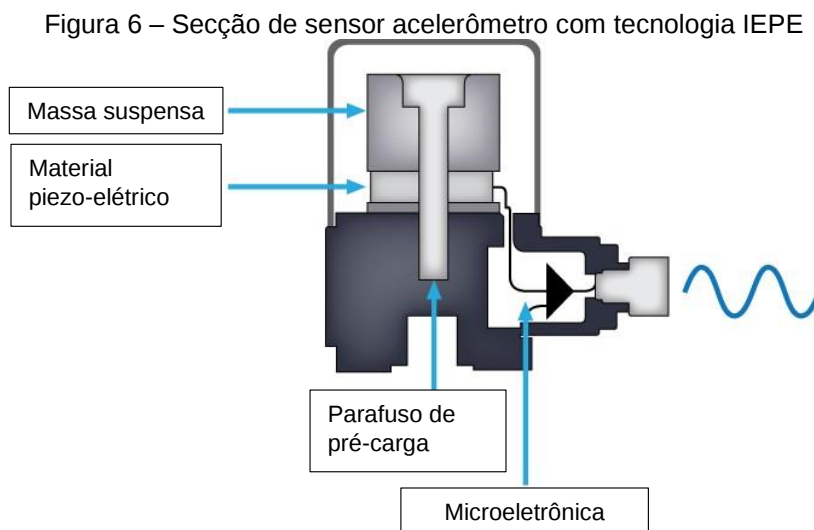
2.3 Sensores acelerômetros e geofones

Em um sistema de medição, o transdutor é o componente que está em contato com o objeto a ser medido. Nesse caso, o transdutor pode ser considerado o sensor, o qual é sensibilizado diretamente pelo objeto, traduzindo os efeitos físicos em outros efeitos de natureza compatíveis com um sistema de medição (ALBERTAZZI; SOUSA, 2013). Neste trabalho, dois tipos de sensores serão utilizados, um para medir a aceleração e outro para medir velocidade, respectivamente, os quais são apresentados nos itens a seguir.

2.3.1 Sensor acelerômetro

Os acelerômetros são muito utilizados na instrumentação de testes em veículos para a medição de vibrações, sejam elas em testes de colisão sejam em testes de conforto do veículo. No entanto, é válido lembrar que este trabalho visa à aplicação na pesagem em movimento. O princípio físico de construção desse sensor é uma massa padrão suspensa, fixada a um material capaz de gerar uma grandeza

física mensurável. Na Figura 6, pode ser observado um exemplo de sensor acelerômetro do tipo piezo-elétrico, além de ser exibida sua construção interna.



Fonte: Traduzido de *National Instruments* (2019), página web.

Os materiais utilizados para a medição da aceleração são os piezo-elétricos, eletro-magnéticos, capacitivos e ópticos. Os sensores piezo-elétricos são os mais comuns para detecção do movimento de aceleração, e algumas das principais qualidades desses tipos de sensores são: a tolerância à temperatura; a amplitude na frequência de funcionamento; a simplicidade no circuito de leitura; e entre outras (AMIN et. al. 2014). O funcionamento do cristal piezo-elétrico é semelhante ao funcionamento de um capacitor, no qual se torna mais permissível a passagem de energia ou menos permissível, à medida que é comprimido ou alongado pela massa suspensa no sensor.

A caracterização dos parâmetros de calibração dos sensores acelerômetros é, normalmente, informada no seu certificado. Os parâmetros, como, sensibilidade, faixa de frequência de funcionamento e porcentagem dos erros, são as principais características a serem avaliadas. Assim, a sensibilidade de um acelerômetro, por exemplo, é, geralmente, apresentada em mV/g, ou seja, um valor de tensão em mili-volts para cada uma unidade de força de gravidade. No que diz respeito à frequência de funcionamento, é comum apresentar, no certificado de calibração, os valores em que o sensor tem a resposta mais linear possível e sua precisão nessa faixa, tanto quanto um gráfico mostrando o funcionamento desde as baixas frequências até a frequência de ressonância, que é em altas frequências.

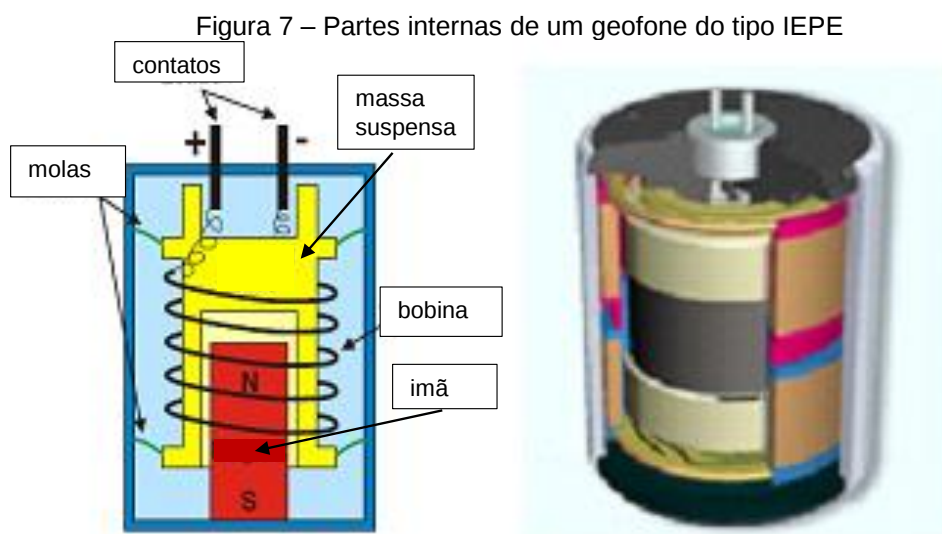
2.3.2 Sensor geofone

A medição da vibração da terra é comumente realizada com sensores geofones, sendo um instrumento que é largamente utilizado para registrar as ondas sísmicas. O geofone também vem sendo empregado na área de pesquisa de pesagem em movimento, por ser um sensor de fácil instrumentação e por ter um baixo custo de implementação, sendo instalado no pavimento. No Instituto Francês de Ciência e Tecnologia para Transporte, Desenvolvimento e Redes (IFSTTAR), que é referência na pesquisa de pesagem em movimento e dimensionamento de pavimentos, foi construído um carrossel de ensaios de fadiga, sendo fonte de pesquisa sobre diversas tecnologias da área em questão.

Segundo Otto (2019, p. 176-177),

Montagem: colados dentro do pavimento com resina de preenchimento específica. Princípio de funcionamento: mede velocidade de deslocamento unidirecional (m/s); quando o sinal é integrado no tempo, o deslocamento pode ser estimado. São instrumentos concebidos para serem sensíveis somente a um sentido, nesse caso deslocamentos verticais. Função: medir a velocidade de deslocamento da estrutura do pavimento e, assim, inferir os deslocamentos verticais, ou deformação, do pavimento sob o efeito do carregamento.

Na Figura 7, pode ser visto um diagrama da construção de um sensor geofone e suas partes internas, ao lado da vista de uma secção interna de um geofone comum.



Fonte: Traduzido de Deutsches Elektromen – Synchrotron (DESY, 2008), página web.

Os elementos de um geofone são um ímã e uma bobina enrolada em uma massa conhecida suspensa por molas, tudo isso no interior de uma carcaça geralmente cilíndrica. A movimentação da carcaça faz com que o ímã, preso em seu interior, movimente-se. Como a bobina está enrolada na massa suspensa pelas molas, ela tende a ficar estacionária, e, conseqüentemente, gera-se uma alteração no campo magnético, provocando-se energia através da bobina. A energia gerada pelo geofone, quando está em movimento, é medida em volts e é proporcional à velocidade de deslocamento dele.

Os parâmetros do sensor geofone são iguais entre os mesmos modelos desse sensor, pois, devido à sua construção, é garantido pelo fabricante que todos estarão dentro dos parâmetros estabelecidos no manual do sensor. Os parâmetros, como, sensibilidade, frequência natural de ressonância e porcentagem dos erros, são as principais características a serem avaliadas. A sensibilidade de um acelerômetro é, muitas vezes, apresentada em mV/m/s, ou seja, um valor de tensão em volts para cada uma unidade de velocidade instantânea.

2.4 Calibração de sensores

A necessidade de se calibrarem sensores e sistemas de medição se justifica, principalmente, para que se melhore a precisão de um sistema, tendo em vista que a construção do sensor ou a montagem de um sistema de medição não serão físico-eletricamente idênticos, diminuindo-se a qualidade de uma possível medição. Ao se conhecerem os parâmetros de um sistema, é possível aumentar a sua precisão por meio de fatores ou de funções de correção da medição.

Desse modo, é válido mencionar que, antes de serem exibidas as calibrações de acelerômetros e de geofones, de acordo com Albertazzi; Sousa (2013, p. 127),

Calibração é o conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões.

A região mais indicada para se utilizar o sensor acelerômetro é a parte linear de sua resposta (marcado como “região de uso” no gráfico da Figura 8), pois sua resposta deve ser diretamente proporcional à aceleração que está sendo medida. É nessa parte linear de resposta que se garante uma razão fixa entre sinal de saída do sensor ao estímulo imposto ao sensor. Assim, a “região de uso” se estende por, aproximadamente, 1/3 a 1/2 da frequência de ressonância do sensor. A área plana também deve ser definida, sendo, normalmente, delimitada por $\pm 5\%$ ou $\pm 10\%$, ou em dB, geralmente, em ± 3 dB. Em baixas frequências, existe uma diminuição na sensibilidade do sensor, e, em altas frequências, existe uma hipersensibilidade do sensor, perto da ressonância dele, tornando-se zonas de difícil uso do sensor.

De forma análoga, como mencionado, existe a calibração utilizando um sensor acelerômetro de referência e o sensor em teste, simultaneamente. Essa técnica, chamada de *back to back calibration*, consiste em montar um sensor sobre o outro, instalando ambos em um excitador eletromecânico. A instalação dos sensores nesse formato permite medir, de forma concomitante, o estímulo imposto pelo excitador, gerando-se, com isso, um sinal de referência do sensor de referência e um sinal a ser avaliado para calibração, do sensor em teste.

2.4.2 Calibração de geofones

Os sensores geofones possuem resposta semelhante à dos acelerômetros, porém medindo-se a velocidade e não a aceleração. O procedimento pelo qual esses tipos de sensores podem ser calibrados é similar ao dos acelerômetros, inclusive utilizando os mesmos equipamentos. Com isso, é obtido, como resposta, um gráfico quase idêntico entre os sensores. A principal diferença, aliás, dá-se na faixa de funcionamento do geofone, pois, geralmente, ele é limitado a baixas frequências quando comparado ao acelerômetro.

Segundo Roset et al. (2011, p. 1, traduzido pelo autor),

A caracterização de um geofone não envolve somente o conhecimento sobre a resposta da construção do sensor, esses parâmetros já são fornecidos pelo fabricante, mas também identificar o sistema de medição como um todo, pois eles estão conectados entre si, e, também, ocorrem diferenças na instalação e na fixação do sensor.

2.5 Pesagem em movimento

A partir da calibração dos sensores a serem utilizados em um sistema de medição de um veículo em movimento, parte-se para a pesagem propriamente dita.

Na pesagem em movimento, existem quatro principais fontes de erros na pesagem, sendo duas delas inerentes ao sensor (a deriva térmica e sensibilidade lateral do sensor) e duas inerentes ao veículo (a velocidade de deslocamento e a dinâmica do veículo em movimento), as quais serão expostas nos subcapítulos que seguem.

2.5.1 Temperatura

Todos os materiais sofrem alguma alteração com a mudança de temperatura, seja em menor ou em maior escala. Isso faz com que os sensores de pesagem tenham suas propriedades físico-elétricas alteradas também em função da temperatura, modificando-se a sua sensibilidade, efeito este chamado de deriva térmica (Otto, 2019 p. 65). Existem fabricantes que afirmam que seu sensor praticamente não possui deriva térmica significativa (Kistler, 2018 p. 1), porém, quando se trata de sistemas de alta precisão, essa influência deve ser considerada.

A temperatura também influencia na rigidez de um pavimento asfáltico flexível, devido às características visco-elásticas da estrutura do pavimento. Dessa forma, uma vez que a compressão resultante dos sensores é dependente da reação do pavimento no qual o sensor está apoiado, a alteração da rigidez do pavimento com a temperatura também tem influência no resultado da pesagem.

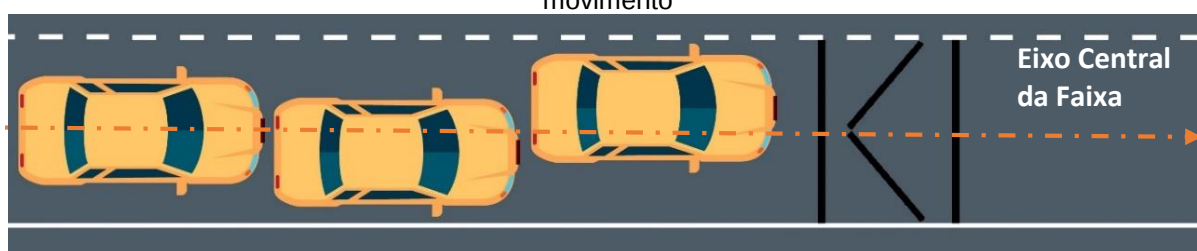
A temperatura é um fenômeno bastante conhecido e de fácil monitoramento, podendo ser uma variável incorporada aos cálculos de peso do veículo sem maiores complicações.

2.5.2 Sensibilidade lateral do sensor

A posição lateral de um veículo na via é influenciada, principalmente, por dois fatores: o trilho de roda formado na rodovia e os hábitos de condução do motorista (além dos fatores de contorno da via que não são controláveis). Para realizar a

medição da posição do veículo, sensores de pesagem podem ser instalados inclinado no pavimento. Os sensores de pesagem são barras instaladas, de forma transversal (para a pesagem em movimento), no pavimento por toda a largura da faixa. Uma imagem com a vista superior, com diferentes posições de um veículo sobre a faixa de rolagem, pode ser observada na Figura 9. Nessa mesma imagem, pode-se verificar, também, um leiaute básico de um sistema de pesagem (linhas de cor preta) com capacidade de identificar a posição lateral do veículo e seu peso.

Figura 9 – Vista superior de posição lateral de um veículo e leiaute básico de sistema de pesagem em movimento



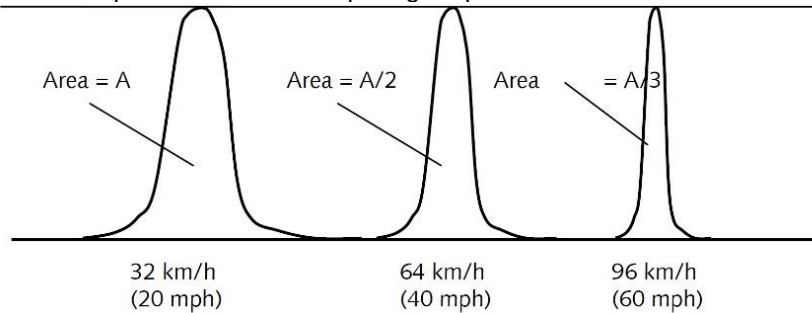
Fonte: Elaboração própria (2019).

Devido aos princípios de construção e de funcionamento dos sensores de pesagem, é notável uma diferença na sensibilidade lateral do sensor, acarretando-se em incertezas de medição, já que podem ser diferentes para cada seção do sensor. Nesse sentido, a caracterização da curva de sensibilidade do sensor deve ser identificada e corrigida para se atingirem maiores níveis de desempenho dos sistemas de pesagem. Essa técnica é amplamente utilizada nos sistemas de pesagem em movimento, e seus cálculos são simples, pois possuem fundamento na geometria da instalação dos sensores no pavimento.

2.5.3 Velocidade de deslocamento

A influência da velocidade sobre o sinal do sensor é determinante, pois quanto mais rápido o veículo trafegar sobre o sensor, menor será o tempo de sensibilização deste. A consequência disso é que a área da curva do sinal adquirido pelos sensores será proporcional à velocidade, sendo esse um fator importante para o cálculo do peso. Matematicamente, a área abaixo da curva do sinal do sensor é inversamente proporcional à velocidade do veículo. A Figura 10 ilustra a resposta do sinal de um sensor para três velocidades diferentes.

Figura 10 – Resposta do sensor de pesagem para diferentes velocidades do veículo



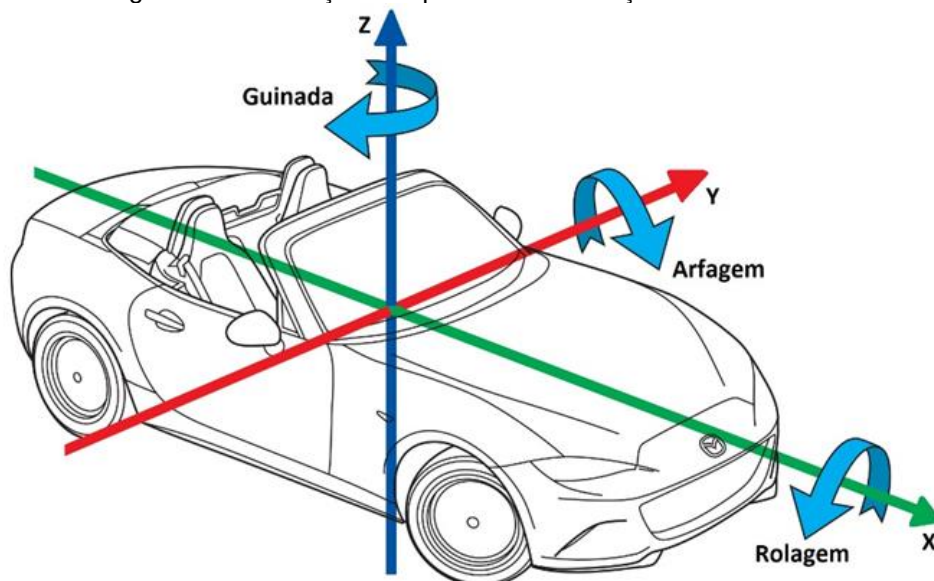
Fonte: KISTLER (2004).

O cálculo da velocidade é realizado com os próprios sensores de pesagem. Assim, sabendo-se a distância entre os sensores e o tempo em que a roda passou pelos dois sensores, pode-se obter o cálculo da velocidade, realizando-o pela fórmula $V = \Delta x / \Delta t$.

2.5.4 Dinâmica do veículo

Devido à presença de irregularidades no pavimento, o veículo trafega com uma determinada oscilação, que pode ser decomposta em três movimentos: a rotação em torno do eixo vertical “Z” (guinada); a rotação em torno do eixo “X” (rolagem); e a rotação em torno do eixo “Y” (arfagem). A Figura 11 representa os possíveis movimentos em um veículo.

Figura 11 – Ilustração das possíveis orientações de um veículo



Fonte: Elaboração própria (2019).

Esses tipos de movimento estão relacionados diretamente ao sistema de suspensão do veículo e, principalmente, à superfície do pavimento de rolagem. Novas tecnologias estão sendo desenvolvidas para a avaliação da dinâmica vertical na pesagem em movimento, visando ao melhoramento na acurácia dos sistemas com o uso de fatores de correção. O princípio da tecnologia é prever a oscilação do veículo no momento em que as rodas passam pelo sensor, ou seja, ter o conhecimento se a carga do veículo está “flutuando” ou se está “comprimindo” no momento da pesagem.

Otto (2019, p. 78) explica que a irregularidade

[...] e a falta de planicidade no pavimento antes e depois dos sensores induzem a oscilações nos eixos e nos chassis do veículo, que geram oscilações nos conjuntos massa suspensa e veículo trator que pioram a precisão das medidas em alta velocidade.

3 METODOLOGIA

O capítulo da metodologia percorrerá cinco etapas: iniciando-se pela caracterização do tipo de pesquisa; passando-se pelo desenvolvimento e pela construção do equipamento de coleta de dados; conduzindo-se para especificação e apresentação dos equipamentos necessários para o desenvolvimento da pesquisa e dos ensaios; descrevendo-se a forma com que foram realizadas as análises dos dados; e, por fim, fazendo-se a proposição de uso do sensor acelerômetro estudado neste TCC.

3.1 Tipo de pesquisa

Com o uso de técnicas e de procedimentos científicos, é possível definir, por meio de projeto racional e sistemático, a pesquisa, obtendo-se resultados pertinentes aos questionamentos elaborados para a pesquisa.

Dessa forma, apresenta-se neste capítulo a classificação da pesquisa utilizada no presente trabalho no que se refere aos seus objetivos, à sua natureza e quanto ao objeto de estudo.

3.1.1 Classificação quanto aos objetivos da pesquisa – pesquisa exploratória

A pesquisa exploratória acerca deste trabalho busca desenvolver o estudo sobre o sensor acelerômetro do tipo IEPE. Conforme explana Gil (2008, p. 27), essas pesquisas de caráter exploratório “[...] têm como principal finalidade desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, tendo em vista a formulação de problemas mais precisos ou hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores”.

Convergingo a isso, este trabalho desenvolve e constrói um equipamento de coleta de dados, aplicado ao uso do sensor acelerômetro, que, posteriormente, será testado em ensaios controlados em laboratório. Para realizar a construção do equipamento e para definir os ensaios, o pesquisador teve de buscar informações desde a natureza física do que está sendo medido até a melhor forma de representar, de forma analítica, a grandeza medida.

3.1.2 Classificação quanto à natureza da pesquisa – pesquisa qualitativa

Este trabalho centra-se em questões de estudo no âmbito da pesagem em movimento, o qual o autor tem interesse em examinar, por meio de um estudo de caso, a caracterização do uso de um sensor acelerômetro para a instrumentação veicular.

A abordagem da pesquisa é de caráter qualitativo porque ela busca entender e explicar o funcionamento dos sensores analisados. Dessa maneira, os dados levantados nos ensaios são analisados para identificar o funcionamento do sistema de condicionamento e coleta de dados dos sensores, tanto quanto as características físico-elétricas do acelerômetro e geofone. Para a técnica de coleta de dados, utilizaram-se métodos padrão de ensaios para o tipo de sensor utilizado neste trabalho em conjunto com equipamentos de referência, como os *shakers* e o acelerômetro de referência.

Segundo Moresi (2003, p. 70) “[...] a pesquisa qualitativa é freqüentemente descrita como sendo essencialmente indutiva em sua abordagem, simplificando que a mesma é conduzida pelos dados, sendo os resultados e conclusões extraídos diretamente destes últimos”.

De acordo com Triviños (1987, apud OLIVEIRA, 2011, p. 24), “[...] a abordagem de cunho qualitativo trabalha os dados buscando seu significado, tendo como base a percepção do fenômeno dentro do seu contexto”.

3.1.3 Classificação quanto à escolha do objeto de estudo – experimento

Por se tratar de condições controladas de pesquisa, este trabalho se enquadra como experimento, pois consiste na execução de ensaios de bancada em laboratório, obtendo-se controle sobre as variáveis pertinentes ao estudo do acelerômetro e os equipamentos utilizados para testá-lo.

Para Gil (2008, p. 52), de modo essencial, “[...] o delineamento experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto”.

As etapas do estudo da caracterização do sensor acelerômetro envolveram desde a formulação do problema, que seria a necessidade da medição da dinâmica

de um veículo para a pesagem em movimento, até a apresentação de conclusões. Inicialmente, ocorreu a definição do plano experimental, com o apoio do LVA, seguida da realização dos ensaios, da coleta de dados, da análise e, mais adiante, da interpretação desses dados.

3.2 Desenvolvimento e construção de um sistema de aquisição de dados

A criação de um sistema de coleta de dados é distinta para cada tipo de grandeza física a ser medida. Para o desenvolvimento deste trabalho, foi estabelecida a premissa do uso de sensores acelerômetros do tipo IEPE, disponíveis no LabTrans/UFSC, e, também, foi disponibilizada uma placa de aquisição de dados da marca *National Instruments* (NI, 2019).

O sensor acelerômetro do tipo IEPE possui microeletrônica embarcada, tendo como principal característica a necessidade de alimentação por fonte de corrente constante. Esse tipo de sensor é interessante nessa aplicação, pois simplifica o cabeamento, necessitando-se somente de um cabo coaxial que compartilha o sinal e a alimentação, porém sua eletrônica de condicionamento de sinal deve ser bem dimensionada para não atenuar ou eliminar o sinal obtido pelo sensor, o que foi verificado durante os testes de funcionamento do equipamento desenvolvido.

A placa de aquisição de dados converte os sinais analógicos para dados digitais, estes que podem ser manipulados pelo computador, gerando as informações pertinentes para a medição da grandeza física em questão. Nesse equipamento, a atenção é voltada, principalmente, para a quantidade de canais analógicos, para a resolução e para a frequência de aquisição.

Nos subitens que seguem, são apresentados o desenvolvimento, a construção do sistema de condicionamento e a aquisição de dados.

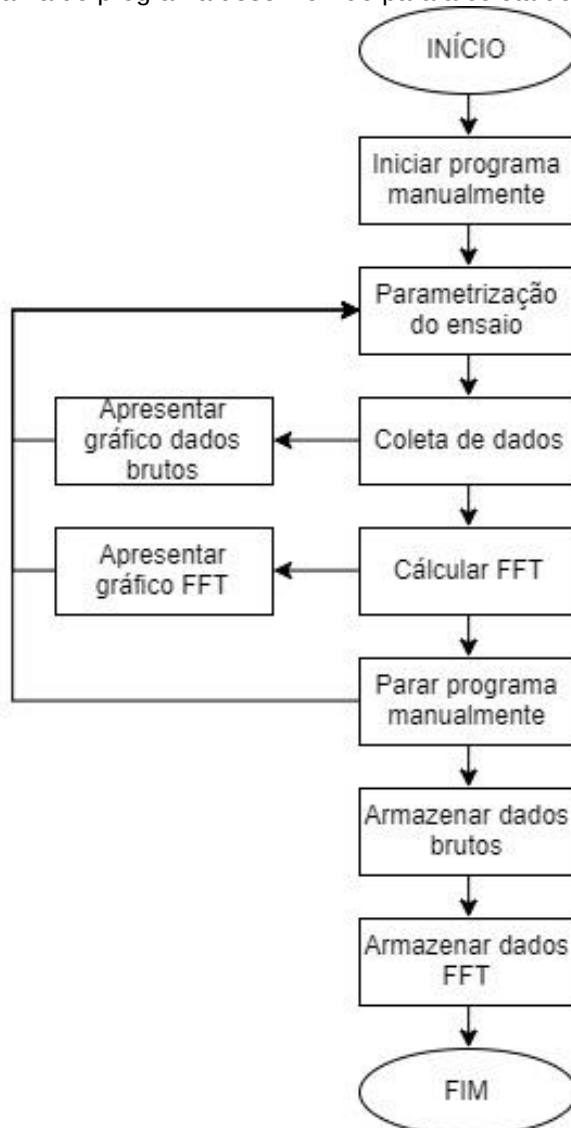
3.2.1 Lógica de construção e programação do sistema

A plataforma de programação utilizada no desenvolvimento deste trabalho foi o LabVIEW. Essa interface de programação possui duas telas de desenvolvimento, uma de programação e uma interface de operação e de interação com o usuário.

3.2.1.1 Programação

A programação no LabVIEW é do tipo em blocos, em que cada bloco equivale a uma operação ou a uma atividade, como, por exemplo, um bloco para acessar a porta analógica da placa de aquisição de dados, e outro bloco para realizar a leitura do mesmo canal. Na Figura 12, pode ser visto o fluxograma do *software* desenvolvido.

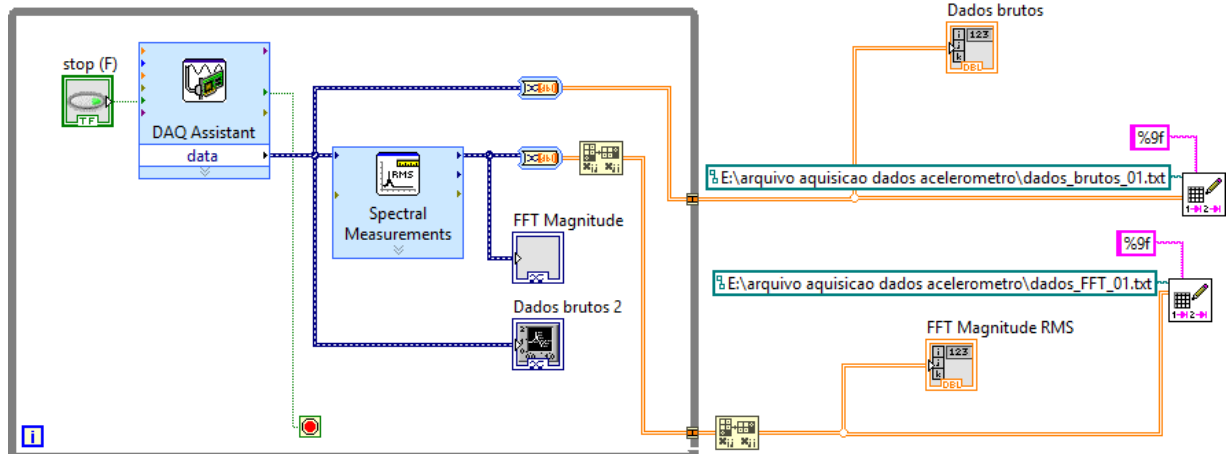
Figura 12 – Fluxograma do programa desenvolvido para a coleta de dados



Fonte: Elaboração própria (2019).

Com o desenvolvimento do fluxograma para a coleta de dados, foi elaborada a programação por blocos no LabVIEW. Na Figura 13, pode ser observada a programação do *software* de coleta de dados desenvolvido para este trabalho.

Figura 13 – Programa elaborado para controle e coleta de dados do sistema desenvolvido



Fonte: Elaboração própria (2019).

O programa exibido na Figura 13 tem um laço *while*, e, contido nele, o bloco de controle dos parâmetros da coleta de dados dos canais da placa de aquisição de dados (bloco *DAQ Assistant*). Os parâmetros utilizados foram: frequência de aquisição, em 5kHz; faixa de leitura do canal analógico, em ± 2 V; e modo de aquisição, em *Reference Single Ended* (RSE). Dentro do mesmo laço, foram colocados um bloco para cálculo da Transformada Rápida de Fourier (FFT – bloco *Spectral Measurement*) e um gráfico de apresentação da magnitude em Raiz do Valor Quadrático Médio (RMS) instantâneo. Ao finalizar o processo de coleta de dados, tem-se, fora do laço, o arquivamento dos dados brutos obtidos no computador, com formato de tabela em texto.

3.2.1.2 Interface do sistema

Para a interface de visualização de dados, em tempo real, foram gerados um gráfico do tipo *chart* que acumula as leituras e outro gráfico que apresenta somente a última coleta. Nessa mesma tela, foi inserido um botão de parada da coleta de dados, e, também, foi feita a apresentação da matriz de saída dos dados que foram armazenados no computador, após a parada do ensaio. A Figura 14 apresenta a interface do usuário elaborada no LabVIEW.

3.2.2.1.1 Acelerômetro

O acelerômetro utilizado é fabricado pela empresa Visong Test, modelo 14205. O fabricante provê um certificado de calibração individual (ANEXO A) junto com o sensor, indicando valores como sensibilidade, de frequência de operação e de amplitude máxima de operação. É importante ressaltar que esse acelerômetro necessita de uma fonte de corrente constante, regulada de 2 mA a 10 mA, e de uma tensão de alimentação de 18 V a 24 V.

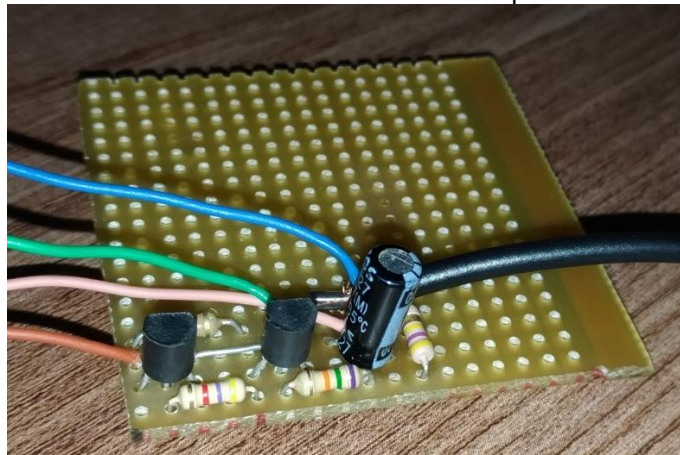
3.2.2.1.2 Geofone

O sensor geofone utilizado é fabricado pela empresa GiscoGeo, modelo GISCO,s 4.5 Hertz. O fabricante provê um *datasheet* (ANEXO B) padrão para esse componente, o que quer dizer que todos os sensores do mesmo modelo estarão dentro das especificações e das tolerâncias de um *datasheet* único.

3.2.2.2 Condicionamento do sensor acelerômetro

Para o correto funcionamento do sensor acelerômetro, foi necessário o desenvolvimento de uma fonte de corrente constante regulada. Essa fonte foi baseada em uma dupla de transistores B557C, acompanhada de três resistores de controle e de ajuste. A Figura 15 apresenta a placa construída com as finalidades de alimentar e de condicionar o sinal do sensor acelerômetro.

Figura 15 – Placa com circuito eletrônico desenvolvido para o sensor acelerômetro



Fonte: Elaboração própria (2019).

O condicionamento de sinal também contemplou um circuito de desacoplamento, pois o sensor acelerômetro do tipo IEPE consome somente uma parte da tensão de alimentação para energizar sua microeletrônica, e a sobra da tensão fica na forma de *offset*. No sinal de saída do sensor, o circuito de desacoplamento é empregado para eliminar esse *offset*. O circuito de desacoplamento, aliás, é baseado em um filtro passa altas, e o valor obtido para a frequência de corte foi de, aproximadamente, 0,154 Hz, que é um parâmetro adequado para o sistema, pois as frequências de interesse na dinâmica veicular estão acima de 1,5 Hz.

3.2.2.3 Placa de aquisição de dados

A placa de aquisição de dados utilizada no sistema desenvolvido é da marca NI, modelo USB-6008 (ANEXO C). Essa placa contém, entre outros parâmetros, quatro entradas analógicas diferenciais ou oito *single ended*, 16 bits e taxa de aquisição de 100 kHz. É caracterizada por ser uma placa compacta, com alimentação e com comunicação por conexão *Universal Serial Bus* (USB), o que facilita o desenvolvimento do sistema como um todo, além de todo o suporte que pode ser obtido no *site* da NI.

3.2.3 Procedimento de construção

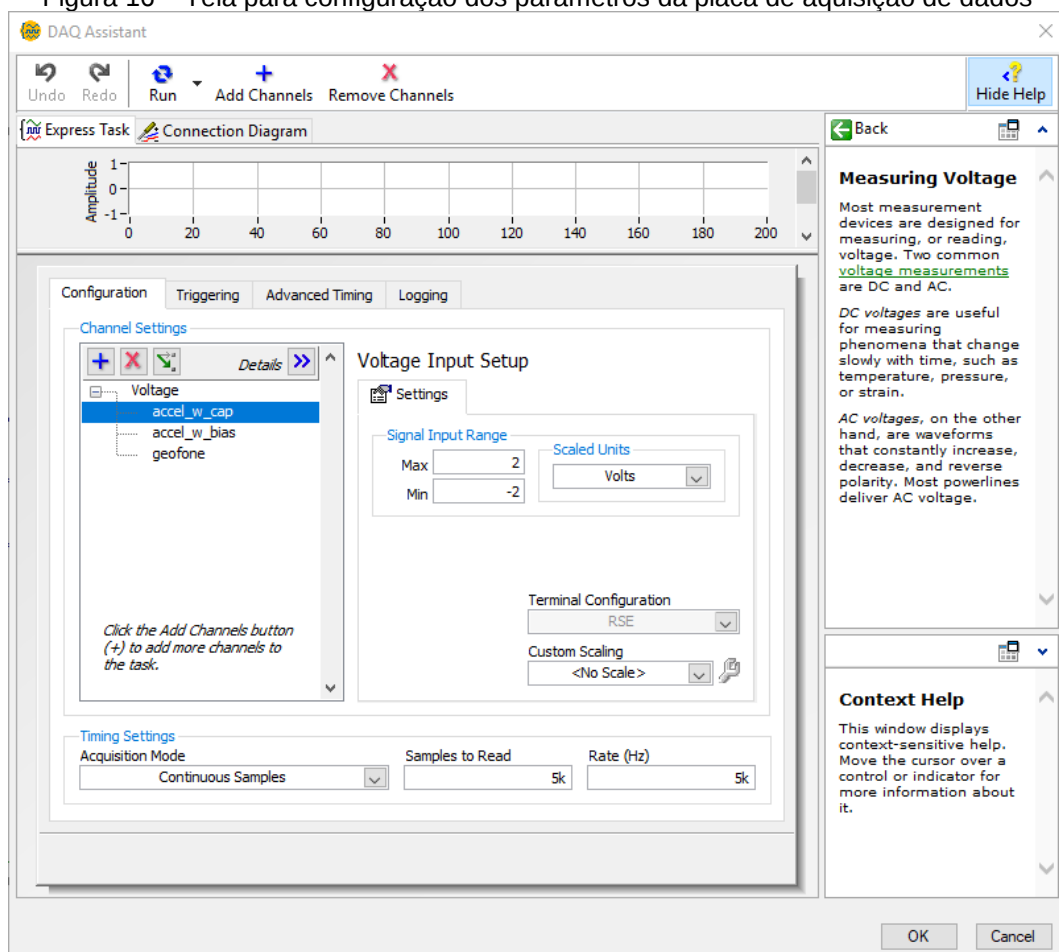
A linguagem de programação por blocos, da plataforma LabVIEW, foi utilizada neste trabalho por ser um *software* de engenharia voltado para aplicações de teste, de medição e de controle, com rápido acesso ao *hardware* e com visualização de resultados instantaneamente. Essa plataforma possibilita uma interface interativa com o usuário, podendo ser modificada em tempo real quanto aos parâmetros de visualização e de controle do sistema em uso, além da interface de programação.

Neste trabalho, esse *software* possibilitou verificar, durante os ensaios, os sinais dos sensores graficamente no domínio do tempo e, também, um gráfico no domínio da frequência. Com os gráficos, foram obtidas informações instantâneas, confirmando-se o correto funcionamento do sistema e garantindo-se que o arquivo gerado e armazenado estivesse coerente com o esperado para um sistema de coleta de dados.

A placa de aquisição de dados escolhida contém oito canais de entrada analógica comuns ou quatro diferenciais, apresentando, também, dois canais de saída analógica e também possui 8 canais digitais, bidirecionais. A resolução está em 16 bits, e a taxa máxima de aquisição de dados de 100 kHz é compartilhada entre os canais. O uso desse sistema é bastante dinâmico quando utilizado junto ao LabVIEW, pois se trata de componentes do mesmo fabricante. Foi utilizado o *software* do fabricante NI, chamado de *NI Device Monitor*, o qual permite observar, graficamente, o sinal obtido em um dos canais da placa, facilitando o funcionamento do equipamento, antes mesmo de se desenvolver uma programação dedicada para o experimento.

A parametrização da placa é realizada em um bloco específico no programa LabVIEW, e as configurações podem ser vistas na Figura 16. Salienta-se que esse equipamento já pertencia ao LabTrans/UFSC. Além de ser um equipamento de qualidade, essa disponibilidade foi um dos principais motivos pelo qual ele foi utilizado.

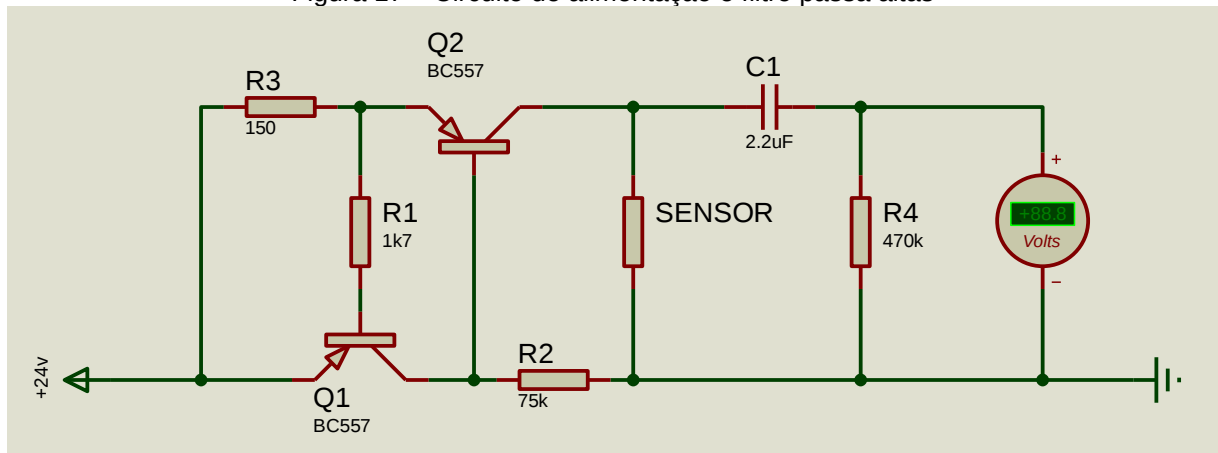
Figura 16 – Tela para configuração dos parâmetros da placa de aquisição de dados



Fonte: Elaboração própria (2019).

O sensor acelerômetro é do tipo IEPE, ou seja, possui em seu interior uma microeletrônica embarcada. A eletrônica contida no sensor permite obter sinais com melhor qualidade, pois trata os estímulos elétricos antes mesmo de transmitir pelo cabo de conexão com o resto do sistema. Nesse caso, incide a necessidade de uma alimentação especial para esse sensor, uma fonte de corrente contínua regulada e, também, por ter essa microeletrônica embarcada, deve-se utilizar uma parte da tensão de entrada no sensor para alimentar a sua eletrônica. O circuito de alimentação é baseado no transistor B557C (ANEXO D) e em três resistores de ajuste e de controle, e seu diagrama pode ser visualizado na Figura 17.

Figura 17 – Circuito de alimentação e filtro passa altas



Fonte: Elaboração própria (2019).

O consumo parcial da alimentação resulta em um *offset* no sinal medido, que, nesse caso, foi corrigido, pois chegou próximo a 10 volts, que é o limite para saturação do canal analógico da placa de aquisição de dados da NI utilizada. A correção foi realizada com um desacoplador de sinal, funcionando igual a um filtro passa altas, para zerar o sinal do sensor. O resistor utilizado é de 470 k Ω , e o capacitor de 2,2 μ F, resultando-se em uma frequência de corte em, aproximadamente, 0,154 Hz. O circuito de desacoplamento pode ser observado na Figura 17. Com isso, foi realizada a montagem de dois circuitos de alimentação individuais para a execução da coleta simultânea de mais de um sensor.

O sensor geofone utilizado funciona de forma semelhante a um gerador de tensão e possui, em seu interior, uma bobina e um ímã suspenso. Quando o ímã se movimenta no interior do sensor, gera um campo magnético pela bobina, criando-se um sinal que pode ser medido pela placa de aquisição de dados. Esse tipo de sinal

pode ser medido diretamente em um canal analógico da placa de aquisição de dados, tomando-se cuidado para não saturar o sinal passando de 10 volts. Aliás, a tensão gerada pelo sensor é proporcional à velocidade de deslocamento dele. Frisa-se que a frequência natural do sensor utilizado é de 4,5 Hz, ou seja, funciona semelhante a um filtro passa baixas, e tudo que estiver abaixo dessa frequência terá seu sinal atenuado. Contudo, a frequência de interesse deste trabalho está entre 8 Hz e 15 Hz (CEBON, 1990).

3.2.4 Verificação do funcionamento do sistema

Ao longo do processo de construção do sistema de coleta de dados, foram realizados testes para verificar o funcionamento das partes e os componentes do equipamento desenvolvido.

A primeira etapa na construção do equipamento foi o desenvolvimento da fonte de corrente constante regulada para o sensor acelerômetro. O primeiro protótipo construído teve como principal componente o transistor MOSFET, modelo 2N7000, porém esse circuito resultou na queima de um acelerômetro, pois se tratou de uma fonte de tensão e não de corrente regulada. Durante os ensaios, foram utilizados um multímetro no modo amperímetro e outro em modo de tensão. Com os multímetros, foi possível observar que os parâmetros de tensão e de corrente não operaram da forma esperada, o que acarretou no dano do sensor. Foi utilizado, ainda, um osciloscópio na expectativa de se observar o sinal proveniente do estímulo manual no sensor, além de conferir, pontualmente, seções do circuito desenvolvido, a fim de garantir que a medição realizada pelo multímetro estava correta.

No segundo circuito desenvolvido, com o transistor B557C, foram utilizados os mesmos multímetros e osciloscópio como implementado no circuito anterior. Com o resultado positivo, visualizando os estímulos manuais sobre o sensor no osciloscópio, partiu-se para a segunda etapa do projeto que foi o desenvolvimento efetuado na placa de aquisição de dados.

Somente após a confirmação do funcionamento do sensor acelerômetro e sua correta alimentação, conectou-se o sensor à entrada analógica da placa de aquisição de dados, para evitar possíveis danos a ela. Utilizando-se o *software NI Device Monitor*, foi possível observar pelo computador, de forma gráfica e acessando-

se o canal analógico, a integração do sensor à placa de aquisição e ao computador, por meio do estímulo manual do acelerômetro.

Com o sistema de condicionamento de sinal, placa de aquisição de dados e computador integrados, foi iniciada a validação do *software* de coleta de dados desenvolvido. O programa dispunha, primeiramente, de um laço *while* e, em seu interior, de um bloco de acesso e de parametrização da placa de aquisição de dados. Em conjunto com o laço *while*, foi implementado, na interface com o usuário, um gráfico apresentando os sinais registrados pela placa de aquisição de dados no canal analógico. Nessa etapa, ajustes na parametrização tiveram que ser realizados para se obter uma leitura adequada do sinal registrado pelo sensor. Em seguida, com os ajustes feitos de modo satisfatório, foi implementado o arquivamento dos sinais do sensor no disco do computador para, posteriormente, ser possível realizar o pós-processamento de dados. Com isso, foram gerados gráficos pelo *software* Excel, para se conseguir verificar se o sinal armazenado estava igual ao apresentado no programa desenvolvido no sistema da NI.

A última implementação, antes de se direcionar aos ensaios, foi a tentativa de realizar a aquisição de dados de dois sensores acelerômetros simultaneamente. Para isso, foi montado, em uma matriz de contato, mais um circuito de alimentação para o segundo sensor. No programa desenvolvido, foi acrescentado mais um canal analógico para a aquisição de dados, e, na sequência, foi verificado, visualmente no gráfico da interface do usuário, o funcionamento do equipamento. Nesse gráfico, foi observada a ocorrência de diafonia, ou seja, o estímulo em um sensor foi observado também no outro sensor, o que pode ser explicado pelo fato de o *ground* dos sensores ser compartilhado. A solução desse problema se daria com fontes isoladas para cada sensor, o que não foi necessário para este trabalho.

O sensor geofone foi implementado após os desafios enfrentados durante o desenvolvimento do sistema do acelerômetro. Esse sensor não apresentou complicações e foi somente necessário conectá-lo a um canal analógico da placa de aquisição de dados e rodar o programa de coleta já desenvolvido para o acelerômetro, adicionando-se mais um canal ao sistema.

3.3 Equipamentos para execução dos ensaios

Os ensaios foram realizados nas dependências da UFSC, no LVA. O LVA disponibilizou os equipamentos de teste, conhecidos como excitadores, e, também, um sistema comercial de condicionamento e de coleta de dados. Como o Laboratório de Automobilística do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC, 2019) encontrava-se em reforma, impossibilitando o uso dos equipamentos do laboratório, foram utilizadas as dependências do LVA da UFSC, além da *expertise* que o laboratório possui em análise de sinais na área de vibração.

3.3.1 Equipamentos e materiais

Neste item, serão especificados os componentes utilizados em todos os experimentos. O Quadro 1 apresenta os equipamentos e os materiais utilizados nos ensaios, com uma breve descrição de suas marcas e de seus modelos.

Quadro 1 – Lista e especificação de equipamentos e materiais

Equipamentos e materiais	Especificação
Excitador eletrodinâmico.	Brüel & Kjær, Mini-shaker Type 4810.
Excitador de referência.	Brüel & Kjær, Calibration Exciter Type 4294.
Amplificador de potência.	Brüel & Kjær, Power Amplifier – Type 2718.
Acelerômetro em teste.	Visong Test, Model 14205.
Geofone.	GISCO GEO, s 4.5 Hertz Geophone.
Acelerômetro de referência.	Brüel & Kjær, DeltaTron® Accelerometer, Type 4519-002.
Sistema comercial de controle, condicionamento e aquisição de sinais.	Siemens, LMS SCADAS e Siemens PLM software
Placa de condicionamento de sinal, desenvolvida neste trabalho.	Desenvolvido no TCC.
Placa de aquisição de dados.	NI, USB-6008.
Software de aquisição de dados, desenvolvido neste trabalho.	Desenvolvido no TCC.
Fonte de alimentação.	24 VDC, 1 A, diversos fabricantes.
Computador para o controle do sistema desenvolvido.	Laptop, Dell, Inspiron 14z-5423.
Cera de fixação.	Diversos fabricantes.

Fonte: Elaboração própria (2019).

3.3.2 Procedimento dos ensaios

Os ensaios foram realizados com dois equipamentos de excitação: o excitador de referência; e um excitador eletrodinâmico. Este segundo é alimentado

por um amplificador de potência e é controlado por um gerador de função, o qual possibilita variar a frequência de vibração do excitador.

De modo a especificar suas funções neste trabalho, com o excitador de referência, foi possível verificar o funcionamento do sistema de coleta de dados desenvolvido e obter os parâmetros de calibração do sensor para, posteriormente, comparar com as informações do seu certificado de calibração. Por sua vez, utilizando o excitador eletrodinâmico, foi possível confrontar o sinal obtido do sensor acelerômetro de referência com o acelerômetro em teste. O mesmo procedimento de ensaio foi realizado entre o sensor acelerômetro e o geofone.

3.3.2.1 Montagem

O método de fixação dos sensores foi realizado da forma semelhante em ambos os excitadores, sendo colados os sensores com cera especial de fixação, um sensor sobre o outro, técnica conhecida como *back to back calibration*. Na Figura 18, pode ser observado um sistema de calibração de acelerômetros da empresa *Vibration Research Corporation*, e, em detalhe, é possível verificar a montagem *back to back* dos sensores.

Figura 18 – Sistema de calibração VibrationVIEW e, em detalhe, a montagem *back to back*



Fonte: *Vibration Research Corporation* (2017).

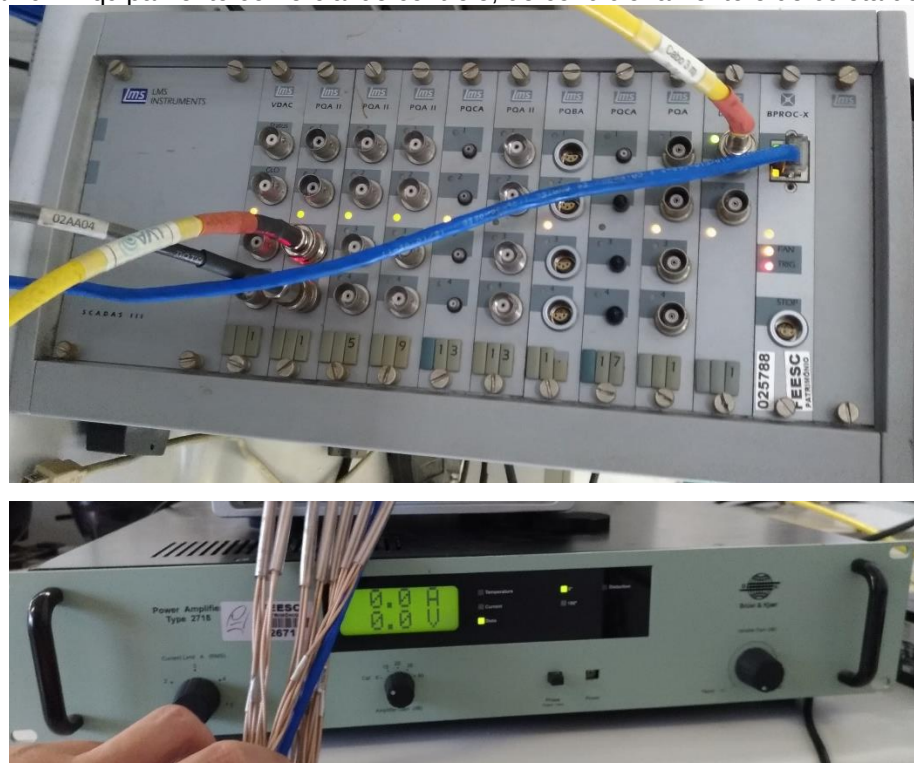
A montagem do tipo *back to back* garante que os sensores receberão, simultaneamente, a mesma excitação da mesa, podendo, então, ser analisado o sinal de um sensor de referência com o sensor em teste. Ressalta-se que se deve dar atenção a problemas de sincronismo de fase entre os sensores, ou seja, a excitação

imposta pelo *shaker* deve ser observada no mesmo instante de tempo em ambos os sensores ou executar uma correção dela.

3.3.3.2 Condicionamento de sinais e aquisição de dados

Foram utilizados dois sistemas de condicionamento e de aquisição de dados: um comercial e outro desenvolvido para este TCC. O sistema comercial possui entradas de conector *Bayonet Neill Concelman* (BNC), comumente utilizados em sensores acelerômetro, e, também, a eletrônica necessária para a alimentação dos sensores acelerômetros do tipo IEPE, tanto quanto canais de saída analógica e *software* de controle do ensaio. Na Figura 19, pode ser observado, na imagem superior, o equipamento comercial de controle, de condicionamento e de coleta de dados, e, abaixo na mesma figura, o amplificador de potência para o *shaker*.

Figura 19 – Equipamento comercial de controle, de condicionamento e de coleta de dados



Fonte: Elaboração própria (2019).

Em contrapartida, o sistema desenvolvido foi alimentado por uma fonte de 24 V e a regulação da corrente baseada no transistor B557C, possuindo também um circuito de desacoplamento (filtro passa altas, $R = 470 \text{ k}\Omega$ e $C = 2,2 \text{ }\mu\text{F}$, logo $F_c =$

0,154 Hz) para eliminar o *offset* de tensão no sinal do sensor, devido ao *bias voltage* consumido pelo sensor. Isso permite a eliminação do *offset* no sinal do sensor, o que zera seu sinal para iniciarem o sistema e o ensaio, conforme é esperado.

3.3.3.3 Controle do excitador eletrodinâmico

Para que seja possível obter os dados a serem analisados, foi utilizado o excitador eletrodinâmico que não contém parâmetros pré-definidos, que pode ser controlado por elementos externos, como, por exemplo, um gerador de função. Neste trabalho, o gerador de função que foi utilizado para controle permitiu o uso de diferentes parâmetros de frequência enviados para o amplificador de potência, este que, por sua vez, alimentou o excitador eletrodinâmico. Essa característica é fundamental para os testes realizados.

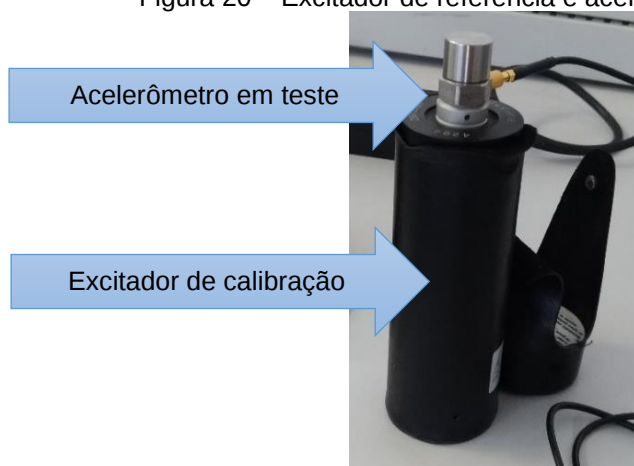
3.3.3.4 Parâmetros dos ensaios

No primeiro ensaio, foram utilizados o excitador de referência, o acelerômetro em teste e o sistema de coleta de dados desenvolvido, para validação do funcionamento deles. Em uma segunda etapa, utilizando o excitador eletrodinâmico, foi realizado ensaio com o sistema comercial de coleta de dados, obtendo-se o sinal dos dois sensores acelerômetros simultaneamente. Posteriormente, realizou-se um ensaio com um acelerômetro e com um geofone, também de modo simultâneo. Em um ensaio feito à parte, foi avaliada a resposta da eletrônica, desenvolvida neste trabalho, responsável pelo condicionamento do sinal do sensor acelerômetro.

3.3.3.4.1 Excitador de referência

O ensaio com excitador de referência replica os parâmetros utilizados pelos fabricantes de acelerômetros, para a obtenção do valor de sensibilidade do sensor a uma frequência padrão de, aproximadamente, 160 Hz, e a uma aceleração de 10 m/s², preferencialmente, em temperatura controlada em 23°C, conforme define o manual do fabricante do acelerômetro. Na Figura 20, podem ser visualizados o excitador de referência e o sensor acelerômetro instalado no equipamento.

Figura 20 – Excitador de referência e acelerômetro em teste



Fonte: Elaboração própria (2019).

Segundo o fabricante do excitador de referência, a frequência de excitação é de 159,2 Hz, pois, dessa forma, o controle de rotação do motor do excitador tem uma resposta de 1.000 rad/s, aceleração em 10 m/s^2 , velocidade de 10 mm/s e deslocamento de $10 \mu\text{m}$.

3.3.3.4.2 Condicionamento de sinal

Para a caracterização do sistema de condicionamento de sinal, foi realizado um ensaio injetando ruído branco na placa de condicionamento de sinal. Foram adquiridos, pelo sistema de coleta de dados comercial, simultaneamente, o sinal injetado e o sinal de saída da placa de condicionamento desenvolvida. Com esses dados arquivados pelo *software*, foi possível realizar análises comparativas entre o sinal antes e depois da placa de condicionamento, o que demonstrou que o sistema estava funcionando como esperado para realização do ensaio.

3.3.3.4.3 Excitador eletrodinâmico

Nesses ensaios, os parâmetros de vibração do excitador são controlados por um gerador de função e são alimentados por um amplificador de potência, dando liberdade para uma gama de possibilidades na realização do ensaio. O equipamento de coleta e de condicionamento de sinal comercial do LVA também possui a capacidade de gerar os sinais de controle do excitador. O *software* de operação do

sistema comercial permite gerar análises com os dados obtidos pelos sensores e, ademais, criar gráficos dos resultados, os quais serão usados para este trabalho.

O ensaio consistiu em gerar um sinal de controle de ruído branco, até uma determinada frequência, e coletar o sinal obtido pelos sensores simultaneamente, com os sensores montados *back to back*. O Quadro 2 exibe um resumo dos parâmetros utilizados nos ensaios com o excitador eletrodinâmico.

Quadro 2 – Lista de ensaios

Ensaio	Sensores	Frequência
1	Acelerômetro de referência e em teste	até 6400Hz
2	Acelerômetro de referência e em teste	até 25000Hz
3	Acelerômetro e Geofone	até 200Hz

Fonte: Elaboração própria (2019).

Na Figura 21, pode ser observada a montagem do ensaio dos acelerômetros à esquerda e, à direita, as montagens do acelerômetro e do geofone, respectivamente. Além disso, pode ser visualizado, na Figura 21, o excitador eletrodinâmico.

Figura 21 – Montagem *back to back* dos sensores e do excitador eletrodinâmico



Fonte: Elaboração própria (2019).

3.3.3.5 Verificação do funcionamento do sistema de condicionamento e aquisição de dados desenvolvido

Neste tópico, serão descritos os testes realizados nos componentes do sistema, para que se garanta que todas as funcionalidades do equipamento estejam funcionais antes do início dos experimentos.

Após verificar as conexões e a energia disponíveis, foram ligados todos os componentes e o *software*, como, a placa de aquisição de dados e a placa de condicionamento de sinal. A partir disso, verificou-se, por meio de um gráfico no *software* de coleta, as respostas do sensor e do sistema aos estímulos manuais aplicados. Na sequência, um ensaio mais aprofundado foi realizado usando o excitador de referência.

3.3.3.6 Estruturação dos dados coletados

Os arquivos gerados foram armazenados diretamente em um computador, para, posteriormente, realizar-se o pós-processamento dos dados brutos.

3.3.3.6.1 Sistema de coleta de dados desenvolvido

Nos arquivos obtidos pelo sistema desenvolvido, os dados foram armazenados no formato de texto, e criou-se um arquivo do ensaio com o excitador de referência. O nome do arquivo conteve a data e o nome do equipamento utilizado no ensaio para garantir o bom entendimento e para se evitarem erros, respectivamente.

3.3.3.6.2 Sistema de coleta de dados comercial

Os dados coletados pelo sistema comercial foram armazenados no formato “.lms”, que é proprietário do *software* de coleta de dados. Esse arquivo contém subpastas, sendo que cada pasta representa um ensaio. O nome das pastas indica o ensaio realizado, contendo os limites de frequência e sensores utilizados, respectivamente.

3.3.3.7 Estruturação dos relatórios de resultados analisados

No sistema de coleta de dados desenvolvido, os dados foram armazenados conforme a tabela a seguir definida. Salienta-se que isso foi feito no sentido de facilitar e de estruturar a análise e a apresentação dos resultados ao final do trabalho. A Tabela 1 apresenta uma primeira coluna com a variação do tempo em segundos e a segunda coluna com leituras de dados em volts do sinal do sensor. O cálculo da FFT está na quarta e na quinta colunas, as quais representam o resultado obtido em uma janela de dados do ensaio. A Tabela 1, apresenta um exemplo de trecho para um arquivo de coleta de dados.

Tabela 1 – Trecho da tabela de arquivamento de dados coletados

Tempo (s)	Acelerômetro (v)	-	Frequência (Hz)	Magnitude (RMS)
0,0001	0,008	-	0	-0,460
0,0002	0,008	-	1	-0,458
0,0003	0,008	-	2	-0,454

Fonte: Elaboração própria (2019).

Para o sistema comercial de coleta de dados, os dados foram obtidos diretamente pelo *software* gráfico com análises do cálculo da *Frequency Response Function* (FRF) e sinais brutos dos sensores.

3.4 Análise de dados

Neste subcapítulo, após a exposição feita, serão apresentadas as etapas realizadas na análise de dados dos componentes do sistema desenvolvido. Primeiramente, será analisado o funcionamento do sistema de coleta de dados desenvolvido. Em uma segunda análise, utilizando-se do ensaio efetuado com o excitador de referência, são confrontados os dados obtidos do sensor acelerômetro em teste com os parâmetros fornecidos pelo fabricante no certificado de calibração do sensor. Na sequência, com o ensaio de montagem *back to back* dos sensores acelerômetros no sistema de coleta comercial, são comparados os dados provenientes dos dois sensores, e, por fim, faz-se a análise do ensaio entre o geofone e o sensor acelerômetro, também no sistema de coleta comercial.

3.4.1 Análise do sistema de condicionamento e coleta de dados desenvolvido

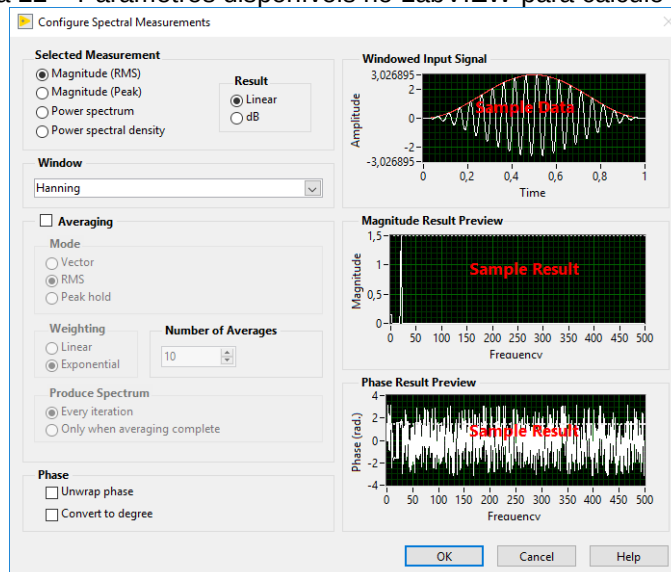
A caracterização do filtro incorporado no sistema de condicionamento de dados foi realizada para se obterem informações reais desse filtro. A necessidade de se verificar a resposta do filtro construído se dá pelo fato de que o cálculo teórico, provavelmente, não corresponderá exatamente ao mesmo obtido na prática, pois existem diferenças na qualidade de construção dos componentes, divergindo-se do especificado pelo fabricante, tanto quanto características físicas de construção, como, metal de adição na brasagem e assim por diante.

Essa análise foi realizada calculando-se a FRF com a aquisição dos dados constantes antes e depois do filtro. A apresentação de um gráfico da FRF em dB mostra a curva de resposta do filtro no domínio da frequência ao estímulo de um ruído branco injetado até 20 Hz, pois o filtro passa altas foi dimensionado para 0,15 Hz.

3.4.2 Verificação dos parâmetros do sensor acelerômetro em teste

Os parâmetros informados no certificado de calibração, fornecido pelo fabricante do sensor acelerômetro em teste, foram verificados a partir dos ensaios elaborados. Com os dados obtidos pelo sensor acelerômetro em teste no excitador de referência, foi aplicada a FFT, obtendo-se, dessa forma, informações no domínio da frequência.

Figura 22 – Parâmetros disponíveis no LabVIEW para cálculo da FFT



Fonte: Elaboração própria (2019).

Os dados de interesse foram o sinal em que ocorrem o pico de frequência e a sua magnitude em RMS. A FFT foi calculada utilizando-se um bloco de programação do LabVIEW, a qual foi selecionada em virtude de seus parâmetros, conforme podem ser observados na Figura 22.

3.4.3 Comparação entre os sensores acelerômetro

A verificação do sensor acelerômetro em teste foi realizada comparando-se o sinal obtido com relação ao sinal do acelerômetro de referência. Nessa análise, foi calculada a FRF, obtendo-se, dessa maneira, parâmetros de avaliação do sensor. Salienta-se que a análise se dá de forma gráfica no domínio da frequência.

3.4.4 Comparação entre o geofone e o acelerômetro

Conforme comentado ao longo deste trabalho, o sensor geofone mede velocidade, e o sensor acelerômetro mede a aceleração. É possível compatibilizar esses valores calculando-se a conversão de um para o outro e vice-versa. O formato adotado neste trabalho foi converter a velocidade em aceleração. O cálculo utilizado para isso foi realizado após a FRF entre os sensores. O valor de FRF foi recalculado utilizando a Equação 1:

$$FRF_{rec} = FRF \times 2 \times \pi \times frequência \quad (1)$$

Em que:

FRF_{rec} = valor recalculado da FRF (adimensional)

FRF = valor da FRF obtido no ensaio (adimensional)

frequência = frequência (Hz)

3.5 Proposição de aplicação do sensor acelerômetro para trabalhos futuros

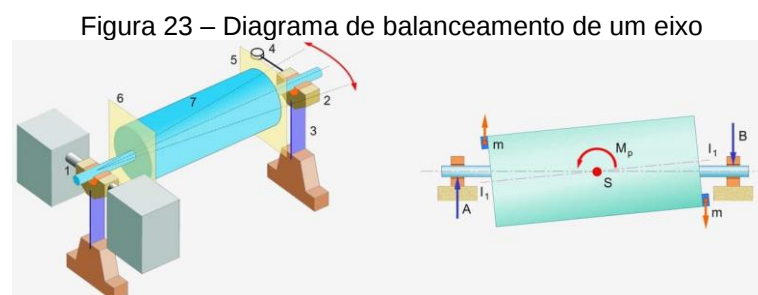
Neste tópico, será apresentada uma proposta de aplicação do sensor acelerômetro sob estudo, em automóveis, considerando a situação de que a conservação das rodas é uma prática importante, tanto para o conforto do usuário quanto para o bom funcionamento do veículo.

Nesse contexto, uma roda desbalanceada transmite vibrações para a carroceria do veículo, sendo a maior parte dessa vibração absorvida pela suspensão dele. O balanceamento de rodas é uma prática comum nas oficinas mecânicas, tanto quanto o rodízio de pneus que melhora a sua vida útil.

O sistema de eixos de um veículo também deve ser considerado, seja para vibração seja para funcionamento, algo tão importante quanto o balanceamento de rodas, porém não comumente praticado, somente em caso de avarias. Uma possível aplicação para o sensor acelerômetro é o balanceamento de eixos.

Nesse sentido, existem algumas razões pela qual um eixo pode estar desbalanceado, sendo elas: densidades diferentes ao longo do eixo, instalação mal centralizada e eixos que não são perfeitamente cilíndricos. A correção do desbalanceamento começa na identificação das regiões com maior massa. Após a identificação desse ponto, em seu lado oposto, deve ser inserido o contrapeso de balanceamento, ou, em alguns casos, deve ser feita a remoção de parte da massa daquele ponto.

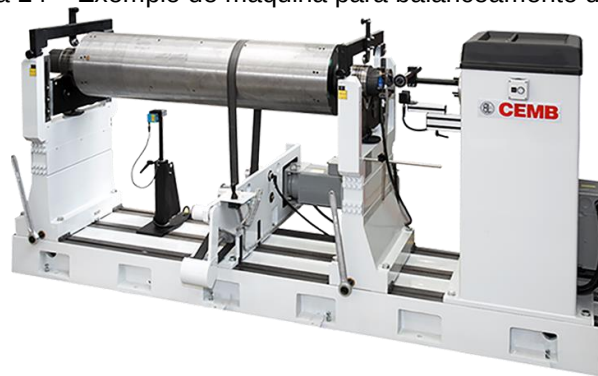
Na Figura 23, pode ser observado um diagrama de um equipamento de balanceamento de eixos e, também, pode ser verificado um esquemático para posicionamento de contrapesos.



Fonte: Wikipédia (2019).

Existem equipamentos que identificam o desbalanceamento do eixo e informam onde deve ser aplicada a correção de massa, utilizando como principal componente o acelerômetro. Na Figura 24, pode ser vista uma máquina de balanceamento de eixos.

Figura 24 – Exemplo de máquina para balanceamento de eixos

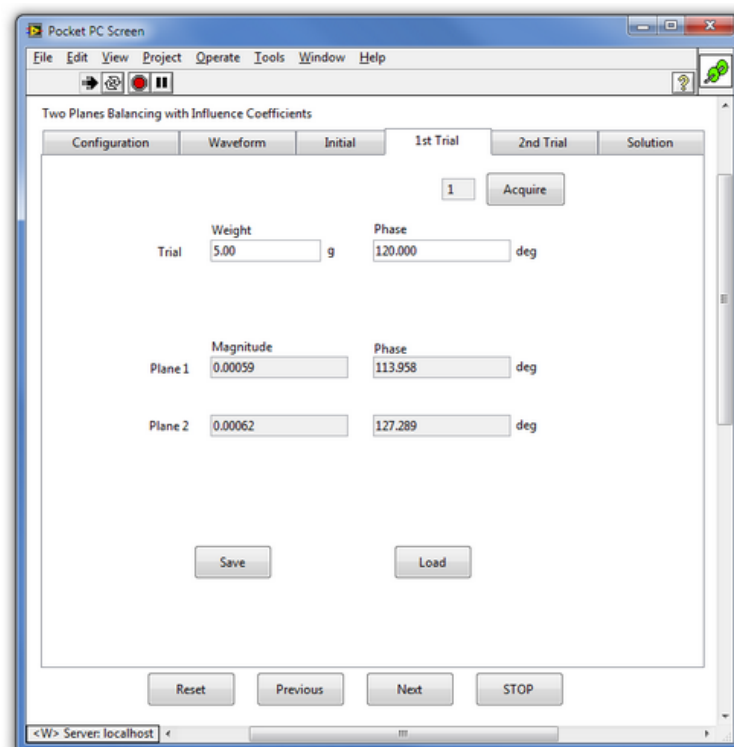


Fonte: Cemb Hofmann UK (2015).

A plataforma de desenvolvimento LabVIEW da NI possui alguns exemplos de programas em seu banco de dados, e um deles contém o *software* completo para implementação de uma máquina de balanceamento de eixos. Os parâmetros de entrada do *software* são dois acelerômetros e um sensor para medição da velocidade e posição angular do eixo.

Na Figura 25, pode ser observada a tela do usuário referente à resposta de um ensaio no *software* da NI, e toda a documentação sobre este exemplo está presente no ANEXO E.

Figura 25 – Aba de resultados da interface do *software* de balanceamento de eixos da NI



Fonte: NI (2016).

No exemplo disponibilizado pela NI, tem-se basicamente as mesmas etapas do *software* desenvolvido neste TCC. O *software* da NI começa solicitando informações acerca dos parâmetros do ensaio e sobre as configurações que o usuário deseja realizar. Na sequência, é feita uma pequena coleta para verificação visual, por meio de gráficos, para o sinal dos sensores do equipamento, cabendo, nesse momento, a *expertise* da pessoa que está utilizando o equipamento. Após satisfeito com a resposta dos sensores, segue-se para o ensaio propriamente dito, resultando-se nas informações da quantidade e no posicionamento exato da massa de contrapeso.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

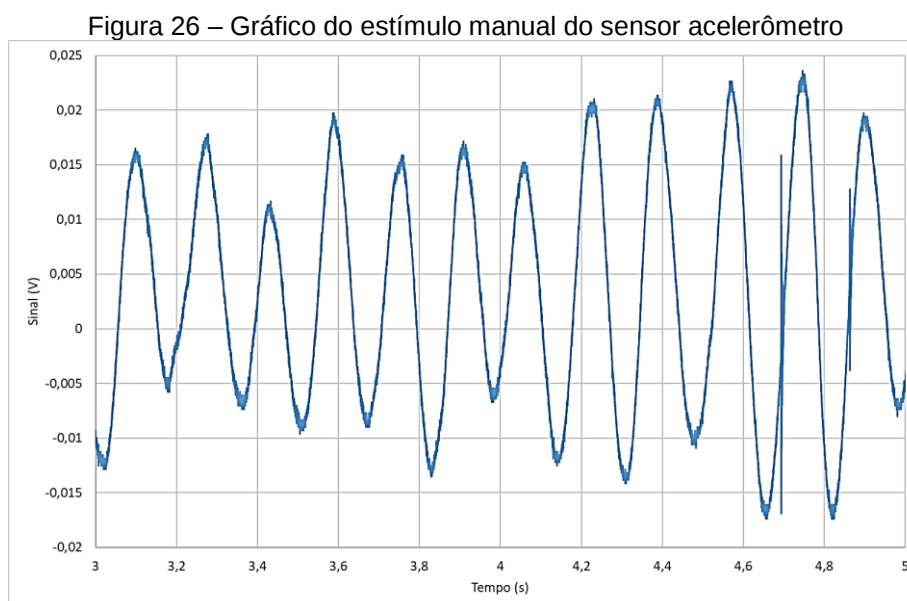
Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos com os ensaios dos sensores e o equipamento desenvolvido. Primeiramente, serão expostos gráficos e serão feitas considerações sobre eles, para, posteriormente, ser realizada a análise dos resultados.

4.1 Resultados obtidos

Os resultados apresentados foram obtidos a partir dos ensaios realizados com o equipamento desenvolvido e, também, com os sistemas do LVA, utilizando os dois sensores: acelerômetros e um geofone.

4.1.1 Ensaio de funcionamento do equipamento desenvolvido

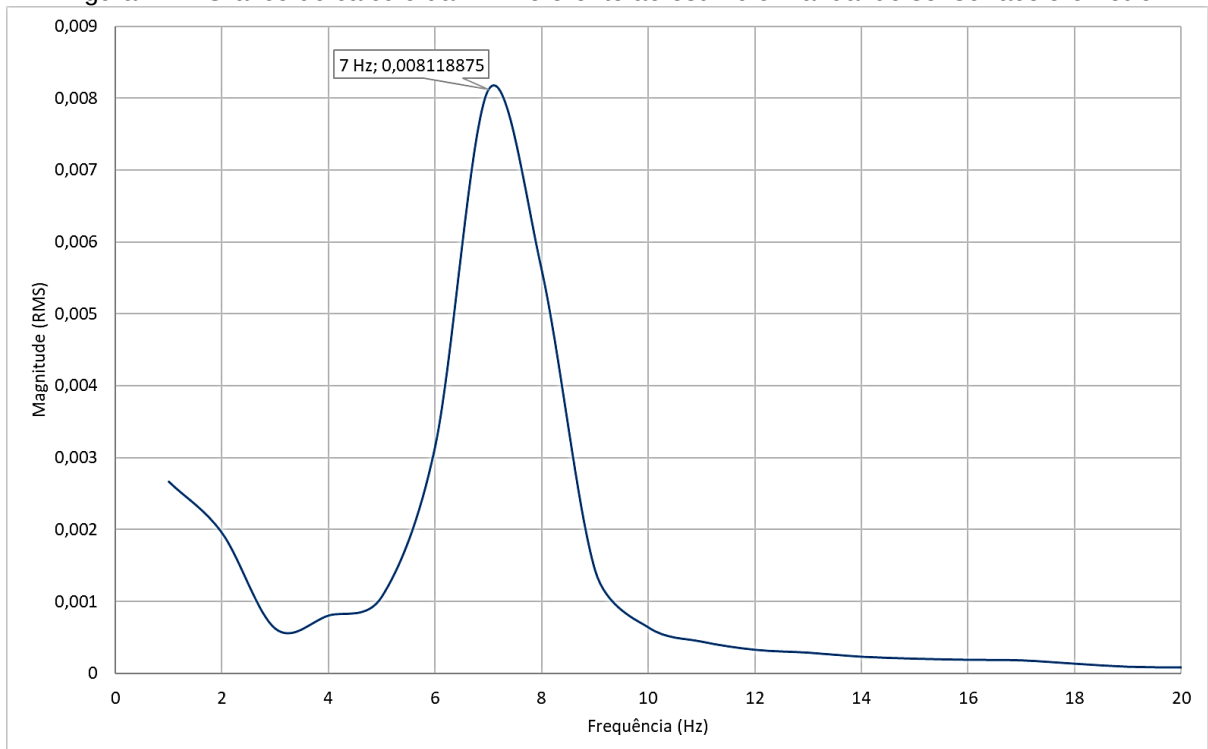
Para validar o funcionamento do equipamento, durante seu desenvolvimento, foram aplicados estímulos manuais no sensor acelerômetro, com movimentos, aproximadamente, senoidais e captando-se seu sinal. Primeiramente, a verificação aconteceu visualizando-se os sinais do sensor, por meio do *software* da NI. Após ter satisfação com os resultados do teste anterior, iniciou-se o desenvolvimento do *software* de coleta de dados.



Fonte: Elaboração própria (2019).

Na Figura 26, pode-se observar o resultado obtido, com formato, aproximadamente, senoidal, pelo estímulo manual sobre o sensor acelerômetro, o que está em acordo com o esperado para a referida montagem. A amplitude do sinal varia ao longo do tempo em virtude de o estímulo ser realizado manualmente, o que é difícil de controlar. Pode ser visto que o sinal gerado pelo sensor foi medido em volts e na sua média está próximo de zero volts. A Figura 27 apresenta o resultado da FFT calculada a partir dos dados gerados pelo estímulo manual do sensor.

Figura 27 – Gráfico do cálculo da FFT referente ao estímulo manual do sensor acelerômetro



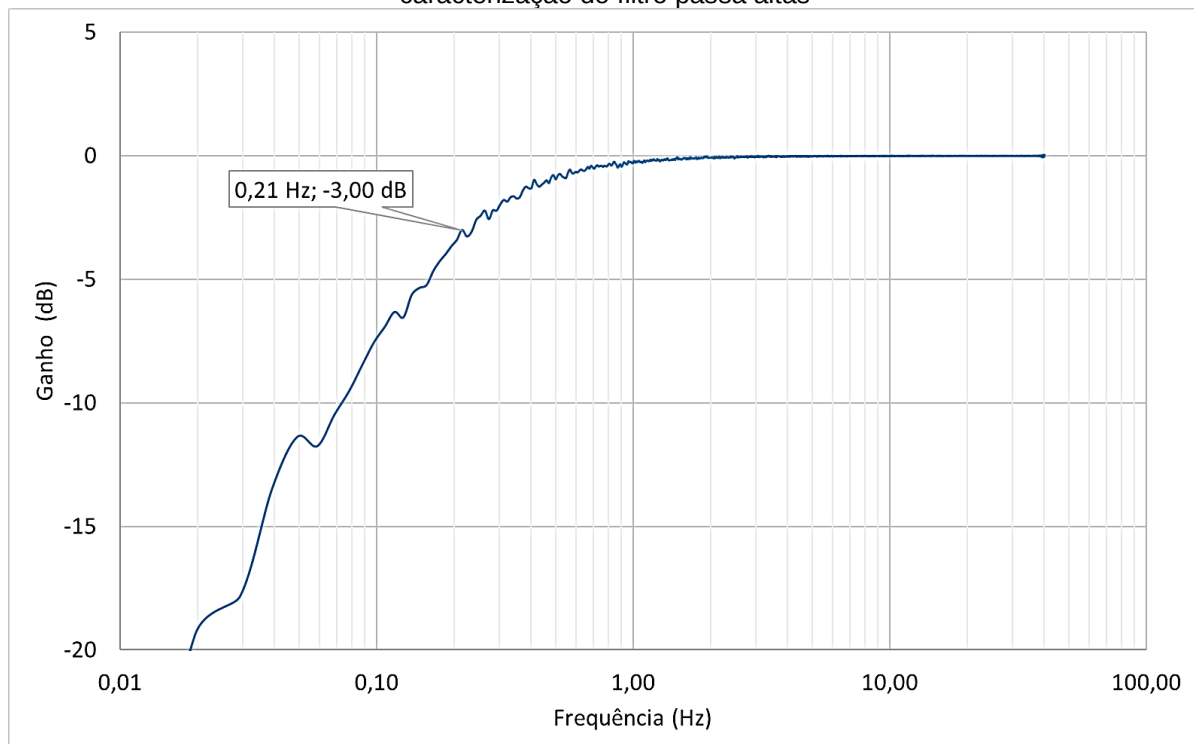
Fonte: Elaboração própria (2019).

O gráfico da Figura 27 possui, no eixo da abscissa, o valor de magnitude (RMS), e, na ordenada, a frequência em Hertz. Pode ser observado, também no gráfico, que a frequência predominante é cerca de 7 Hz. Nesse ensaio, a magnitude não contribui para a análise por se tratar de um teste subjetivo, pois foi realizado pelo estímulo manual do sensor, indicando somente sobre o funcionamento do equipamento.

4.1.2 Ensaio de caracterização do filtro passa altas desenvolvido

Como os dados do ensaio de caracterização do filtro passa altas desenvolvido, foi elaborado um gráfico apresentando-se o cálculo da FRF do sinal antes e após filtro, com amplitude em dB por frequência em hertz na escala logarítmica. Na Figura 28, pode ser visualizado o resultado obtido pelo ensaio.

Figura 28 – Gráfico do cálculo da FRF do acelerômetro, convertido em escala dB, referente à caracterização do filtro passa altas

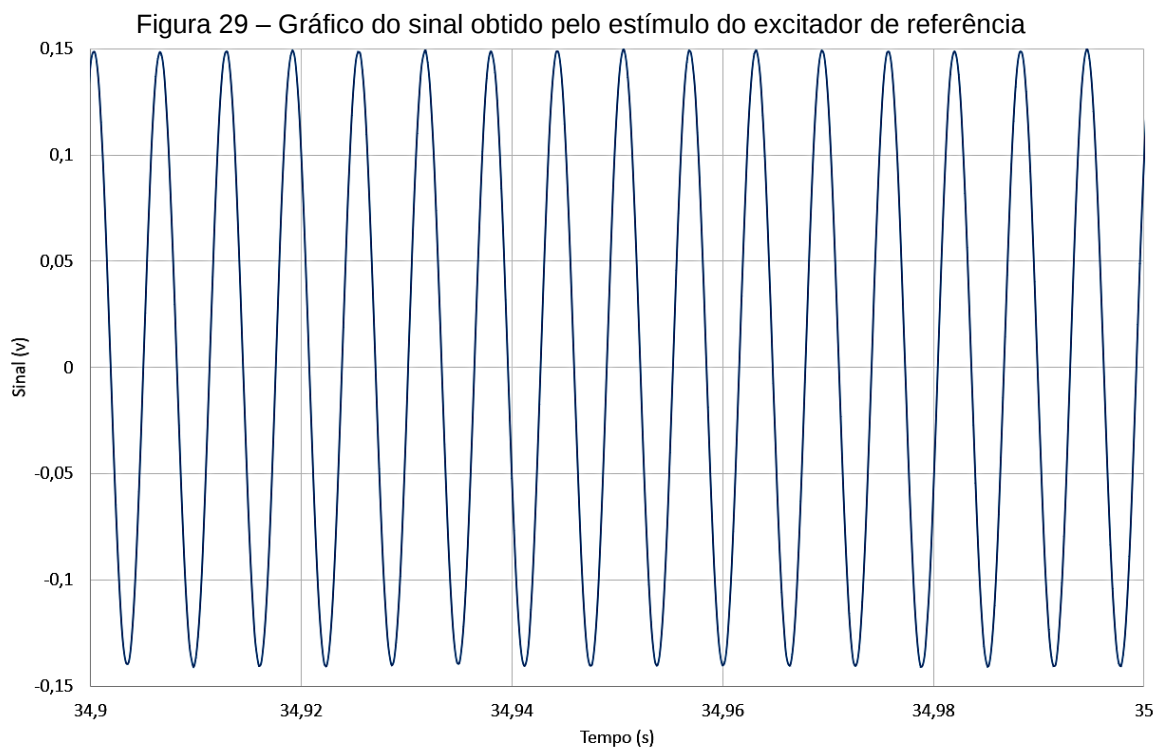


Fonte: Elaboração própria (2019).

A curva de resposta do sensor, apresentada na Figura 28, tem forma característica de um filtro passa altas, o qual atenua os sinais com frequências inferiores ao seu dimensionamento. Em, aproximadamente, 80% do sinal, ou seja -3 dB, a frequência de corte do filtro chegou a 0,21 Hz. Além disso, a eletrônica elaborada é composta de um filtro analógico RC (passivo) de primeira ordem e foi calculado para 0,15 Hz. O sinal calculado do filtro supera 99% em cerca de 1,85 Hz.

4.1.3 Ensaio com excitador de referência

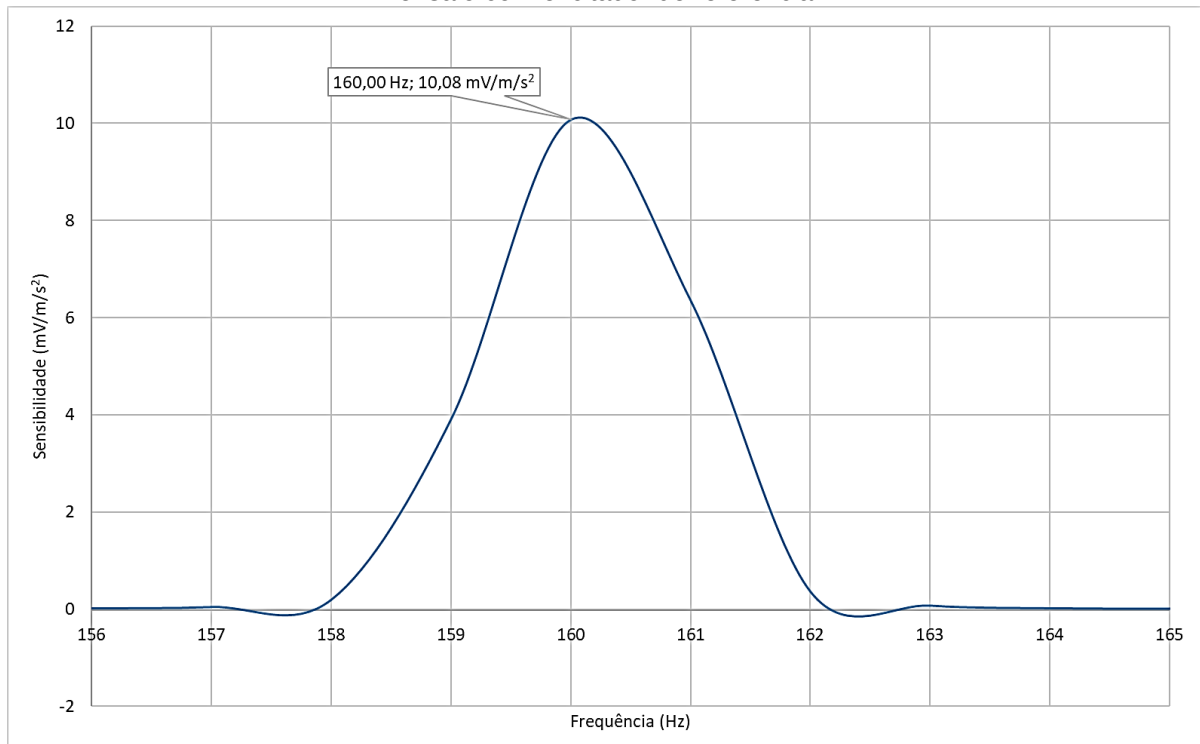
O ensaio com excitador de referência possibilita obter os valores dos parâmetros informados no certificado de calibração fornecido pelo fabricante. Para a apresentação desses dados, é calculada a FFT do sinal obtido pelo sensor, e, posteriormente, é convertido o valor para sensibilidade em mV/m/s^2 . Na Figura 29, pode ser observado o nível de coerência das respostas do sistema aos estímulos impostos pelo excitador de referência.



Fonte: Elaboração própria (2019).

No gráfico da Figura 29, pode ser notado que o sinal é repetitivo e de forma senoidal, característico do tipo de ensaio realizado. A média do sinal está um pouco deslocada do zero, pois a crista da onda atinge 0,15 V, e o vale não atinge -0,15 V. Na Figura 30, pode ser observado o gráfico do cálculo da FFT após a conversão para sensibilidade do ensaio com excitador de referência.

Figura 30 – Gráfico do cálculo da FFT do acelerômetro, convertido para sensibilidade, referente ao ensaio com excitador de referência



Fonte: Elaboração própria (2019).

A resposta do sensor, ao estímulo imposto pelo excitador de referência, foi de 10,08 mV/m/s² a, aproximadamente, 160 Hz.

4.1.4 Ensaio com excitador eletrodinâmico

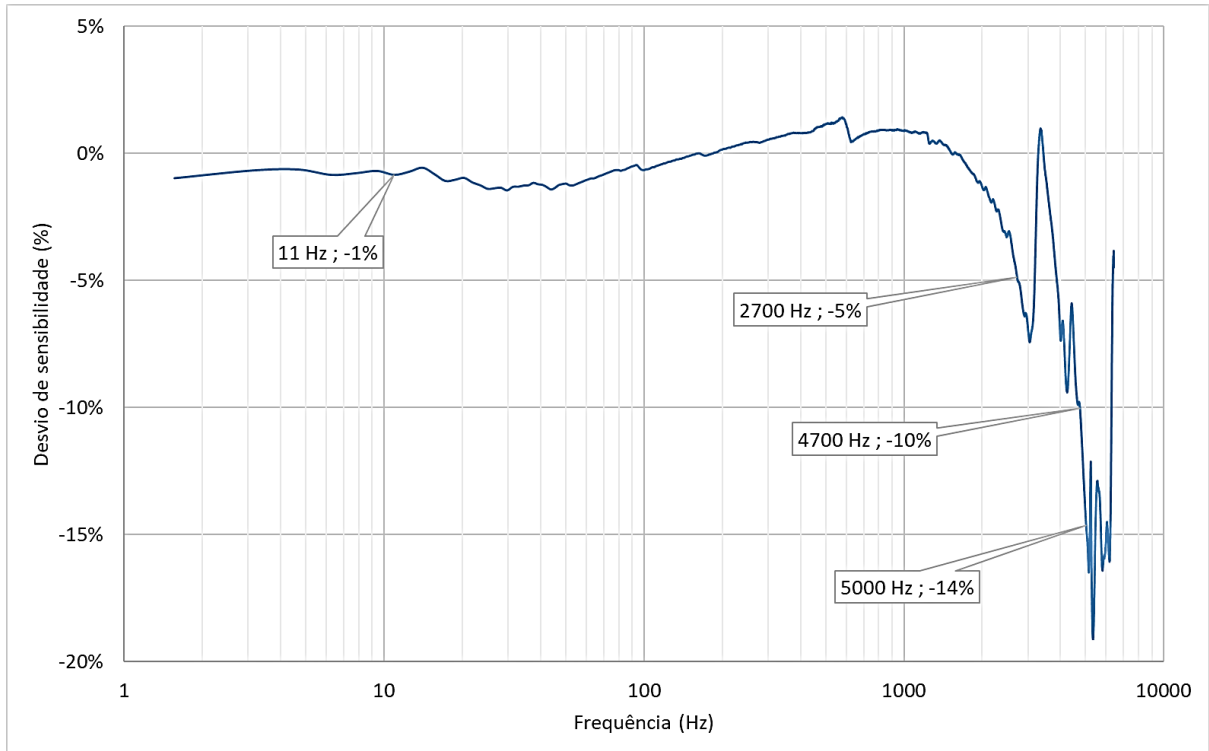
Com a possibilidade de se realizar o teste com os dois sensores de interesse da pesquisa de pesagem em movimento (o acelerômetro e o geofone), foram realizados testes com ambos os sensores. Para esse ensaio, foi utilizada a montagem *back to back* dos sensores e foram utilizados os equipamentos do LVA, gerando-se gráficos a partir dos dados obtidos, que estão apresentados nos subtópicos a seguir.

4.1.4.1 Ensaio *back to back* acelerômetros

No ensaio com dois acelerômetros, um de referência e o outro em teste, foi calculada a FRF para observar a curva de resposta entre eles. A Figura 31 apresenta o gráfico do desvio de sensibilidade do sensor em teste, para estímulos até a

frequência de 6400 Hz. A resposta do cálculo da FRF mostrou-se estável até 1000 Hz e, a partir desse ponto, apresentou um aumento exponencial no desvio da sensibilidade e dois picos de instabilidade com inversão de sinal.

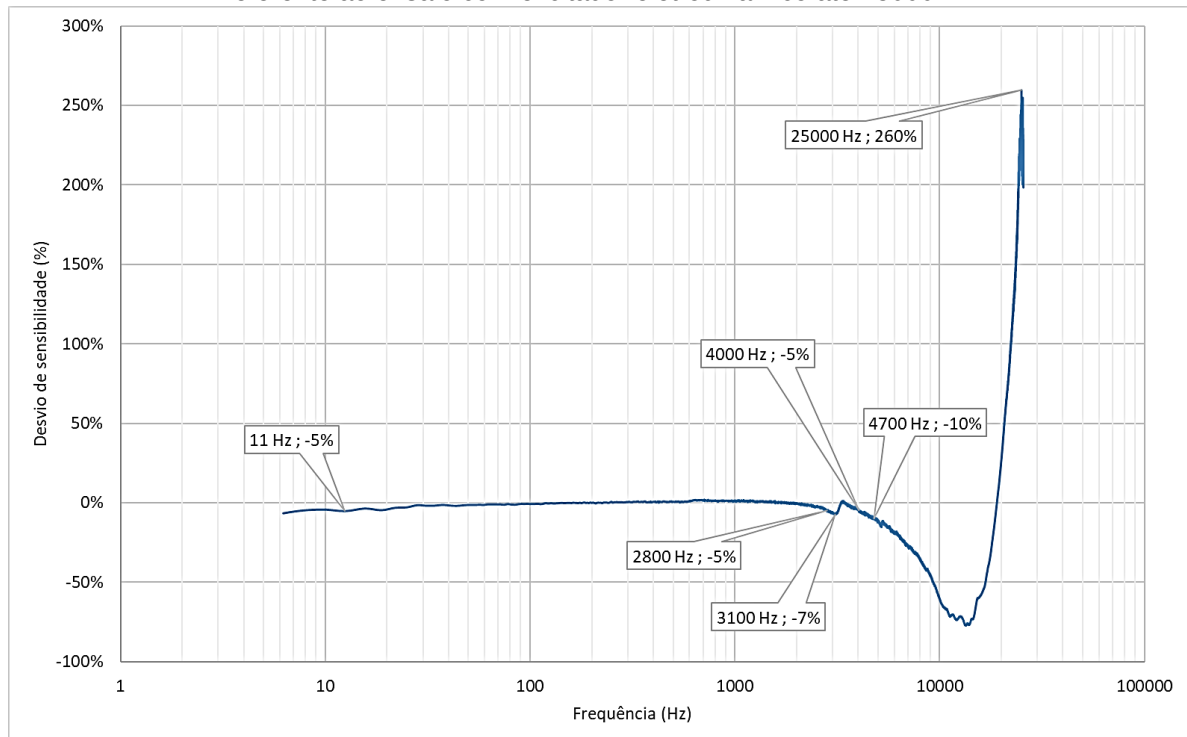
Figura 31 – Gráfico do cálculo da FRF dos acelerômetros, convertido para desvio de sensibilidade, referente ao ensaio com excitador eletrodinâmico até 6400 Hz



Fonte: Elaboração própria (2019).

A Figura 32 mostra o gráfico dos dados obtidos até a frequência de 25000 Hz, com montagem de ensaio igual ao anterior, apresentado na Figura 31. Na resposta desse ensaio, podem ser vistas características semelhantes às constantes no ensaio apresentado anteriormente, e, ao final do gráfico, é observada a aproximação do sinal para a região de ressonância do sensor em teste. Na região próxima de 3000 Hz, houve a ocorrência de inversões de sinais, e, logo em seguida, verificou-se o mesmo aumento exponencial observado no ensaio anterior.

Figura 32 – Gráfico do cálculo da FRF dos acelerômetros, convertido para desvio de sensibilidade, referente ao ensaio com excitador eletrodinâmico até 25000 Hz



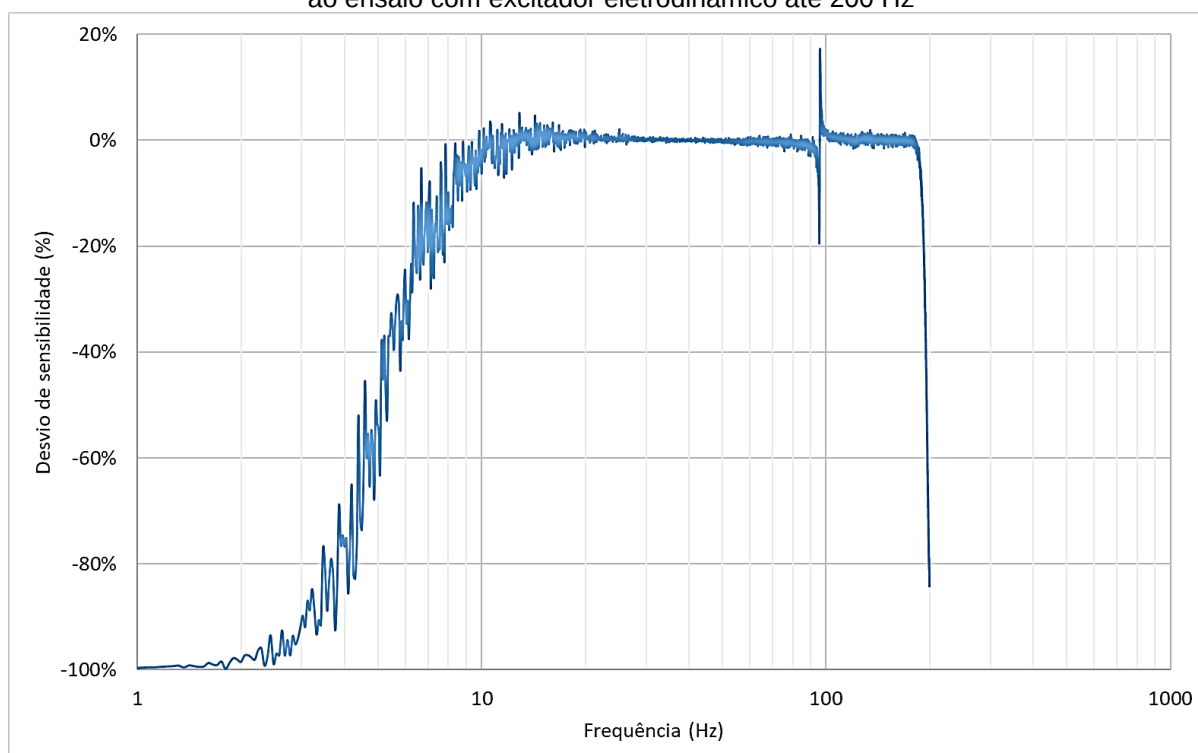
Fonte: Elaboração própria (2019).

4.1.4.2 Ensaio back to back geofone e acelerômetro

Em um último ensaio, foi montado o sensor geofone sobre o acelerômetro em teste. A montagem foi realizada com o acelerômetro em teste por dois motivos: primeiro, pelo fato de que o tamanho do acelerômetro de referência era demasiadamente pequeno em relação ao geofone; e, segundo, porque foi avaliado, pelo técnico do LVA, que o sensor acelerômetro em teste é de boa qualidade, o que não afetaria a resposta do ensaio com o geofone.

Na Figura 33, pode ser visto o gráfico do desvio de sensibilidade do sensor geofone quando comparado ao acelerômetro em teste. O cálculo da sensibilidade foi realizado a partir da FRF entre os sensores e, também, a partir da conversão do resultado, considerando a unidade de medição do geofone, que é a velocidade. Considerando-se essa montagem, observa-se, nesse mesmo gráfico, que a resposta do sensor geofone se torna linear a partir de, aproximadamente, 10 Hz. Uma inconsistência pode ser vista próximo de 100 Hz, ocorrendo uma alternância na sensibilidade. Ao final do gráfico, existe uma queda abrupta da sensibilidade, no entorno de 200 Hz.

Figura 33 – Gráfico do cálculo da FRF do geofone, convertido para desvio de sensibilidade, referente ao ensaio com excitador eletrodinâmico até 200 Hz



Fonte: Elaboração própria (2019).

4.2 Análise e discussão dos resultados

A discussão dos resultados apresentados e as considerações acerca deles são levantadas nos subtópicos a seguir.

4.2.1 Ensaio de funcionamento do equipamento

O objetivo deste ensaio foi validar o funcionamento do equipamento desenvolvido. Assim, analisando-se os dados gerados, concluiu-se que o equipamento se comportava conforme esperado, desde a eletrônica desenvolvida até o armazenamento do dado coletado em formato “.txt”, que facilitou o tratamento e a visualização desses dados. Estando esse ensaio finalizado, a pesquisa continuou para as suas próximas etapas.

O interessante a ser ressaltado sobre esse ensaio é que, com a excitação manual do sensor acelerômetro, foi obtida a frequência cerca de 7 Hz, sendo esse valor a caracterização do número atingido pela agitação da mão de uma pessoa.

4.2.2 Ensaio de caracterização do filtro passa altas desenvolvido

A resposta do filtro RC construído é de 0,21 Hz quando o sinal atinge o valor de -3 dB, ficando acima do dimensionado que foi de 0,15 Hz. Esse fato, possivelmente, ocorre em virtude de os componentes de construção do RC serem de baixo custo, ou seja, possuírem tolerância em seus valores maiores do que os componentes de precisão, que são mais caros. Para a avaliação do circuito, foi concluído que ele atendeu às expectativas, já que apresentou características de resposta dentro do esperado para esse tipo de filtro. Ademais, ocorreu a estabilização da resposta do filtro passa altas em cerca de 1,9 Hz. Esse valor, aliás, está abaixo da frequência de interesse na pesagem em movimento, já que, para isso, a frequência tem que estar entre 8 e 15 Hz, ou seja, o filtro não vai atenuar os sinais sob estudo.

4.2.3 Ensaio com excitador de referência

Com o ensaio no excitador de referência, foram obtidos valores praticamente iguais aos valores presentes no certificado de calibração fornecido pelo fabricante do sensor acelerômetro. O valor de sensibilidade obtido no ensaio foi de 10,08 mV/m/s² a 160 Hz. A coleta desse ensaio foi realizada com o equipamento desenvolvido, o que reforça, ainda mais, a afirmação de seu bom funcionamento.

4.2.4 Ensaio com excitador eletrodinâmico

O sensor acelerômetro de referência tem frequência de ressonância próxima de 10000 Hz, logo, assumindo-se a premissa de que sua resposta linear de sensibilidade se dá até 1/2 de sua frequência de ressonância, deve-se analisar os resultados até 5000 Hz. No caso em que se assumir a resposta de até 1/3 da frequência de ressonância, deve-se analisar os resultados até 3000 Hz. Assim, deve-se salientar que, no sensor de referência, existe um pequeno desvio em sua sensibilidade ao longo da faixa de frequência de uso na curva de resposta. A curva de sensibilidade do sensor pode ser observada no certificado de calibração do ANEXO F. A escolha do sensor acelerômetro de referência foi realizada pelo técnico do LVA,

que se baseou em um sensor sobre o qual possuía experiência prévia, bem como conhecimento sobre o funcionamento dele, estando o sensor adequado a este ensaio.

4.2.4.1 Ensaio back to back acelerômetros

Em ambos os ensaios, com ruído branco até 6400 Hz e até 25000 Hz, ocorreu uma inconsistência nas frequências mais altas. Essa inconsistência se dá devido ao fato de que o equipamento utilizado nos ensaios apresentou dificuldades em realizar o controle próximo a essa região de frequência.

O valor de sensibilidade obtido a 160 Hz, no ensaio de 6400 Hz, foi de 10,51 mV/m/s², e, no ensaio de 25000 Hz, foi de 10,50 mV/m/s². Além disso, no certificado de calibração do sensor em teste, o valor é de 9,98 mV/m/s², para os 160 Hz. Esse ensaio foi realizado em conjunto com o sensor de referência, e foi calculado o valor de sensibilidade a partir do sensor de referência, sendo essa a possível causa da diferença entre os valores obtidos a 160 Hz.

O desvio da sensibilidade do sensor em teste permaneceu linear e próximo a zero, quando foi calculado utilizando-se o sensor de referência, em ambos os ensaios, até, aproximadamente, 3000 Hz.

4.2.4.2 Ensaio back to back geofone e acelerômetro

No ensaio com o geofone, foi observada uma resposta linear da sensibilidade a partir de 10 Hz. O sensor de referência foi o acelerômetro testado anteriormente, e o excitador eletrodinâmico possui limites para uma determinada quantidade de massa que consegue vibrar, o que limitou o ensaio a baixas frequências para se evitarem danos ao equipamento. O sensor apresentou comportamento regular, e o ruído inicial, até 10 Hz, possivelmente aconteceu pela dificuldade de o *shaker* excitar a massa e, ainda, pelo acelerômetro estar trabalhando em baixas frequências, além de estar próximo da ressonância do sensor geofone.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente TCC, foram realizados a pesquisa e o desenvolvimento do aprendizado para utilização de um sensor acelerômetro, do tipo IEPE, bem como foi efetuada a comparação com o uso de um sensor geofone. O estudo dos sensores foi realizado neste trabalho por se tratar de transdutores utilizados em uma pesquisa de pesagem em movimento no LabTrans/UFSC (no qual o aluno está engajado em sua atividade profissional), contendo todos os pilares de estudo de seu curso de engenharia.

Especificamente sobre esses dois sensores, de início, no caso do acelerômetro, observou-se que esse tipo de sensor possui uma peculiaridade, que é o compartilhamento da alimentação e do sinal no mesmo fio de conexão ao sistema de condicionamento de sinal. Por sua vez, no funcionamento do sensor geofone, pode-se verificar que sua implementação é facilitada, pois se trata de um gerador de tensão, e que o fabricante garante que todos os geofones produzidos são praticamente idênticos, pois fornece um manual único para todos os sensores do mesmo modelo.

Com o estudo sobre os diferentes sensores utilizados para medição da aceleração, no âmbito da medição de vibrações veiculares, gerou-se conhecimento desejado acerca dos tipos de acelerômetros utilizados nesse tipo de medição. Existem principalmente dois tipos de ensaios, o de colisão e o de vibração de um veículo, seja para implementações em segurança seja para conforto do veículo. Neste TCC, o tópico de interesse foi a pesagem em movimento, considerando-se a dinâmica de um veículo como um dos fatores de erro no cálculo da pesagem. Conforme a pesquisa desenvolvida, o uso de acelerômetros é aconselhável para a medição da dinâmica veicular, e a tecnologia de acelerômetro mais utilizada é a piezo-elétrica com microeletrônica embarcada no sensor IEPE.

O desenvolvimento mais oportuno deste TCC foi a montagem de um sistema de alimentação e de condicionamento de sinal para o sensor acelerômetro do tipo IEPE. Na parte de alimentação, foi construída uma fonte de corrente regulada em 3 mA, tendo como entrada uma fonte de tensão comum de 24 V, sendo o principal componente do circuito o transistor BC557. No mesmo circuito, foi implementado um filtro passa altas, dimensionado para 0,15 Hz. Esse filtro obteve seu corte em 0,21 Hz

em -3 dB nos ensaios e se igualou a 99% do sinal injetado na sua entrada aos 1,85 Hz, revelando-se um bom desempenho já que atingiu as baixas frequências da dinâmica veicular.

A partir do *hardware* desenvolvido, foi possível criar um *software* de controle e de coleta de dados, utilizando-se de uma placa de aquisição de dados. A plataforma de desenvolvimento do *software* escolhido foi o LabVIEW da NI, por ser uma programação intuitiva e, também, por ter-se utilizado de uma placa de aquisição de dados da NI. O sistema desenvolvido foi testado em conjunto com um acelerômetro e um excitador de referência, este segundo que reproduz condições iguais às realizadas pelo fabricante para a elaboração do certificado de calibração do acelerômetro. No *software* desenvolvido, foi possível observar, em tempo real, o sinal gerado pelo estímulo do excitador no acelerômetro e, em paralelo, também foi possível observar o valor do cálculo da FFT, ambos em forma de gráfico. O resultado desse ensaio identificou o bom funcionamento de todas os componentes do sistema, pois foram obtidos valores de frequência e de sensibilidade do acelerômetro idênticos ao certificado de calibração do sensor.

A técnica de calibração conhecida como *back to back calibration* também foi utilizada para caracterizar o acelerômetro em teste. Essa técnica consiste em montar, sobre um excitador eletrodinâmico, dois sensores acelerômetros, um sobre o outro, pois, assim, ambos recebem simultaneamente o mesmo estímulo do excitador. O ensaio com os acelerômetros foi realizado em duas faixas de frequência, até 6400 Hz e até 25000 Hz. Calculando-se a FRF entre os sensores, foram obtidas respostas dentro do esperado ao se analisarem os manuais dos sensores. Na sequência, foi realizado o mesmo tipo de ensaio com um acelerômetro e um geofone (velômetro). No ensaio com o geofone, tornou-se necessária a conversão do sinal de velocidade para aceleração, para, a partir disso, calcular-se a FRF, obtendo-se, também, uma resposta dentro do esperado. Em ambos os ensaios mencionados, os equipamentos foram disponibilizados pelo LVA/UFSC, sendo este um laboratório referência no ramo de vibração e de acústica. Foi considerado que, com esses ensaios, seria possível obter tanto os dados necessários para o entendimento do funcionamento dos sensores quanto os registros de dados para as análises realizadas neste TCC.

No TCC apresentado, foram utilizadas técnicas de produção textual, estruturando-se, de forma coesa, a pesquisa e o desenvolvimento do estudo. Informações relevantes ao uso de sensores acelerômetros e geofone foram

levantadas, documentadas e podem ser utilizadas em outros estudos e pesquisas específicas, além de ser um material de consulta para esses tipos de equipamentos, de sistemas e de montagens físicas em laboratório.

Como proposta de aplicação do sensor acelerômetro sob análise, foi sugerido um programa disponibilizado na plataforma de desenvolvimento LabVIEW. No programa analisado, foram verificados os parâmetros de entrada e de saída de dados, validando-se o uso do sensor na aplicação de balanceamento de eixos. O balanceamento de eixos é importante para garantir a integridade do equipamento e para prolongar a vida útil das peças dele, pois diminui os esforços rotacionais da máquina. O custo do equipamento sugerido pela NI, para ser usado nesse exemplo, é de R\$13.570,00 para a placa de aquisição de dados com eletrônica embutida para controle do acelerômetro IEPE. De modo contrastante, a eletrônica desenvolvida neste TCC para os mesmos fins custou: R\$2.915,00 para a placa de aquisição de dados; e R\$1,90 para a eletrônica e mais uma fonte 24 V. Nesse contexto, revela-se uma redução de quase cinco vezes, ao se compararem os valores. Isso se mostra demasiado importante, já que contribui para trabalhos futuros, viabilizando outros ensaios e estudos, pois seriam financeiramente viáveis e tecnicamente já testados e disponibilizados por este trabalho. Importante destacar que a montagem e a eletrônica podem ser consideradas uma inovação desenvolvida para essa possibilidade de aplicação, uma vez que não estava disponível esse desenvolvimento para essa análise, o que demonstrou um ganho a mais para o conhecimento do aluno e que ficará disponível para a instituição, podendo, no futuro, ser mais um foco de estudo. Vale ressaltar que a placa de aquisição de dados utilizada no desenvolvimento deste sistema pode ser de outros fabricantes, podendo-se diminuir, ainda mais, o custo desse equipamento.

Como propostas para trabalhos futuros ou para aplicações do sensor acelerômetro, pode-se sugerir:

- A implementação de um sistema de balanceamento de eixos, utilizando o *software* disponibilizado pela NI na plataforma de desenvolvimento LabVIEW.
- O desenvolvimento de eletrônica para alimentação e para condicionamento de sinal para coleta com múltiplos sensores.
- O estudo de formas de fixação e de posicionamento do sensor acelerômetro em casos específicos de diferentes tipos de veículos a serem estudados.

- A aplicação de acelerômetros na curva de deslocamento de mesas XY desenvolvidas no IFSC.
- A análise de sensores mais simples e baratos, usando a mesma montagem e analisando suas possibilidades de aplicação.

Tendo atingido todos os objetivos propostos, a partir do uso de procedimentos metodológicos consistentes e com aplicação prática direta, tanto na sua realização quanto para trabalhos futuros, o presente trabalho disponibilizou para o meio acadêmico um conjunto de conhecimentos relevantes. Dessa forma, contribui para que o Laboratório de Automobilística do IFSC possa aplicar esses conhecimentos em trabalhos de aulas ou mesmo em novos TCCs, que visem aprimorar as informações geradas e desenvolver novos conhecimentos, contribuindo, assim, dentro das limitações de um TCC, para o conhecimento científico, com aplicação prática e, principalmente, reduzindo custos no uso de sensores acelerômetro do tipo IEPE.

REFERÊNCIAS

- ALBERTAZZI, A. G. Jr.; SOUSA, A. R. **Fundamento de METROLOGIA científica e industrial**. Florianópolis: Manole, 2013.
- AMIN, Syedul. et al. PREFERENCE AND PLACEMENT OF VEHICLE CRASH SENSORS. **Tehnički Vjesnik – Technical Gazette**, Osijek, Sveučilište Josipa Jurija Strossmayera u Osijeku. Disponível em: <<https://hrcak.srce.hr/file/186279>>. Acesso em: 21 jun. 2019.
- CEBON, D.; WINKLER, C. B. **Multiple-sensor weigh-in-motion: theory and experiments**. In: Pavement Management: Data Collection, Analysis, and Storage. Transport Research Record, 1311. Cambridge, Reino Unido, 1991b.
- CEMB HOFMANN UK. **UK SPECIALISTS IN BALANCING MACHINES AND SERVICES**. 2015. 1 figura, color. Disponível em: <<http://www.cembhofmann.co.uk/>>. Acesso em: 23 jun. 2019.
- ROSET, X. et al. Calibration Process of Geophones. In: Research Gate, 2011. Conference Paper.
- DESY. **Geophones**. s/d. 1 figura, color. Disponível em: <<https://vibration.desy.de/equipment/geophones/>>. Acesso em: 20 jun. 2019.
- Fierce Electronics. **The Principles of Piezoelectric Accelerometers**. 2004. 1 figura, color. Disponível em: <<https://www.fierceelectronics.com/components/principles-piezoelectric-accelerometers>>. Acesso em: 20 jun. 2019.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte. **Institucional**. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/acesso-a-informacao/insitucional>>. Acesso em: 18 jun. 2019.
- DNIT. **Posto Integrado Automatizado de Fiscalização**. 2016. 1 figura, color. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviaras/pesagem/piaf>>. Acesso em: 20 jun. 2019.
- DNIT. **Relatório de Concepção do Modelo**. Fase D – Metodologia para Identificação e Análise da Deterioração. Brasília, 2011.
- DNIT. **QUADRO DE FABRICANTES DE VEÍCULOS**. 2012. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/download/rodovias/operacoes-rodoviaras/pesagem/qfv-2012-abril.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2019.
- FAPEU – Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária. **Institucional**. Disponível em: <http://www.fapeu.com.br/index2.php?id_conteudo=1>. Acesso em: 20 jun. 2019.
- GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. São Paulo: Atlas, 2013.
- HALLIDAY, D. et al. **Fundamentos de Física – Mecânica**. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina. **Institucional**. Disponível em: <<https://www.ifsc.edu.br/o-ifsc>>. Acesso em: 20 jun. 2019.
- IFSTTAR – *Institut français des sciences et Technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux*. **Institucional**. Disponível em: <<https://www.ifsttar.fr/linstitut/lifsttar/qui-sommes-nous/>>. Acesso em: 20 jun. 2019.

LabTrans– Laboratório de Transportes e Logística. **Institucional**. Disponível em: <<https://www.labtrans.ufsc.br/institucional/sobre-o-labtrans/>>. Acesso em: 20 jun. 2019.

LVA – Laboratório de Vibrações e Acústica. **Institucional**. Disponível em: <<http://lva.confed.com.br/sobre/>>. Acesso em: 20 jun. 2019.

MORESI, E. **Metodologia de Pesquisa**. Manual do programa de pós-graduação em Gestão do Conhecimento e Tecnologia da Informação da Universidade Católica de Brasília, 2003.

NI – *National Instruments*. **Institucional**. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/about-ni.html>>. Acesso em: 20 jun. 2019.

NI. **Como funcionam os acelerômetros?**. 2019. 1 figura, color. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/06/measuring-vibration-with-accelerometers.html>>. Acesso em: 20 jun. 2019.

NI. **Two Plane Balancing Example with DAQmx**. 2016. 1 figura, color. Disponível em: <<http://www.ni.com/example/12500/en/>>. Acesso em: 23 jun. 2019.

OTTO, G. G. **ESTUDO DA RELAÇÃO SENSOR-PAVIMENTO PARA AUMENTO DA PRECISÃO DE SISTEMAS DE PESAGEM EM MOVIMENTO**. 2018. 309 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

PCB PIEZOTRONICS. **Construction Of ICP® Accelerometers**. 1 figura, color. Disponível em: <http://www.pcb.com/Resources/Technical-Information/Tech_Accel>. Acesso em: 20 jun. 2019.

SOUZA, F. F. **Proposição de Modelo para Transformação de Postos de Pesagem de Veículos em Postos de Pesagem de Veículos Automatizados**. 59f. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Especialização em Operações Rodoviárias) – Departamento de Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/179855>>. Acesso em: 20 jun. 2019.

OLIVEIRA, M. D. (Prof.). **METODOLOGIA CIENTÍFICA: um manual para a realização de pesquisas em administração**. manual do Curso de pós-graduação em Administração da Universidade Federal de Goiás – Câmpus Catalão, 2011.

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina. **Institucional**. Disponível em: <<http://estrutura.ufsc.br/>>. Acesso em: 20 jun. 2019.

Vibration Research Corporation. **ACCELEROMETER CALIBRATION**. 2017. 2 figuras, color. Disponível em: <<https://vibrationresearch.com/accelerometer-calibration-verification-vr9106/>>. Acesso em: 21 jun. 2019.

KISTLER. **Lineas quartz sensor for Weigh-In-Motion (WIM)**. Winterthur; 2018. Disponível em: <<https://www.kistler.com/?type=669&fid=85181&model=document>>. Acesso em: 21 jun. 2019.

WIKIPEDIA. **Balancing machine**. 2019. 1 figura, color. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Balancing_machine>. Acesso em: 23 jun. 2019.

ANEXO

ANEXO A – Certificado de calibração sensor acelerômetro

Calibration Certificate

Model: 14205

Serial No: SN - 04457

Dynamic:

Voltage Sensitivity: 10.08 mV/ms⁻²
 or: 98.90 mV/g
 (Measurement Condition: 160Hz, 100 ms⁻² at 23°C)
 Resolution: 0.001 m/s²
 Transverse Sensitivity: < 5 %
 (at 30Hz, 100ms⁻²)

Frequency Range (±5%) 0.15- 6000 Hz
 (±10%) 0.1 - 7000 Hz

Amplitude Range: ±500 m/s² peak

Undamped natural Frequency: 37 k Hz

Mounted Resonance Frequency: 28 k Hz

Amplitude Non-Linearity: < 1 %

Polarity is positive on the center of the connector for an acceleration directed from the mounting surface into the body of the accelerometer

Bias Voltage: 8-10 V

Excitation Voltage: 18-24 V

Constant Current: 2-10 mA

Time Constant: > 1 S

Output Impedance: < 100 Ω

Noise (2Hz-20KHz): 10 μV rms

Isolation Resistance: 0 Ω

(Body to mount surface)

Environmental:

Max. Shock: 10000 m/s² peak

Humidity: Welded Sealed

Temperature Range: -40 to +120 °C

Physical:

Connector: M5

Material: Stainless Steel

Weight (excluding cable): 25 gram

Sensing Element: Piezo-ceramic

Construction: Planar Shear

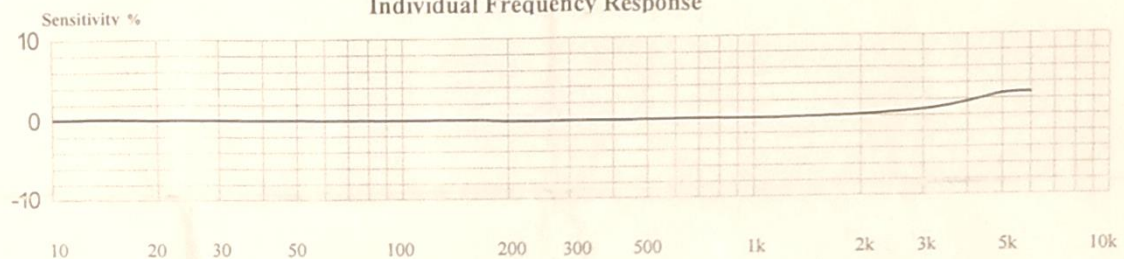
Mounting Thread: M5

Mounting Surface Flatness: <3 μm

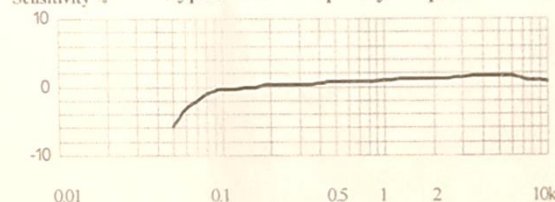
Mounting Torque: 3 N-m

Mounting Technique: Examine the mounting surface for cleanliness and smoothness. If necessary, machining mounting surface. Fasten a M5 mounting stud. Take care not to exceed the recommended mounting torque and the stud does not bottom in the mounting hole. A thin film of grease between the accelerometer and the mounting surface helps achieve good contact and improve mounting stiffness.

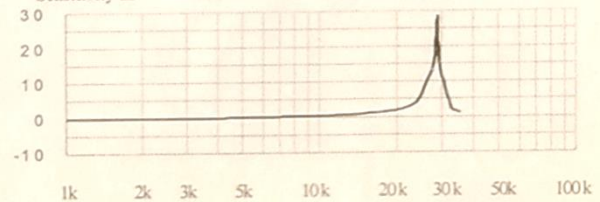
Individual Frequency Response



Typical Low Frequency Response



Typical High Frequency Response



ANEXO B – Datasheet do Geofone



GISCO,s 4.5 Hertz Geophone

Note: Lead-in and connector are specific to customer

GISCO geophone is a state of the art digital grade geophone. It has unparalleled geophone-to-geophone uniformity. The unit has outstanding reliability and field durability. Usage of this unit spans the world.

Type	LGT-20D4.5
Natural Frequency (Hz)	4.5 ± 0.5Hz
Open Circuit Damping	0.7 ± 5%
Damping with Shunt Resistance	0.51 ± 5%
Intrinsic Voltage Sensitivity (V/cm/s)	0.234 ± 5%
Sensitivity with Shunt Resistance (V/cm/s)	
Coil Resistance	395 ± 5%
Close Circuit Resistance	
Harmonic Distortion	≤0.3%
Typical Spurious Frequency	≥180
Moving Mass (g)	11.3
Coil Excursion P-P	1.5
Maintains Fn Specifications to Tilt Angle	≤10
Core Unit Diameter (mm)	25.4
Core Unit Height (mm)	33
Core Unit Mass (mm)	87
Operating Temperature(°C)	-40~+90
Warranty (year)	1

ANEXO C – Placa de aquisição de dados USB-6008

USER GUIDE

NI USB-6008/6009

Bus-Powered Multifunction DAQ USB Device

Français	Deutsch	日本語	한국어	简体中文
ni.com/manuals				

The National Instruments USB-6008/6009 devices provide eight single-ended analog input (AI) channels, two analog output (AO) channels, 12 DIO channels, and a 32-bit counter with a full-speed USB interface. This user guide describes how to use these devices.

For specifications, refer to the *NI USB-6008 Device Specifications* and the *NI USB-6009 Device Specifications* available at ni.com/manuals.

The following table compares the NI USB-6008 and NI USB-6009 devices.

Table 1. NI USB-6008 and NI USB-6009 Comparison

Feature	NI USB-6008	NI USB-6009
AI resolution	12 bits differential, 11 bits single-ended	14 bits differential, 13 bits single-ended
Maximum AI sample rate, single channel ¹	10 kS/s	48 kS/s
Maximum AI sample rate, multiple channels (aggregate) ¹	10 kS/s	48 kS/s
DIO configuration	Open collector ²	Each channel individually programmable as open collector or active drive ²

The following figure shows key functional components of the NI USB-6008/6009.

¹ System-dependent.
² This document uses NI-DAQmx naming conventions. Open-drain is called open collector and push-pull is called active drive.



ANEXO D – Datasheet do transistor BC557C

BC556B, BC557A, B, C, BC558B

Amplifier Transistors

PNP Silicon

Features

- Pb-Free Packages are Available*

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector - Emitter Voltage	V_{CEO}	-65 -45 -30	Vdc
Collector - Base Voltage	V_{CBO}	-80 -50 -30	Vdc
Emitter - Base Voltage	V_{EBO}	-5.0	Vdc
Collector Current - Continuous - Peak	I_C I_{CM}	-100 -200	mAdc
Base Current - Peak	I_{BM}	-200	mAdc
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	625 5.0	mW mW/ $^\circ\text{C}$
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	1.5 12	W mW/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{slg}	-55 to +150	$^\circ\text{C}$

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	200	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction-to-Case	$R_{\theta JC}$	83.3	$^\circ\text{C/W}$

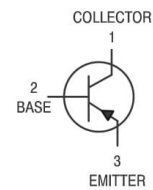
Stresses exceeding Maximum Ratings may damage the device. Maximum Ratings are stress ratings only. Functional operation above the Recommended Operating Conditions is not implied. Extended exposure to stresses above the Recommended Operating Conditions may affect device reliability.

*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.

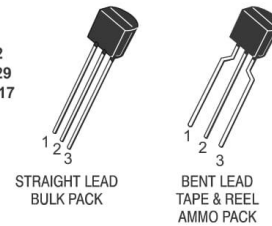


ON Semiconductor®

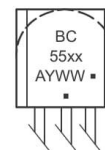
<http://onsemi.com>



TO-92
CASE 29
STYLE 17



MARKING DIAGRAM



xx = 6B, 7A, 7B, 7C, or 8B
A = Assembly Location
Y = Year
WW = Work Week
▪ = Pb-Free Package

(Note: Microdot may be in either location)

ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 6 of this data sheet.

ANEXO E – Documentação do manual da NI sobre balanceamento de eixos

Two Plane Balancing Example with DAQmx

Publish Date: mar 08, 2016

Overview

Unbalance is a very common source of high vibration that is identified by excessive levels of vibration amplitudes at a frequency that is synchronous with machine speed. Unbalance happens because the densities of materials are uneven; shafts are not perfectly round or not mounted exactly in the center, etc. Weight unbalance in a rotating system often produces excessive synchronous forces that reduce the life spans of various mechanical elements. Therefore, balancing is important in the manufacture and maintenance process of rotating machines.

Table of Contents

1. Introduction
2. Download
3. Fundamentals of Two Plane Balancing
4. Hardware Setup
5. Using the Software
6. Related Links
7. Appendix A: Two Plane Balancing Theory

1. Introduction

Balancing usually is performed in two ways -- shop balancing and field balancing. Shop balancing mounts the mechanical parts on a balancing machine and balances each part separately. Field balancing balances the machine in normal operations with the rotor mounted in the bearings. Large machines, such as steam turbines, electric motors, and generator armatures, often require field balancing. Field balancing times average 4 hours and rates range from \$60 to \$200 per hour. USB dynamic signal acquisition (DSA) devices coupled with a laptop make for an ideal field balancing system because they are portable and lightweight.

This two-plane balancing demo is built with LabVIEW and DAQmx to be used with a USB-9234 or other DAQmx based dynamic signal acquisition card. This demo shows how to use the device to measure the vibrations of rotating machinery and reduce the vibrations through balancing. You can use the demo VIs in real-world applications with some simple modifications to the code.

Note that this code is built on the Sound and Vibration Measurement Suite

(<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/203624>), which is required to run it. You may obtain a free 7 day trial if you wish here (<https://lumen.ni.com/nicif/us/evalsvmeassuite/content.xhtml>).

2. Download

Two Plane Balancing Example (ftp://ftp.ni.com/pub/devzone/tut/two_plane_balancing.zip)

3. Fundamentals of Two Plane Balancing

There are usually two types of unbalance: static unbalance and dynamic unbalance.

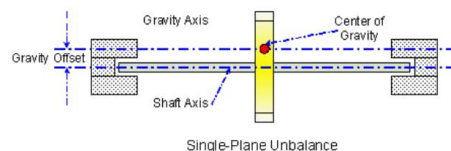


Figure 1.

As shown in Figure1, static unbalance happens when the gravity centre of a rotor shift from the geometrical center of the thin plane. In some cases, you can place the rotor on knife edges, and allow gravity to pull the heavy spot down to the bottom of the assembly to detect static unbalance. The thin planes in real cases can be fans, grinding discs, pulleys, flywheels, gears and so on. They share a common characteristic that the rotors are quite narrow and have no axial swash motion. You can remove static unbalance by adding/removing balancing screws (or sliding weights) or drilling/grinding on the rotor elements.

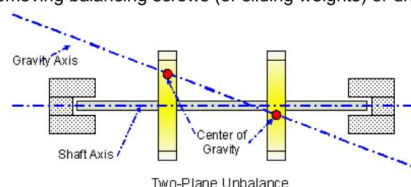


Figure 2.

As shown in Figure2, the next level of unbalance complexity consists of weight mal-distribution in two separate geometric planes. You need to establish two-plane balancing when the rotors are elongated and rigid, such as electric motors, generator armatures, machine spindles, grinding rolls and so on.

Correction of unbalance situations involves characterizing the heavy spot. The heavy spot is the radial location at which the excessive radial mass distribution exists. This heavy spot is always a location that is opposite the location where weight needs to be added. Unfortunately, unless previous balancing information is available, the location of the heavy spot cannot be identified directly. In this case, you can use the Influence Coefficient method for calculation of correction weights as many field

balancing solutions do.

The influence coefficient is used to describe how the rotor system responds to the unbalanced weight changes. Once a rotor installs a trial weight to produce a change in vibration amplitude or phase, the influence caused by the trial weight, or the influence coefficients can be calculated. A single-plane balance procedure will produce one balance response coefficient. Multiple-plane balancing will produce a number of coefficients depending upon the number of balance planes. Since the initial vibration can be viewed as the response of the rotor to the initial mass unbalance, you can calculate the initial mass unbalance with the initial vibration and the influence coefficients.

The system shown in Figure 3 is a typical two-plane balancing system. The whole system consists of a rotor, two bearings, two accelerometers and one optical tachometer. The accelerometers are mounted on the bearings and used to acquire vibration signals. The tachometer signal is used to calculate the rotating speed and synchronize the vibration signals in each revolution

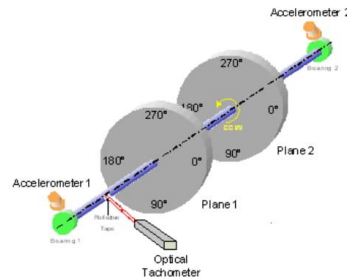


Figure 3.

Assuming the rotor system is a linear system, the response at each measurement point (the bearing point) is equal to the vector summation of the unbalance response at each plane. This means the weight at plane 1 can contribute to the vibration acquired at bearing 1 as well as the vibration acquired at bearing 2. So does the weight at plane 2. The basic relationship between the vibration response and the unbalance weight at the planes can commonly be expressed by a group of sensitivity vectors. By adding a known calibration weight at a known angular location on the planes, and measuring the vibration response vectors at both bearings, you can determine the sensitivity vectors experimentally. Once you figure out the sensitivity vectors, you can calculate the initial unbalance weight at each plane and make corrections. The details of this method are introduced in the appendix. You can refer to the appendix if you want to know more about this method.

4. Hardware Setup

The mechanical connections are shown below in Figure 4. The accelerometers are powered by the internal excitation of the DSA card. The tachometer should be a 0-5 TTL pulse that provides rotation information about the system.

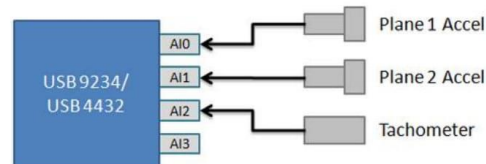


Figure 4.

5. Using the Software

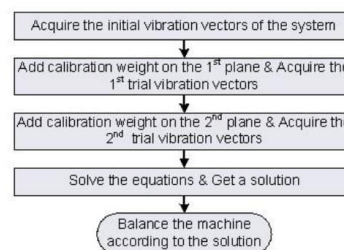


Figure 5.

The process of the demo is illustrated in Figure 5 above. Before running the software you must first configure the software to run properly on the Configuration Tab as shown below in Figure 6.

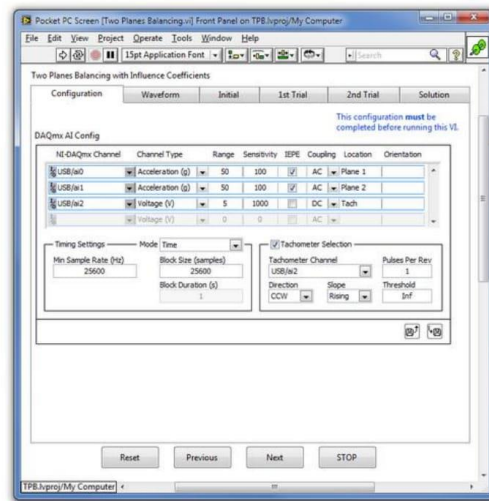


Figure 6. The Configuration Tab

You can then begin to run the VI and move over to the Waveform tab. On this tab you can verify the proper signals are being acquired from the tachometer and two accelerometers by pressing the **Acquire** button.

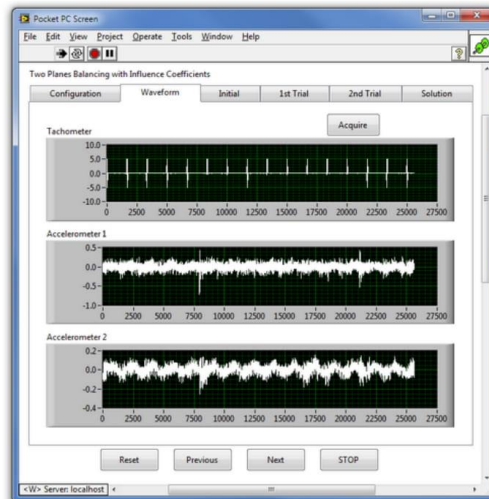


Figure 7. Initial acquisition of waveforms.

Once the signals have been verified you can move to the Initial tab to begin balancing. This tab allows you to acquire the initial vibrations of the system. You need to set the number of acquisition to average before taking your initial acquisition. This value will be carried through the process. Keep in mind that taking a higher number of averages improves accuracy, but also will increase the time required for balancing. Once you are satisfied with the number of averages, press the **Acquire** button again to record your initial values.

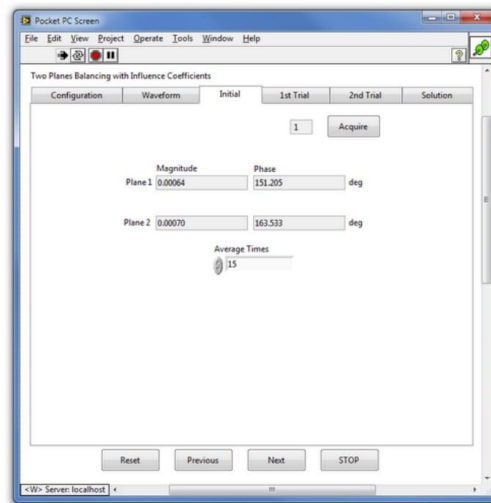


Figure 8. Initial recording of the vibration levels of the two accelerometers.

The next step is to place your first trial weight. A known weight should be added to the first plane at a known angle. These values should be entered in the Weight and Phase controls of the 1st Trial tab in grams and degrees respectively. Once the values are entered, press the **Acquire** button again to record the values for the first trial.

You also can find a **Save** button and a **Load** button on this page. You can use these two buttons to save and load all the environment variables so that you do not have to repeat the measurement if you stop the VI by mistake or any error occurs. You also can use the **Save** button to save a whole set of measurement results instead of marking them down manually.

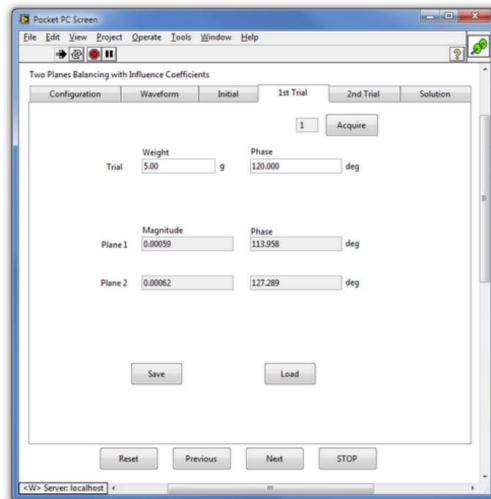


Figure 9. The 1st Trial Tab. The 2nd Trial Tab is identical.

After the 1st trial is complete you should remove the weight from the first plane and place a second trial weight on the second plane at a known angular position. You can choose to either use the same weight or a different weight. Enter the weight and position in the controls on the 2nd Trial tab. Once again, press the **Acquire** button to record the trial data. After the 2nd trial is complete, you may remove that weight as well.

The final tab is the Solutions tab. Once both trials have been completed you can press the **Solution** button to have your balance weights and angles calculated. You may then place these weights at the specified angles on the two planes and press the **Acquire** button again to perform a final, balanced, acquisition. This should demonstrate a more balanced machine than the initial readings.

6. Related Links

NI Machine Condition Monitoring Portal (<http://www.ni.com/mcm>)

NI USB-9234 (<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/204481>)

NI USB-4432 (<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/206677>)

NI Sound and Vibration Measurement Suite (<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/203624>)

7. Appendix A: Two Plane Balancing Theory

Assume some kind of weight unbalances exist in the two-plane system, you can use the following traditional two-plane vector equations for the initial unbalance response of a linear mechanical system:

$$\vec{A}_1 = \left\{ \frac{\vec{U}_1}{S_{11}} \right\} + \left\{ \frac{\vec{U}_2}{S_{12}} \right\} \quad (1)$$

$$\vec{A}_2 = \left\{ \frac{\vec{U}_1}{S_{21}} \right\} + \left\{ \frac{\vec{U}_2}{S_{22}} \right\} \quad (2)$$

where:

$\vec{A}_1$ = Initial Vibration Vector at Bearing 1 (Grs,p-p at Degrees)

$\vec{A}_2$ = Initial Vibration Vector at Bearing 2 (Grs,p-p at Degrees)

S_{11} = Sensitivity Vector at Bearing 1 to Weight at Plane 1 (Grams/Grs,p-p at Degrees)

S_{12} = Sensitivity Vector at Bearing 1 to Weight at Plane 2 (Grams/Grs,p-p at Degrees)

S_{21} = Sensitivity Vector at Bearing 2 to Weight at Plane 1 (Grams/Grs,p-p at Degrees)

S_{22} = Sensitivity Vector at Bearing 2 to Weight at Plane 2 (Grams/Grs,p-p at Degrees)

$\vec{U}_1$ = Mass Unbalance Vector at Plane 1 (Grams at Degrees)

$\vec{U}_2$ = Mass Unbalance Vector at Plane 2 (Grams at Degrees)

In order to calculate the influence coefficients of the system, we must add some trial weight at both planes to acquire vibration vectors under different conditions. For a linear system, the addition (or removal) of a calibration weight W1 at plane 1 should vectorially sum with the existing unbalance U1 to produce the following new pair of vector equations:

$$\vec{B}_{11} = \left\{ \frac{\vec{U}_1 + \vec{W}_1}{S_{11}} \right\} + \left\{ \frac{\vec{U}_2}{S_{12}} \right\} \quad (3)$$

$$\vec{B}_{21} = \left\{ \frac{\vec{U}_1 + \vec{W}_1}{S_{21}} \right\} + \left\{ \frac{\vec{U}_2}{S_{22}} \right\} \quad (4)$$

where:

$\vec{B}_{11}$ = Vibration Vector at Bearing 1 with Weight W1 at Plane 1 (Grs,p-p at Degrees)

$\vec{B}_{21}$ = Vibration Vector at Bearing 2 with Weight W1 at Plane 1 (Grs,p-p at Degrees)

$\vec{W}_1$ = Calibration Weight Vector at Plane 1 (Grams at Degrees)

Removal of the calibration weight at balance plane 1, plus another calibration weight W2 at balance plane 2 produces the following pair of vector equations:

$$\vec{B}_{12} = \left\{ \frac{\vec{U}_1}{S_{11}} \right\} + \left\{ \frac{\vec{U}_2 + \vec{W}_2}{S_{12}} \right\} \quad (5)$$

$$\vec{B}_{22} = \left\{ \frac{\vec{U}_1}{S_{21}} \right\} + \left\{ \frac{\vec{U}_2 + \vec{W}_2}{S_{22}} \right\} \quad (6)$$

where:

$\vec{B}_{12}$ = Vibration Vector at Bearing 1 with Weight W2 at Plane 2 (Grs,p-p at Degrees)

$\vec{B}_{22}$ = Vibration Vector at Bearing 2 with Weight W2 at Plane 2 (Grs,p-p at Degrees)

$\vec{W}_2$ = Calibration Weight Vector at Plane 2 (Grams at Degrees)

The six equations above contain eight known vector quantities: six vibration vectors and two calibration weights. The calculation procedure initially solves for the four unknown balance sensitivity vectors, and finally the two mass unbalance vectors are calculated. The following expression provides a general solution for balance sensitivity vectors for the solution:

$$\vec{S}_{mp} = \left\{ \frac{\vec{W}_p}{\vec{B}_{mp} - \vec{A}_m} \right\} \quad (7)$$

In equation (7), the subscript m specifies the measurement plane, and the subscript p identifies the weight correction plane. Combining the solutions for the four balance sensitivity vectors within the initial equations (1) and (2) yields the following result for mass unbalance at both correction planes:

$$\vec{U}_1 = \frac{(\vec{S}_{12} \times \vec{A}_1) - (\vec{S}_{22} \times \vec{A}_2)}{\begin{pmatrix} \vec{S}_{12} \\ \vec{S}_{11} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \vec{S}_{22} \\ \vec{S}_{21} \end{pmatrix}} \quad (8)$$

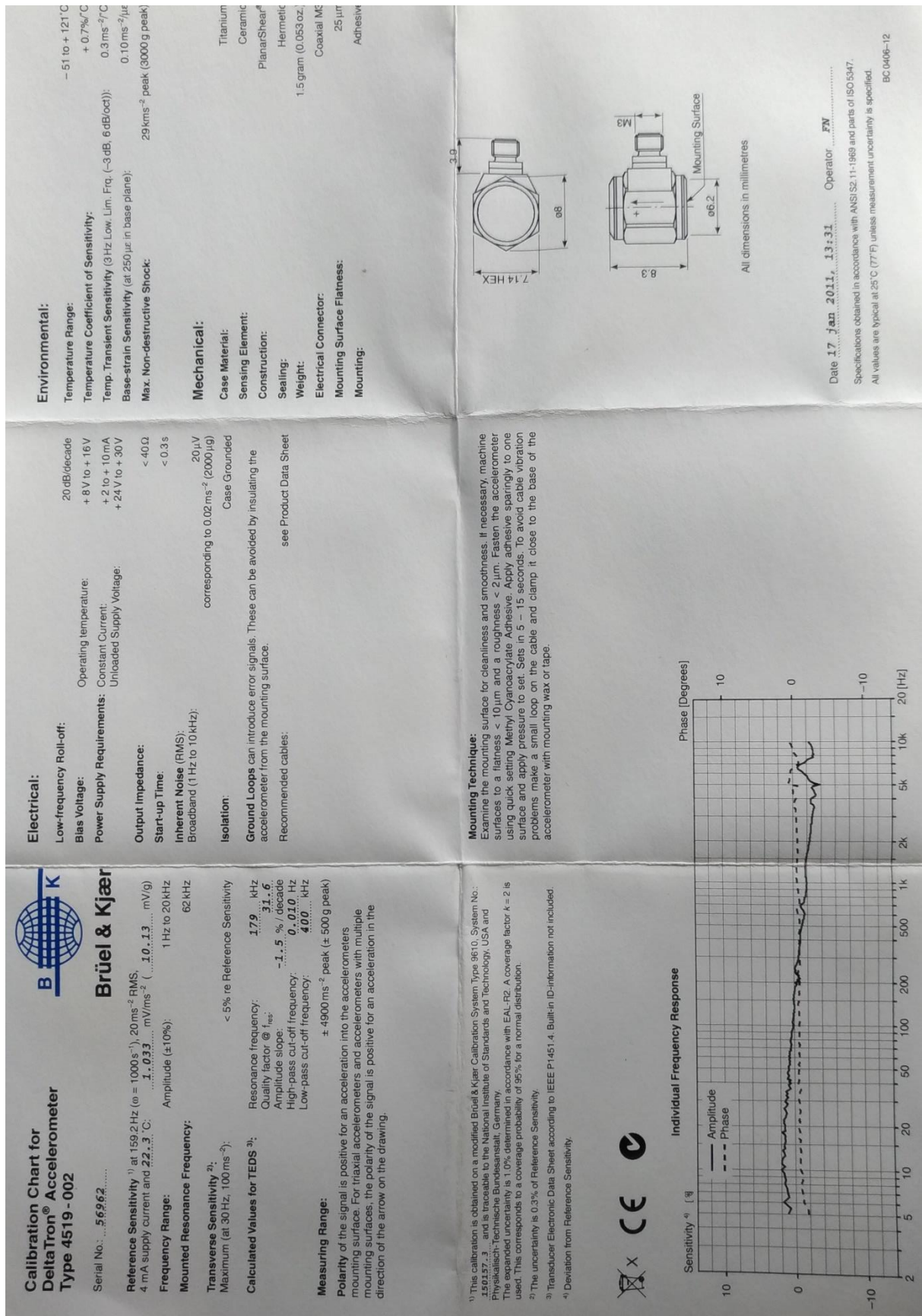
$$\overline{U}_2 = \frac{(\overline{S}_{21} \times \overline{A}_2) - (\overline{S}_{11} \times \overline{A}_1)}{\begin{pmatrix} \overline{S}_{21} \\ \overline{S}_{22} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \overline{S}_{11} \\ \overline{S}_{12} \end{pmatrix}} \quad (9)$$

The calculated mass unbalance vectors ($\overline{U}_1$ and $\overline{U}_2$) represent the amount of weight that should be used at each balance correction plane. The angles associated with these unbalance vectors represent the angular location of the mass unbalance. Hence, weight can be removed at the calculated angles, or an equivalent weight may be added at the opposite side of the rotor. That is, if weight must be added, the weight addition angle would be equal to the calculated mass unbalance vector angle plus or minus 180°. Although it is generally desirable to remove weight from a rotor during balancing, we only can add balance correction weights to the planes using in this demo. And, calibration weight W2 must be removed from Plane 2 before adding new balance correction weight.

Comentários dos clientes

3 Comentários dos clientes | Envie seu comentário (http://sine.ni.com/apps/utf8/nidz_display_comments.create_comment?p_title=Two+Plane+Balancing+Example+with+DAQmx&p_doc_id=DZTUT-12500-EN&p_doc_type=DZTUT&p_url=http://www.ni.com/example/12500/en&p_doc_url_id=12500)

ANEXO F – Certificado de calibração do acelerômetro de referência



¹⁾ The calibration is obtained on a modified Brüel & Kjær Calibration System Type 9610, System No.: 11901575, traceable to the National Institute of Standards and Technology, USA and Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Germany.

²⁾ The uncertainty is 0.3% of Reference Sensitivity.

³⁾ Transducer Electronic Data Sheet according to IEEE P1451.4. Built-in ID-information not included.

⁴⁾ Deviation from Reference Sensitivity

