

Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro de Blumenau  
Departamento de Engenharia de  
Controle, Automação e Computação



Júlio Joel da Costa Neto

Identificação e Classificação de Defeitos em Rolamentos a partir  
de um Anderômetro

Blumenau  
2019

**Júlio Joel da Costa Neto**

## **Identificação e Classificação de Defeitos em Rolamentos a partir de um Anderômetro**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Engenheiro de Controle e Automação.  
Orientador: Prof. Dr. Ciro André Pitz

Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro de Blumenau  
Departamento de Engenharia de  
Controle, Automação e Computação

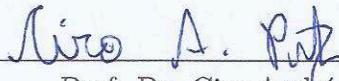
Blumenau  
2019

Júlio Joel da Costa Neto

## Identificação e Classificação de Defeitos em Rolamentos a partir de um Anderômetro

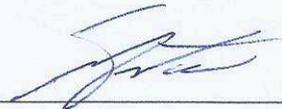
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

**Comissão Examinadora**



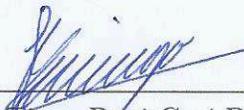
---

Prof. Dr. Ciro André Pitz  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Orientador



---

Prof. Dr. Marcos Vinicius Matsuo  
Universidade Federal de Santa Catarina



---

Prof. Dr. Tiago Davi Curi Busarello  
Universidade Federal de Santa Catarina

Blumenau, 9 de julho de 2019

Dedico este trabalho aos meus pais, que nunca mediram esforços para me proporcionar uma educação de qualidade. E à minha irmã, que me inspira a sempre continuar com a busca por conhecimento.

# Agradecimentos

Aos meus pais, meus irmãos e minha namorada por todo apoio e incentivo em meus estudos.

Ao professor Dr. Ciro André Pitz, por todos os ensinamentos e orientação para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina, em especial ao Centro de Blumenau por toda estrutura disponibilizada, e aos seus professores pela dedicação e conhecimento transmitido.

À empresa WEG pela oportunidade e possibilidade de realizar este trabalho juntamente com o estágio.

Aos meus amigos, por todos os momentos e parceria durante a graduação.

*"If you don't challenge yourself,  
you will never realize what you can become."  
(Anonymous)*

# Resumo

Neste trabalho, é realizado um estudo para aprimorar o controle de qualidade de rolamentos na empresa WEG Motores por meio dos sinais gerados por um anderômetro. Inicialmente, são estudados os fundamentos da análise de falhas em rolamentos, os principais tipos de defeitos e suas frequências características. O anderômetro também é estudado, bem como seu princípio de funcionamento e sinais disponíveis para aquisição. São apresentados diferentes métodos para detecção de falhas em rolamentos, sendo utilizado neste trabalho a análise do nível RMS (*root mean square*) dos sinais obtidos em três bandas de frequência. Além disso, é usada a técnica do envelope, a qual foi escolhida em razão de ser uma ferramenta apropriada para identificar falhas em rolamentos na fase inicial. Os sinais gerados pelo anderômetro são adquiridos por meio de uma placa de aquisição de sinais NI-9229 da National Instruments, processados e analisados utilizando técnicas de detecção e classificação de falhas em rolamentos. As técnicas nos domínios do tempo e da frequência são implementadas no *software* LabVIEW, sendo validadas por meio da análise de dois rolamentos em boas condições e seis rolamentos com defeitos previamente conhecidos. Os resultados obtidos mostram que o programa desenvolvido é efetivo na identificação de falhas em rolamentos para os ensaios realizados.

**Palavras-Chave:** 1. Anderômetro. 2. Controle de Qualidade. 3. Instrumentação. 4. Rolamento. 5. Vibração.

# Abstract

In this work, a study is performed to improve the quality control process of rolling bearings using the signals generated by an anderometer available at the WEG Motores company. Initially, the fundamentals of fault analysis in bearings, the main types of defects and their characteristic frequencies are discussed. The anderometer is also studied, as well as its operating principle and available signals for acquisition. Different methods are presented for bearing fault detection, and this work uses the analysis of the root mean square (RMS) level of the signals obtained in three frequency bands. In addition, the envelope technique is used, which has been chosen since it is an appropriate tool for bearing fault diagnosis in the initial stage. The signals generated by the anderometer are acquired through a National Instruments NI-9229 signal acquisition board, and then are processed and analyzed using fault detection and classification techniques. The time and frequency techniques are implemented in LabVIEW, which are validated by analysing two bearings in good condition and six bearings with previously known defects. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed system to detect and diagnose bearing faults.

**Keywords:** 1. Anderometer. 2. Bearing. 3. Instrumentation. 4. Quality Control. 5. Vibration.

# Lista de figuras

Figura 1 – Escamação na pista e em esferas. . . . .	17
Figura 2 – Trinca na pista e <i>pitting</i> em esfera. . . . .	17
Figura 3 – Frequências, dimensões e ângulo de contato do rolamento. . . . .	18
Figura 4 – Velocidades nos elementos do rolamento. . . . .	19
Figura 5 – Pico e valor RMS para um rolamento com defeito. . . . .	22
Figura 6 – (a) Pico e valor RMS (b) Fator de crista. . . . .	23
Figura 7 – Procedimento de análise do envelope utilizando a transformada de Hilbert. . . . .	25
Figura 8 – Estrutura do mecanismo de detecção de vibração do andrômetro. . . . .	27
Figura 9 – Andrômetro BVT-1A. . . . .	28
Figura 10 – Osciloscópio digital portátil Hantek DSO1060. . . . .	32
Figura 11 – Módulo de entrada analógica de tensão NI-9229. . . . .	33
Figura 12 – Chassi cDAQ-9174. . . . .	34
Figura 13 – Circuito de entrada da placa de aquisição. . . . .	35
Figura 14 – Banda de passagem e variação do ganho ao longo da banda. . . . .	36
Figura 15 – VI <i>DAQmx Create Virtual Channel(AI Voltage)</i> . . . . .	37
Figura 16 – VI <i>DAQmx Timing(Sample Clock)</i> . . . . .	37
Figura 17 – VI <i>DAQmx Start Task</i> . . . . .	37
Figura 18 – VI <i>DAQmx Read(Analog Wfm 1Chan NSamp)</i> . . . . .	38
Figura 19 – VIs <i>DAQmx Stop Task</i> e <i>DAQmx Clear Task</i> . . . . .	38
Figura 20 – VI <i>DAQmx Configure Logging</i> . . . . .	39
Figura 21 – VI <i>SVL Scale Voltage to EU</i> . . . . .	39
Figura 22 – VI <i>DFD Filtering(Waveform)</i> . . . . .	39
Figura 23 – VI <i>SVL Running RMS Level(Time Waveform)</i> . . . . .	40
Figura 24 – VI <i>OAT Envelope Detection(Waveform Output)</i> . . . . .	40
Figura 25 – VI <i>SVFA Power Spectrum</i> . . . . .	41
Figura 26 – VI <i>SVFA Spectrum Peak Search</i> . . . . .	41
Figura 27 – Esquema de montagem do sistema de medição. . . . .	43
Figura 28 – Sinais de calibração no domínio do tempo escalonados. . . . .	44
Figura 29 – Representação do sinal analisado nos domínios do tempo e da frequência para a amostra 1. . . . .	46
Figura 30 – Resultado da análise de vibração nas bandas baixa, média e alta, técnica do envelope e picos no espectro do envelope para a amostra 1. . . . .	46
Figura 31 – Representação do sinal analisado nos domínios do tempo e da frequência para a amostra 2. . . . .	47

Figura 32 – Resultado da análise de vibração nas bandas baixa, média e alta, técnica do envelope e picos no espectro do envelope para a amostra 2. . .	47
Figura 33 – Representação do sinal analisado nos domínios do tempo e da frequência para a amostra 3. . . . .	48
Figura 34 – Resultado da análise de vibração nas bandas baixa, média e alta, técnica do envelope e picos no espectro do envelope para a amostra 3. . .	49
Figura 35 – Representação do sinal analisado nos domínios do tempo e da frequência para a amostra 4. . . . .	50
Figura 36 – Resultado da análise de vibração nas bandas baixa, média e alta, técnica do envelope e picos no espectro do envelope para a amostra 4. . .	50
Figura 37 – Representação do sinal analisado nos domínios do tempo e da frequência para a amostra 5. . . . .	51
Figura 38 – Resultado da análise de vibração nas bandas baixa, média e alta, técnica do envelope e picos no espectro do envelope para a amostra 5. . .	52
Figura 39 – Representação do sinal analisado nos domínios do tempo e da frequência para a amostra 6. . . . .	53
Figura 40 – Resultado da análise de vibração nas bandas baixa, média e alta, técnica do envelope e picos no espectro do envelope para a amostra 6. . .	53
Figura 41 – Representação do sinal analisado nos domínios do tempo e da frequência para a amostra 7. . . . .	54
Figura 42 – Resultado da análise de vibração nas bandas baixa, média e alta, técnica do envelope e picos no espectro do envelope para a amostra 7. . .	54
Figura 43 – Representação do sinal analisado nos domínios do tempo e da frequência para a amostra 8. . . . .	55
Figura 44 – Resultado da análise de vibração nas bandas baixa, média e alta, técnica do envelope e picos no espectro do envelope para a amostra 8. . .	56

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Frequências características de defeito nos elementos dos rolamentos estudados. . . . .	21
Tabela 2 – Divisão das bandas de frequência no andrômetro . . . . .	26
Tabela 3 – Principais especificações do andrômetro BVT-1A. . . . .	28
Tabela 4 – Especificações de níveis de vibração da norma JB/T 10187-2011 para os grupos V2 e V3. . . . .	30
Tabela 5 – Identificação dos conectores do andrômetro BVT-1A. . . . .	31
Tabela 6 – Valores máximos pico a pico. . . . .	33
Tabela 7 – Principais especificações do módulo NI-9229. . . . .	34
Tabela 8 – Parâmetros dos filtros e ordem mínima calculada. . . . .	40
Tabela 9 – Frequências de calibração especificadas e verificadas. . . . .	43
Tabela 10 – Rolamentos testados e seus defeitos conhecidos. . . . .	44
Tabela 11 – Frequências características dos defeitos para os rolamentos testados. . .	45

# Lista de Siglas e Abreviaturas

AC	<i>Alternating Current</i>
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DFD	<i>Digital Filter Design</i>
EU	<i>Engineering Units</i>
E/S	<i>Entrada/Saída</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
NI	<i>National Instruments</i>
OAT	<i>Order Analysis Toolkit</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RPC	<i>República Popular da China</i>
SVFA	<i>Sound and Vibration Frequency Analysis</i>
SVL	<i>Sound and Vibration Library</i>
UFSC	<i>Universidade Federal de Santa Catarina</i>
VI	<i>Virtual Instrument</i>

# Sumário

1	INTRODUÇÃO . . . . .	14
1.1	Objetivos . . . . .	15
1.1.1	Objetivo geral . . . . .	15
1.1.2	Objetivos específicos . . . . .	15
1.2	Justificativa . . . . .	15
1.3	Organização . . . . .	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .	17
2.1	Fundamentos da análise de falhas em rolamentos . . . . .	17
2.1.1	Tipos de defeito . . . . .	17
2.1.2	Frequências características . . . . .	18
2.1.2.1	Frequência característica da gaiola . . . . .	19
2.1.2.2	Frequência característica de defeito na pista interna . . . . .	20
2.1.2.3	Frequência característica de defeito na pista externa . . . . .	20
2.1.2.4	Frequência característica de defeito nas esferas . . . . .	20
2.2	Métodos de detecção de falhas em rolamentos . . . . .	21
2.2.1	Análise no domínio do tempo . . . . .	21
2.2.1.1	Valor eficaz (RMS) . . . . .	21
2.2.1.2	Valor de pico ( <i>Peak</i> ) . . . . .	22
2.2.1.3	Fator de crista ( <i>Crest Factor</i> ) . . . . .	22
2.2.1.4	Assimetria ( <i>Skewness</i> ) . . . . .	23
2.2.1.5	Curtose ( <i>Kurtosis</i> ) . . . . .	23
2.2.2	Análise no domínio da frequência . . . . .	24
2.2.2.1	Método da energia residual . . . . .	24
2.2.2.2	Técnica do envelope . . . . .	24
2.3	O anderômetro . . . . .	25
2.3.1	Unidade de medida Anderon . . . . .	26
2.3.2	Princípio de funcionamento . . . . .	26
2.4	Descrição do processo de controle de qualidade . . . . .	27
3	PROPOSTA . . . . .	31
3.1	Identificação dos sinais disponíveis . . . . .	31
3.1.1	Dispositivo de aquisição . . . . .	32
3.1.1.1	Circuito de entrada . . . . .	34
3.1.1.2	Filtragem . . . . .	35

3.1.1.2.1	Banda de passagem . . . . .	35
3.1.1.2.2	Banda de rejeição . . . . .	35
3.2	Programa . . . . .	36
3.2.1	Aquisição . . . . .	36
3.2.2	Registro de dados . . . . .	38
3.2.3	Processamento . . . . .	38
3.2.4	Interface . . . . .	41
4	RESULTADOS . . . . .	42
4.1	Metodologia de testes . . . . .	42
4.1.1	Calibração . . . . .	42
4.1.2	Rolamentos e seus defeitos conhecidos . . . . .	43
4.2	Análise dos dados . . . . .	45
4.2.1	Rolamentos sem defeito . . . . .	45
4.2.1.1	Amostra 1 . . . . .	45
4.2.1.2	Amostra 2 . . . . .	47
4.2.2	Rolamentos com defeito na pista . . . . .	48
4.2.2.1	Amostra 3 . . . . .	48
4.2.2.2	Amostra 4 . . . . .	49
4.2.3	Rolamentos com defeito na esfera . . . . .	51
4.2.3.1	Amostra 5 . . . . .	51
4.2.3.2	Amostra 6 . . . . .	52
4.2.4	Rolamentos com defeito de polimento . . . . .	53
4.2.4.1	Amostra 7 . . . . .	53
4.2.4.2	Amostra 8 . . . . .	55
5	CONCLUSÕES . . . . .	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .	58
A	DIAGRAMA DE BLOCOS EM LABVIEW PARA AQUISIÇÃO DOS SINAIS . . . . .	60
B	RESPOSTA EM FREQUÊNCIA E LOCALIZAÇÃO DOS POLOS E ZEROS DOS FILTROS PROJETADOS . . . . .	61
C	INTERFACE DO PROGRAMA DESENVOLVIDO EM LABVIEW . . . . .	62

# 1 Introdução

Rolamentos são um dos principais elementos das máquinas rotativas, as quais têm papel fundamental na indústria. Os primeiros rolamentos permitiram às pessoas, com a ajuda da roda, moverem-se, transportar mercadorias de uma aldeia para outra, produzir sua comida cotidiana, entre outros. Hoje, a tecnologia de rolamentos evoluiu para um estágio em que os rolamentos são um dos componentes mecânicos mais avançados devido ao design otimizado [1, 2], materiais de alta qualidade e fabricação extremamente precisa. Existem no rolamento dois requisitos que precisam ser cumpridos para garantir o funcionamento satisfatório do maquinário e do equipamento. O primeiro é empregar o rolamento correto no lugar mais adequado e o outro é garantir uma operação confiável, sem falhas que atrapalhem a operação. A importância desse último aspecto aumentou consideravelmente nos últimos anos, especialmente na indústria de processos de transporte e produção de energia, sendo que a falha de apenas um pequeno componente pode implicar em riscos graves de segurança [3], ocasionando desastres humanos e ambientais.

O funcionamento adequado de uma máquina depende do desempenho de seus vários elementos, como engrenagens, rolamentos, acoplamentos, eixos, entre outros. Os rolamentos geralmente são componentes críticos de máquinas que exigem a aplicação de técnicas de monitoramento [4, 5] para detectar a condição dos rolamentos, antes que uma falha ocorra. O monitoramento de condições analisa os sinais gerados durante o funcionamento da máquina e indica quando a deterioração irá exceder o limite para que o trabalho de manutenção possa ser planejado de acordo. O valor limite é definido a partir de experiências passadas na mesma máquina ou de normas existentes. Ou ainda, pode ser utilizada uma máquina similar, que se saiba estar em boas condições, para comparação das características de operação.

A filosofia de manutenção preditiva com uso de informações de vibração [6] para reduzir os custos operacionais e aumentar a disponibilidade de maquinário está ganhando aceitação em toda a indústria. Como a maioria das máquinas em um programa de manutenção preditiva contém rolamentos, é imperativo entender como monitorar e diagnosticar problemas associados a tais dispositivos. O monitoramento de vibração é a técnica mais popular para diagnósticos de rolamentos, pois a vibração está sempre presente, nos mais variados níveis, na máquina em funcionamento. Os níveis de vibração geralmente aumentam com a deterioração das máquinas e seus elementos, sendo portanto a vibração um parâmetro importante no monitoramento. Existem diversas técnicas baseadas na análise de vibração, que podem utilizar sensores de deslocamento, velocidade e aceleração. Nesse contexto, os sensores de velocidade e de aceleração são os mais usados, uma vez que os sinais provenientes de tais sensores contêm componentes de altas frequências correlacio-

nados com os defeitos tipicamente encontrados em rolamentos.

Existem hoje equipamentos específicos para a análise e detecção de falhas em rolamentos, entre eles o *anderômetro*, que é amplamente utilizado por fabricantes de rolamentos para controle da qualidade em suas linhas de produção. Assim, será realizado neste trabalho de conclusão de curso um estudo sobre o princípio de funcionamento do *anderômetro* e sobre a análise de falhas em rolamentos utilizando métodos no domínio do tempo e no domínio da frequência. Também será realizada a aquisição e processamento dos sinais disponíveis no *anderômetro* visando automatizar o processo de detecção de falhas em rolamentos na empresa WEG Motores.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo do trabalho é realizar a aquisição dos sinais do *anderômetro* e aplicar técnicas para identificação e classificação de defeitos em rolamentos, vislumbrando o aprimoramento do processo de inspeção de qualidade realizado na empresa WEG Motores e o desenvolvimento futuro de um sistema para a automatização dos ensaios de inspeção de qualidade em rolamentos.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são apresentados a seguir:

- Estudar os principais mecanismos de falhas em rolamentos e seus sinais característicos;
- Realizar a aquisição dos sinais gerados pelo *anderômetro*;
- Aplicar técnicas de processamento de sinais para identificação e classificação de falhas em rolamentos.

## 1.2 Justificativa

A avaliação e o monitoramento das condições de rolamentos, utilizadas no controle de qualidade e detecção antecipada de falhas, são de grande interesse da indústria, pois potencializam redução de custos e manutenção, maior produtividade e maior disponibilidade da planta. Uma das abordagens mais utilizadas para investigar possíveis falhas nesses componentes é o monitoramento baseado na análise do sinal de vibração.

Para a WEG Motores essa verificação é essencial, pois afeta diretamente na qualidade das máquinas comercializadas. Como os rolamentos são adquiridos de fornecedores externos, foi adotado como procedimento padrão a inspeção por amostragem de todos os lotes recebidos. A inspeção tem como objetivo prevenir que rolamentos fora das especificações exigidas sejam utilizados nas montadoras de motores elétricos do grupo, reduzindo prejuízos financeiros provenientes de reparos realizados no período de garantia do produto. Para isso, são seguidos padrões internacionais quanto aos procedimentos e níveis de tolerância de vibração.

### 1.3 Organização

O presente trabalho é dividido em 5 capítulos, organizado conforme descrito a seguir. Neste primeiro capítulo foi contextualizada a necessidade da inspeção de qualidade em rolamentos, bem como os objetivos desse trabalho e a justificativa do estudo. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura sobre os fundamentos da análise de falhas em rolamentos, principais tipos de defeitos e métodos de detecção de falhas no domínio do tempo e no domínio da frequência. Também é estudado nesse capítulo o princípio de funcionamento do *anderômetro* e os principais aspectos do processo de controle de qualidade utilizado na WEG. No Capítulo 3 são apresentados os materiais e método proposto para esse trabalho, detalhando o dispositivo de aquisição de sinais, bem como o desenvolvimento do *software* para processamento do sinal adquirido. Os resultados das análises são apresentados no Capítulo 4 por meio de gráficos dos sinais e comparação dos dados obtidos nos ensaios com os valores observados no *anderômetro*. Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões do trabalho realizado e propostas para trabalhos futuros.

## 2 Fundamentação Teórica

### 2.1 Fundamentos da análise de falhas em rolamentos

#### 2.1.1 Tipos de defeito

Os defeitos de rolamento podem ser classificados como locais ou distribuídos, e ocorrem tanto nos elementos rolantes quanto nas pistas. Os defeitos locais incluem fragmentação, trincas e escamação nas superfícies do rolamento, na Figura 1 são apresentadas pista e esferas com defeito de escamação. *Pitting* ou rachaduras devido à colisões também estão entre os diferentes tipos de dano de rolamento descritos em [7], na Figura 2 são ilustrados defeitos de trinca e *pitting*. O defeito mais comum em rolamentos é a fragmentação das pistas ou dos elementos rolantes, causada quando uma rachadura por fadiga começa abaixo da superfície do metal e se propaga em direção à superfície até que o metal se rompa para deixar uma pequena fossa. Em [8], foi relatado que a falha por fadiga pode ser acelerada pela sobrecarga ou colisões do rolamento durante a operação e instalação.



Figura 1 – Escamação na pista e em esferas [9].



Figura 2 – Trinca na pista e *pitting* em esfera [9].

Os defeitos distribuídos, por outro lado, incluem a rugosidade superficial, ondulação, pistas desalinhadas e elementos rolantes mal dimensionados [10, 11]. Essas características são indicadores da qualidade do rolamento, ou seja, quanto maior a incidência de defeitos distribuídos, maior será o nível de vibração geral da máquina. Em [8, 12] foi relatado

que os defeitos distribuídos são causados por falhas no processo de fabricação, instalação inadequada ou desgaste abrasivo.

### 2.1.2 Freqüências características

As freqüências características dos elementos do rolamento podem ser calculadas a partir das dimensões do rolamento e parâmetros do ensaio. Quando uma superfície com defeito em um elemento do rolamento entra em contato com outra superfície do rolamento, este choque produz um impulso que excita ressonâncias no rolamento e na máquina. Esses impulsos irão ocorrer periodicamente com uma freqüência que é determinada, unicamente, pela localização do defeito, sendo ele na pista interna, na pista externa ou no elemento girante [13].

As freqüências dos componentes do rolamento rígido de uma carreira de esferas, que foi o tipo de rolamento utilizado no desenvolvimento desse trabalho, são obtidas com base nas dimensões apresentadas na Figura 3.

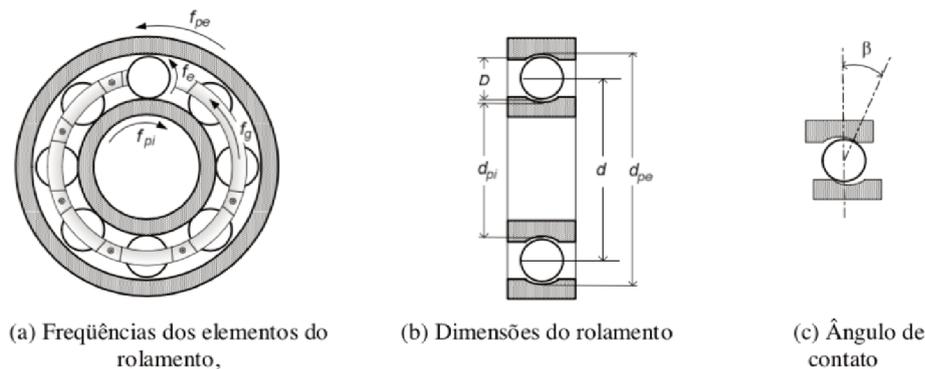


Figura 3 – Freqüências, dimensões e ângulo de contato do rolamento [14].

As variáveis apresentadas na Figura 3 são definidas a seguir:

$f_g$  - freqüência característica da gaiola;

$f_{pi}$  - freqüência característica da pista interna;

$f_{pe}$  - freqüência característica da pista externa;

$f_e$  - freqüência característica das esferas;

$D$  - diâmetro da esfera;

$d$  - diâmetro primitivo;

$d_{pi}$  - diâmetro da pista interna;

$d_{pe}$  - diâmetro da pista externa;

$\beta$  - ângulo de contato;

$r_g$  - raio da gaiola ( $r_g = \frac{d}{2}$ );

$r_{pi}$  - raio da pista interna ( $r_{pi} = \frac{d_{pi}}{2}$ );

$r_{pe}$  - raio da pista externa ( $r_{pe} = \frac{d_{pe}}{2}$ ).

A partir das velocidades tangenciais dos elementos pode-se obter algumas relações entre as velocidades de rotação dos elementos do rolamento, conforme ilustrado na Figura 4, com  $V_g$ ,  $V_{pi}$  e  $V_{pe}$  representando, respectivamente, a velocidade da gaiola, a velocidade da pista interna e a velocidade da pista externa.

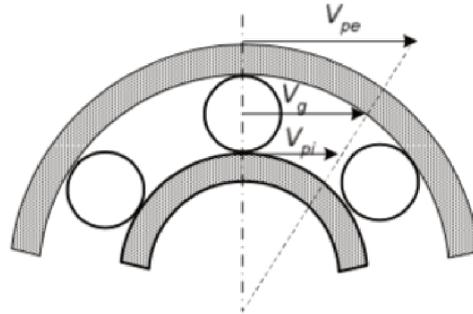


Figura 4 – Velocidades nos elementos do rolamento [14].

### 2.1.2.1 Freqüência característica da gaiola

A freqüência característica da gaiola é utilizada para obter as freqüências características dos defeitos na pista interna e na pista externa, seu cálculo é detalhado a seguir.

Realizando a análise cinemática dos elementos da Figura 4, é obtida a seguinte expressão:

$$V_g = \frac{V_{pi} + V_{pe}}{2}. \quad (2.1)$$

Sabendo que a freqüência da gaiola é dada por

$$f_g = \frac{V_g}{r_g} \quad (2.2)$$

e substituindo (2.1) em (2.2), obtém-se

$$f_g = \frac{V_{pi} + V_{pe}}{d} \quad (2.3)$$

com  $d = 2r_g$ . A partir das velocidades  $V_{pi} = r_{pi}f_{pi}$  e  $V_{pe} = r_{pe}f_{pe}$ , (2.3) é reescrita como segue:

$$f_g = \frac{r_{pi}f_{pi} + r_{pe}f_{pe}}{d}. \quad (2.4)$$

Em seguida, considerando que o ângulo de contato é diferente de zero, tem-se que

$$r_{pi} = \frac{d - D \cos \beta}{2} \quad (2.5)$$

e

$$r_{pe} = \frac{d + D \cos \beta}{2}. \quad (2.6)$$

Finalmente, substituindo (2.5) e (2.6) em (2.4),  $f_g$  é obtido como segue:

$$f_g = \frac{1}{d} \left( \frac{d - D \cos \beta}{2} f_{pi} + \frac{d + D \cos \beta}{2} f_{pe} \right). \quad (2.7)$$

### 2.1.2.2 Frequência característica de defeito na pista interna

De acordo com [14], a frequência característica da pista interna é obtida quando a esfera passa pelo defeito, dessa forma a frequência é resultado do número de esferas ( $N_e$ ) multiplicado pela frequência relativa da gaiola e pista interna, ou seja,

$$f_{dpi} = N_e |f_g - f_{pi}|. \quad (2.8)$$

Em seguida, substituindo (2.7) em (2.8), obtém-se

$$f_{dpi} = N_e \left| \frac{1}{d} \left( \frac{d - D \cos \beta}{2} f_{pi} + \frac{d + D \cos \beta}{2} f_{pe} \right) - f_{pi} \right|. \quad (2.9)$$

Assim, a frequência característica de defeito da pista interna é obtida como segue:

$$f_{dpi} = \frac{N_e}{2d} [|f_{pe} - f_{pi}| (d + D \cos \beta)]. \quad (2.10)$$

### 2.1.2.3 Frequência característica de defeito na pista externa

O mesmo raciocínio foi adotado para obter a frequência característica da pista externa, onde a frequência é dada pela multiplicação da frequência relativa da gaiola e pista externa com o número de esferas, ou seja,

$$f_{dpe} = N_e |f_g - f_{pe}|. \quad (2.11)$$

Então, substituindo (2.7) em (2.11) e fazendo os rearranjos necessários, obtém-se

$$f_{dpe} = \frac{N_e}{2d} [|f_{pi} - f_{pe}| (d - D \cos \beta)]. \quad (2.12)$$

### 2.1.2.4 Frequência característica de defeito nas esferas

As seguintes relações são válidas para a frequência da esfera:

$$f_{de} D = f_{pi} d_{pi} = f_{pe} d_{pe}. \quad (2.13)$$

Rearranjando (2.13) e fazendo as substituições necessárias, é possível obter a frequência de defeito nas esferas como segue:

$$f_{de} = \frac{d}{2D} \left[ (f_{pi} - f_{pe}) \left( 1 - \frac{D^2 \cos^2 \beta}{d} \right) \right]. \quad (2.14)$$

Segundo [14], a frequência de defeito na esfera pode sofrer alterações ou não aparecer em alguns casos, por ter seu caráter não determinístico.

O equipamento utilizado para realizar os ensaios deste trabalho funciona de forma que a pista interna é a girante, enquanto a pista externa permanece parada. Portanto, considerando  $f_{pe} = 0$ , obtém-se as equações indicadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Frequências características de defeito nos elementos dos rolamentos estudados.

Frequência	Equação
Frequência da gaiola	$f_g = \frac{f_{pi}}{2} \left(1 - \frac{D \cos \beta}{d}\right)$
Frequência de defeito na pista interna	$f_{dpi} = \frac{N_e f_{pi}}{2} \left(1 + \frac{D \cos \beta}{d}\right)$
Frequência de defeito na pista externa	$f_{dpe} = \frac{N_e f_{pe}}{2} \left(1 - \frac{D \cos \beta}{d}\right)$
Frequência de defeito nas esferas	$f_{de} = \frac{df_{pe}}{2D} \left(1 - \frac{D^2 \cos^2 \beta}{d^2}\right)$

## 2.2 Métodos de detecção de falhas em rolamentos

Existem diferentes métodos para detectar falhas em rolamentos, podendo ocorrer no domínio do tempo, domínio da frequência ou ainda a combinação de tempo e frequência. Em todos esses métodos são utilizados os sinais de vibração dos componentes quando o rolamento está em funcionamento, sendo que por meio dessa análise é diagnosticado o defeito.

### 2.2.1 Análise no domínio do tempo

O sinal no domínio do tempo pode ser usado para realizar diagnósticos de faltas e falhas analisando os dados de vibração ou acústicos obtidos do equipamento. Métodos estatísticos no domínio do tempo são amplamente utilizados para investigar as características dos rolamentos. Para isso, é importante ser capaz de compilar os dados obtidos e também definir quais são as características significativas para a análise em questão. Os parâmetros estatísticos mais difundidos, como valor eficaz (RMS), valor de pico, fator de crista, assimetria e curtose, são calculados após adquirir uma amostra de dados no domínio do tempo. Com a ocorrência do dano, uma variação nesses valores deve ocorrer. As métricas do domínio do tempo são calculadas com base nas expressões apresentadas na sequência.

#### 2.2.1.1 Valor eficaz (RMS)

O valor eficaz é relacionado à energia do sinal. Em muitos casos, a presença de defeitos é diretamente detectada pelo aumento do nível de vibração da máquina. Isso significa que o valor RMS calculado em uma determinada banda de frequência pode ser usado para detecção de falhas. Os resultados do valor eficaz podem ser comparados com valores normalizados ou mesmo com valores previamente coletados. O valor eficaz da parcela AC

do sinal é calculado a partir da seguinte equação:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(i) - \bar{x}]^2} \quad (2.15)$$

onde  $N$  é o número de ponto do sinal,  $x(i)$  é o sinal da vibração medido e  $\bar{x}$  é o valor médio do sinal.

Embora o valor eficaz indique a presença de defeito quando calculado em bandas de frequência determinadas, o valor resultante não indica se o defeito está na pista interna, externa ou nos elementos rolantes.

### 2.2.1.2 Valor de pico (*Peak*)

O valor de pico no domínio do tempo apresenta o máximo do valor da amplitude do sinal, podendo ser obtido facilmente por meio da observação do sinal adquirido.

Essa medida é importante, pois nos estágios iniciais de um dano em um rolamento quando os sinais de impacto começam a surgir, o valor RMS calculado não sofre alteração significativa, uma vez que a energia total do sinal permanece praticamente inalterada, enquanto o valor de pico aumenta por se tratar de um valor pontual.

### 2.2.1.3 Fator de crista (*Crest Factor*)

O fator de crista é calculado a partir da divisão entre o valor de pico e o valor RMS, ou seja,

$$FC = \frac{\text{Valor de pico}}{\text{RMS}}. \quad (2.16)$$

Esse valor indica variações pontuais na amplitude de vibração e é relativamente insensível a mudanças na velocidade de rotação e carregamento [15]. A Figura 5 representa um sinal de um rolamento com defeito. Pode-se observar a partir dessa figura que, com o surgimento de uma pequena falha, o valor de pico cresce mais que o valor RMS, resultando assim em um maior valor do fator de crista.

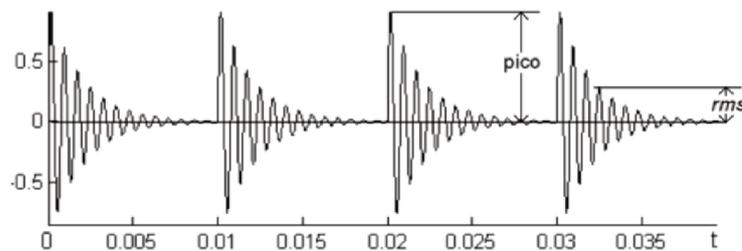


Figura 5 – Pico e valor RMS para um rolamento com defeito [14].

Entretanto, segundo [14], ao surgir um defeito severo no rolamento, o valor RMS também cresce. Assim, é possível concluir que o fator de crista não é um bom indicador de falhas em um estágio de defeito severo, como pode ser observado na Figura 6.

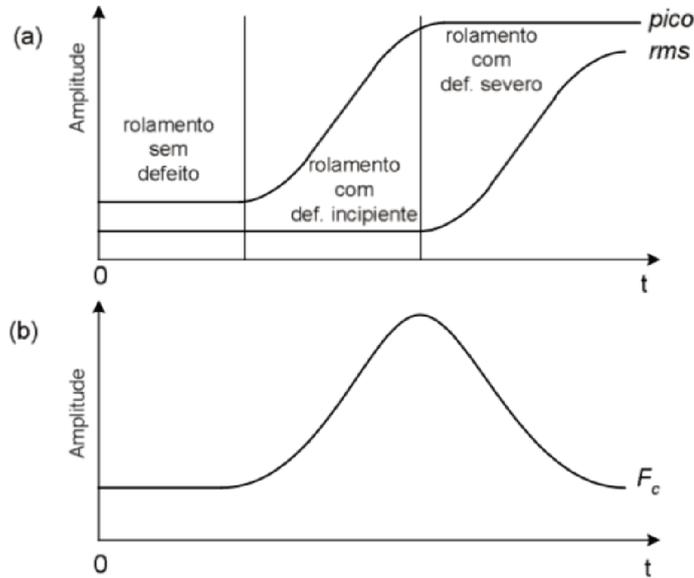


Figura 6 – (a) Pico e valor RMS (b) Fator de crista [14].

#### 2.2.1.4 Assimetria (*Skewness*)

A assimetria é definida como o momento estatístico da terceira ordem, normalizado pelo desvio padrão elevado à terceira potência. A estimativa da assimetria é obtida a partir da seguinte expressão:

$$s = \frac{1}{N\sigma^3} \sum_{i=1}^N [x(i) - \bar{x}]^3. \quad (2.17)$$

Essa equação utiliza o desvio padrão ( $\sigma$ ), que pode ser estimado utilizando amostras de  $x(i)$ , e indica a assimetria da curva da função de distribuição de probabilidade. O valor calculado significa o grau de desvio da simetria de uma distribuição, se for negativo, a curva será deslocada para a esquerda e, se esse valor for positivo, a curva será deslocada para a direita. Se for nulo, a curva é perfeitamente simétrica.

#### 2.2.1.5 Curtose (*Kurtosis*)

A curtose é definida como o quarto momento estatístico normalizado pelo desvio padrão elevado à quarta potência. A estimativa da curtose de  $x(i)$  é dada por

$$K = \frac{1}{N\sigma^4} \sum_{i=1}^N [x(i) - \bar{x}]^4. \quad (2.18)$$

A curtose representa uma medida do achatamento da curva da função de distribuição de probabilidade, perto do valor médio. Podendo ser calculada para toda a faixa de frequência ou para faixas de frequência definidas pelo usuário. Como parâmetro para diagnosticar falhas no rolamento, os valores de curtose aumentam com o crescimento do defeito. Isso acontece porque os pulsos gerados aumentam quando há passagem dos elementos rolantes sobre o defeito.

## 2.2.2 Análise no domínio da frequência

Quando se deseja investigar em qual parte do rolamento está localizado o defeito, é necessário utilizar métodos de análise no domínio da frequência. Isso é possível, pois nesses métodos é detectada a frequência dos eventos de impacto, possibilitando a identificação da falha. Tal informação não é obtida a partir de métodos no domínio do tempo, o qual permite avaliar o nível de defeito, mas não a parte do rolamento em que ocorre [14].

### 2.2.2.1 Método da energia residual

Para aplicar método da energia residual é necessário obter os sinais de dois rolamentos, um rolamento sem defeito, e outro com defeito. Com os dois sinais adquiridos, é calculada a densidade espectral de potência de ambos os sinais e, em seguida, obtido o valor da energia residual a partir do módulo da diferença das duas densidades [14].

### 2.2.2.2 Técnica do envelope

A técnica do envelope (demodulação de amplitude) é considerada poderosa e confiável para a detecção de falhas em rolamentos e está ganhando popularidade para detecção de falhas locais, como fragmentação e rachaduras nos rolamentos [16]. Essa técnica extrai as frequências características do sinal de vibração e com ela é possível identificar não apenas a ocorrência de falhas, mas também as possíveis fontes.

De acordo com [17], a utilização dessa técnica segue os seguintes passos:

- Mudança de domínio do tempo para o domínio da frequência por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT).
- Filtragem com um filtro passa-banda em torno de uma frequência de falha ou de frequências observadas no gráfico da FFT.
- Demodulação para eliminar os componentes de alta energia, permitindo uma detecção mais precisa dos defeitos do rolamento. Essa demodulação pode ocorrer em duas abordagens: a) construção de um sinal analítico complexo, no domínio do tempo, por meio da Transformada de Hilbert, no qual a parte imaginária é a Transformada

de Hilbert da parte real; b) retificação do sinal por meio de um filtro passa-baixas, eliminando a frequência portadora.

- Cálculo do espectro do sinal do envelope, obtendo em módulo a envoltória das amplitudes do gráfico obtido com a demodulação.
- Utilização da FFT, modificando do domínio de tempo para o domínio de frequência, possibilitando a extração das frequências características de falha do rolamento.

A metodologia utilizada na análise de envelope utilizando a Transformada de Hilbert é demonstrada na Figura 7.

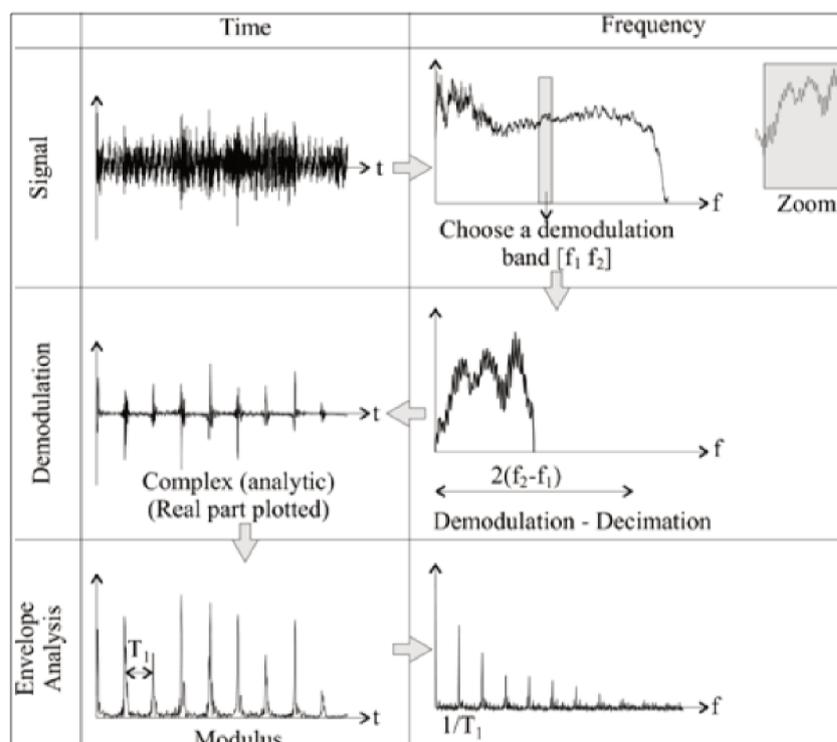


Figura 7 – Procedimento de análise do envelope utilizando a transformada de Hilbert [18].

A detecção de falhas em rolamentos ocorre observando o espectro do envelope. A presença de novos picos no espectro de frequências que não são múltiplos exatos da rotação do eixo é a primeira indicação que existe um problema no rolamento, pois os verdadeiros defeitos emitem frequências que, na grande maioria das vezes, são assíncronas com a velocidade. Quanto mais acentuado o defeito, maior a energia sobre a região da frequência característica é notada, sendo possível a identificação do tipo de defeito [19].

## 2.3 O anderômetro

O anderômetro é um sistema de inspeção projetado exclusivamente para avaliar a qualidade geral de rolamentos, que mede a vibração de um rolamento na unidade cha-

mada Anderon. Tal dispositivo usa um mecanismo que gira a pista interna do rolamento enquanto a pista externa fica parada e em contato com um sensor de velocidade para detectar a vibração Anderon gerada na direção radial. Seus mostradores exibem a vibração de Anderon dividida em bandas baixa (*Low*), média (*Medium*) e alta (*High*) em unidades de Anderons ou  $\mu\text{m/s}$ . O Anderon é diretamente proporcional à velocidade de vibração, sendo 1 Anderon equivalente a aproximadamente  $7,698 \mu\text{m/s}$ .

### 2.3.1 Unidade de medida Anderon

A unidade de medida Anderon foi estabelecida nos Estados Unidos na década de 1940, o termo nasceu a partir de uma palavra inglesa referente ao ângulo diferencial de um deslocamento radial e é usada para expressar a quantidade de vibração. Essa unidade é obtida por meio de

$$V = \frac{\left(\frac{dx}{d\theta}\right)_{r.m.s}}{\sqrt{\log_2 \frac{f_H}{f_L}}} \quad (2.19)$$

onde  $V$  : é o valor de vibração Anderon,  $x$  : representa o deslocamento radial da pista externa em  $\mu\text{in}$ ,  $\theta$  é o ângulo de rotação da pista interna em radianos e  $\log_2 \frac{f_H}{f_L}$  denota o número de oitavas presentes na banda passante, sendo que  $f_H$  e  $f_L$  representam, respectivamente, as frequências superior e inferior da banda de frequências sob análise.

Quando a velocidade de rotação do rolamento é 1800 RPM, a faixa de 50 Hz a 10 kHz é dividida nas bandas Baixa, Média e Alta conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Divisão das bandas de frequência no anderômetro

Banda	Faixa de frequência
Baixa	50-300 Hz
Média	300-1800 Hz
Alta	1800-10000 Hz

### 2.3.2 Princípio de funcionamento

O anderômetro é composto por um eixo que rotaciona a pista interna do rolamento, um mecanismo que prende a pista externa para impedir sua rotação e aplica pressão ao longo da direção axial, um sensor de contato de velocidade que mede a vibração e mostradores dos níveis de vibração. Na Figura 8 é ilustrada a estrutura do mecanismo de detecção de vibração do anderômetro.

Esse equipamento pode ser utilizado para detectar a presença de arranhões, poeira, esferas de diâmetros diferentes, falta de esferas no rolamento, entre outros. O medidor também permite identificar problemas em componentes, comparando o componente de

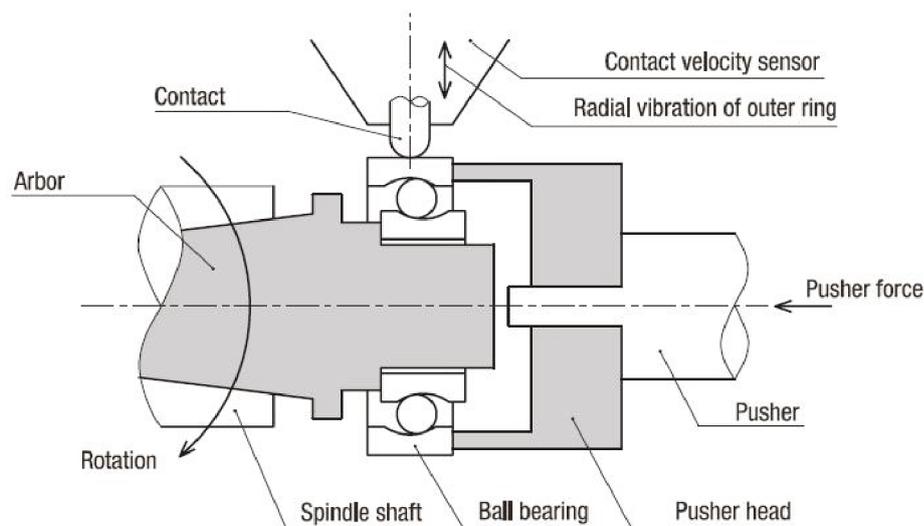


Figura 8 – Estrutura do mecanismo de detecção de vibração do andrômetro [20].

vibração determinado pelas especificações do rolamento com o espectro de uma forma de onda medida.

O valor de vibração medido pelo andrômetro fornece informações gerais sobre a qualidade das principais partes do rolamento, incluindo a forma e a suavidade da superfície da pista interna, da pista externa e dos elementos rolantes.

Também é possível conectar um alto-falante ou um osciloscópio ao andrômetro para auxiliar na identificação de arranhões, poeira em graxa e outros defeitos em várias partes por meio do monitoramento dos sons ou observando as formas de onda obtidas com o osciloscópio.

## 2.4 Descrição do processo de controle de qualidade

O processo de controle de qualidade de rolamentos utilizado pela WEG Motores consiste na realização de ensaios de inspeção por amostragem nos lotes entregues pelos fornecedores. A definição dos lotes e quantidade de peças para inspeção é definida seguindo critérios definidos pela empresa, tendo como base o fornecedor e seu histórico de inspeções, modelo do rolamento, sua aplicação final e tamanho do lote.

Essa inspeção é feita por meio de um dos andrômetros que a WEG possui, dependendo do diâmetro interno do rolamento que será testado e da carga, axial ou radial, a ser aplicada. Para a realização deste trabalho foi utilizado o andrômetro de origem chinesa da marca Hangzhou Bearing Test & Research Center, modelo BVT-1A, apresentado na Figura 9.

O andrômetro BVT-1A tem como características a utilização de um sensor de velocidade com frequência de ressonância superior a 12 kHz, mostradores analógicos das três bandas de frequência, circuito de calibração dos amplificadores integrado e dispositivo



Figura 9 – Anderômetro BVT-1A [21].

pneumático para aplicação de carga. As especificações do equipamento são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Principais especificações do anderômetro BVT-1A.

Diâmetro da pista interna		5-60 mm
Diâmetro da pista externa		$\leq 170$ mm
Faixa de vibração medida		0-10000 $\mu\text{m/s}$
Faixas de frequência	Baixa	50-300 Hz
	Média	300-1800 Hz
	Alta	1800-10000 Hz
Carga axial		0-250 N

Para a classificação do estado dos rolamentos são utilizados três parâmetros. O primeiro é a comparação do valor de vibração medido nas bandas de frequências baixa, média e alta do anderômetro com a norma JB/T 10187-2011. Tal norma é um padrão chinês de valores máximos de vibração para rolamentos rígidos de esferas publicado pelo Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação da RPC e amplamente difundido entre fabrican-

tes de rolamentos. A norma JB/T 10187-2011 utiliza como base a ISO 15242-1:2004, que especifica os métodos de medição da vibração para rolamentos rotativos para condições estabelecidas de ensaio, juntamente com a calibração dos sistemas de medição correlatos. Vale ressaltar também que a empresa fabricante do anderômetro utilizado foi uma das organizações que auxiliaram na pesquisa e elaboração da norma JB/T 10187-2011. O segundo parâmetro é obtido a partir do sinal acústico emitido pelo alto-falante conectado à saída de áudio do anderômetro. Já o terceiro é baseado nos valores de pico do sinal medido pelo anderômetro. O processo de obtenção do terceiro parâmetro não será detalhado neste trabalho por ser de propriedade intelectual da empresa WEG.

Na Tabela 4 são apresentados os valores máximos de vibração admitidos para cada faixa de frequências, de acordo com o diâmetro interno do rolamento. A norma JB/T 10187-2011 prevê cinco grupos de tolerância, sendo V o menos rígido e V4 o mais rígido. Na Tabela 4 são apresentados os valores para os grupos V2 e V3, sendo que neste trabalho foi escolhido o grupo intermediário V2 como padrão.

O ensaio no anderômetro é conduzido por um inspetor que observa os mostradores de vibração das bandas baixa, média e alta, e transcreve os valores para o relatório de inspeção. A mesma pessoa também é responsável por analisar os valores de pico e o sinal acústico amplificados pelo anderômetro, sendo essa análise muito subjetiva, podendo existir divergências dependendo de quem irá realizar o teste. Geralmente esse ensaio é feito ou supervisionado por um colaborador com muitos anos de experiência, e que já possui a audição treinada para identificação dos defeitos.

Tabela 4 – Especificações de níveis de vibração da norma JB/T 10187-2011 para os grupos V2 e V3.

Diâmetro interno (mm)	V2			V3		
	Baixa ( $\mu\text{m/s}$ )	Média ( $\mu\text{m/s}$ )	Alta ( $\mu\text{m/s}$ )	Baixa ( $\mu\text{m/s}$ )	Média ( $\mu\text{m/s}$ )	Alta ( $\mu\text{m/s}$ )
3	48	26	22	31	16	15
4	48	26	22	31	16	15
5	58	36	30	35	21	18
6	58	36	30	35	21	18
7	72	48	40	44	28	24
8	72	48	40	44	28	24
9	72	48	40	44	28	24
10	90	60	50	55	35	30
12	90	60	50	55	35	30
15	110	78	60	65	46	35
17	110	78	60	65	46	35
20	130	100	75	80	60	45
25	130	100	75	80	60	45
30	150	120	100	90	75	60
35	150	120	100	90	75	60
40	180	150	130	110	90	80
45	180	150	130	110	90	80
50	210	160	160	125	100	100
55	210	180	180	125	110	110
60	240	180	200	145	110	130
65	130	100	150	105	80	105
70	150	120	200	110	90	135
75	150	120	200	110	90	135
80	180	120	240	130	110	160
85	180	150	240	130	110	160
90	210	180	270	145	125	180
95	210	180	270	145	125	180
100	250	215	310	170	145	200
110	290	260	350	190	175	225
120	290	260	350	190	175	225

## 3 Proposta

Para o aprimoramento do processo de classificação de rolamentos, foi desenvolvido um sistema de medição que adquire os sinais do anderômetro por meio de uma placa de aquisição, efetua o processamento do sinal e disponibiliza os valores de vibração em diferentes bandas de frequência para o operador. Com a aquisição automatizada desses valores e futura implementação do preenchimento do relatório de inspeção de forma automática, será possível reduzir o tempo de ensaio, aumentando assim a frequência de medição do processo.

### 3.1 Identificação dos sinais disponíveis

Inicialmente foi necessário realizar um estudo sobre os sinais disponíveis no anderômetro BVT-1A. Verificou-se que esse equipamento possui cinco saídas analógicas, que estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Identificação dos conectores do anderômetro BVT-1A.

Identificação do conector	Descrição
<i>Full</i>	Saída pré-amplificada do transdutor de velocidade
<i>Low</i>	Saídas pré-amplificadas filtradas nas bandas baixa, média e alta
<i>Medium</i>	
<i>High</i>	
<i>Speaker</i>	Saída pré-amplificada para o alto-falante

Foi então utilizado um osciloscópio digital portátil modelo Hantek DSO1060, apresentado na Figura 10, para visualizar e salvar as formas de onda das saídas analógicas do anderômetro. Esse processo permitiu uma análise preliminar dos sinais por meio da identificação dos componentes de frequência envolvidos e valores pico a pico.

Observou-se que as saídas *low*, *medium* e *high*, apesar de já filtradas nas faixas de frequência desejadas, não poderiam ser utilizadas no sistema de medição proposto, pois têm seus sinais atenuados ou amplificados de acordo com os seletores disponíveis na parte frontal do equipamento. Esses seletores tem a função de escalonar os valores de vibração para que não se atinja o fundo de escala dos mostradores analógicos e necessitam ser



Figura 10 – Osciloscópio digital portátil Hantek DSO1060 [22].

ajustados frequentemente pelo operador, tornando complexo o desenvolvimento de um sistema de compensação com base na posição dos seletores. Assim, optou-se pela aquisição do sinal disponível na saída *full* e sua filtragem por meio de *software*.

O andrômetro estudado possui um circuito interno específico para calibração dos circuitos de amplificação e mostradores analógicos. Para isso, sinais senoidais de vibração são gerados nas frequências de 122 Hz, 737 Hz e 4243 Hz com um valor RMS constante de 1000  $\mu\text{m/s}$ . Nos testes realizados, foi identificado que esses sinais, além de serem utilizados para calibração do equipamento, também estão disponíveis para aquisição na saída *full* do andrômetro. Dessa forma, é possível identificar a sensibilidade do transdutor de velocidade em cada faixa de frequência.

### 3.1.1 Dispositivo de aquisição

O equipamento para aquisição dos dados foi escolhido com base no estudo dos sinais disponíveis e seus valores máximos de amplitude e frequência.

De acordo com as especificações do andrômetro apresentadas na Tabela 3, sabe-se que a frequência máxima utilizada na análise de vibração é 10 kHz. Já para a identificação da máxima amplitude do sinal, foram realizados ensaios com rolamentos de diferentes marcas e modelos, com e sem defeitos. Os valores medidos são apresentados na Tabela 6.

Como os valores pico a pico amostrados chegam próximos a 10 V, por segurança foi escolhida a placa de aquisição NI-9229, apresentada na Figura 11, com capacidade de leitura de sinais até  $\pm 60$  V. Na Tabela 7 são apresentadas as principais especificações do dispositivo.

Para realizar a comunicação com o módulo NI-9229, é necessário a utilização de um

Tabela 6 – Valores máximos pico a pico.

Amostra	Marca	Modelo	Defeito conhecido	Valor máximo pico a pico (V)
1	NSK	6207	Sem defeito	1,10
2	NSK	6209	Marca na pista	4,36
3	NSK	6311	Marca na esfera	9,15
4	SKF	608	Marca na pista	3,41
5	SKF	6203	Sem defeito	1,32
6	SKF	6205	Polimento	3,79
7	C&U	6201	Marca na esfera	6,28
8	C&U	6203	Marca na pista	2,71
9	C&U	6205	Polimento	1,99

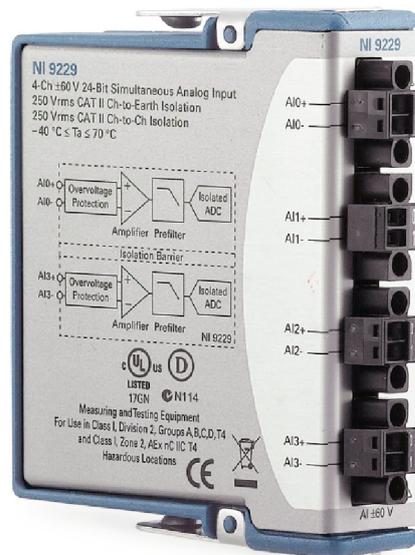


Figura 11 – Módulo de entrada analógica de tensão NI-9229 [23].

chassi NI CompactDAQ. Neste trabalho foi utilizado o chassi cDAQ-9174, que possui conexão USB e é responsável por controlar a temporização, sincronização e transferência de dados entre os módulos de E/S e o computador. Na Figura 12 é apresentado o chassi em questão.

Tabela 7 – Principais especificações do módulo NI-9229.

Número de canais	4 canais isolados
Tipo de canal	Entrada analógica de tensão
Resolução do ADC	24 bits
Modo de amostragem	Simultâneo
Taxa de amostragem ( $f_s$ )	1,613 kS/s - 50 kS/s
Tensão de entrada nominal	$\pm 60$ V
Proteção de sobretensão	$\pm 100$ V
Acomplamento	DC
Impedância de entrada	1 M $\Omega$
Ruído máximo de entrada	320 $\mu$ Vrms
Banda de passagem	$0,453 \cdot f_s$
Banda de rejeição	$0,547 \cdot f_s$
Atenuação mínima na banda de rejeição	100 dB
Largura de banda do filtro antirrecobrimento( <i>antialiasing</i> )	$0,453 \cdot f_s$



Figura 12 – Chassi cDAQ-9174 [24].

### 3.1.1.1 Circuito de entrada

O módulo de entrada de tensão NI-9229 possui como característica 4 entradas analógicas isoladas, na Figura 13 são apresentados os componentes de cada entrada. Os sinais

de cada canal são condicionados, amostrados por um ADC e, em seguida, armazenados em um *buffer*. Cada canal possui um caminho de sinal e ADC independentes, permitindo que todos os canais sejam amostrados simultaneamente.

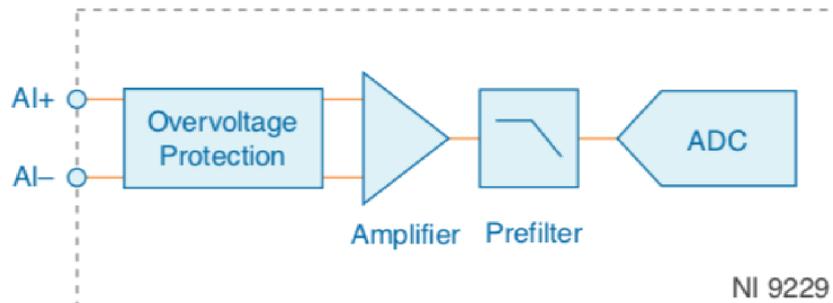


Figura 13 – Circuito de entrada da placa de aquisição [23].

### 3.1.1.2 Filtragem

O NI-9229 usa a combinação de filtragem analógica, ilustrada na Figura 13, e digital após o ADC para fornecer uma representação precisa dos sinais dentro da banda e rejeitar sinais fora da banda. As três bandas importantes a considerar são a banda de passagem, banda de rejeição e largura de banda do filtro antirrecobrimento.

#### 3.1.1.2.1 Banda de passagem

Os sinais dentro da banda de passagem têm ganho ou atenuação dependente da frequência. Os filtros do NI-9229 relacionam a faixa de frequência com a taxa de amostragem. Essa relação, juntamente com a variação do ganho na banda de passagem são apresentados na Figura 14.

#### 3.1.1.2.2 Banda de rejeição

O objetivo principal desse parâmetro é garantir uma atenuação mínima de 100 dB a partir de certa frequência e visando evitar o recobrimento de frequências (*aliasing*). Assim como a banda de passagem, a banda de rejeição do módulo NI-9229 depende da taxa de amostragem. A banda sem *aliasing* é definida pela capacidade do filtro de rejeitar frequências acima da frequência da banda de parada, no dispositivo de aquisição utilizado sua largura de banda é igual à taxa de amostragem menos a frequência da banda de parada.

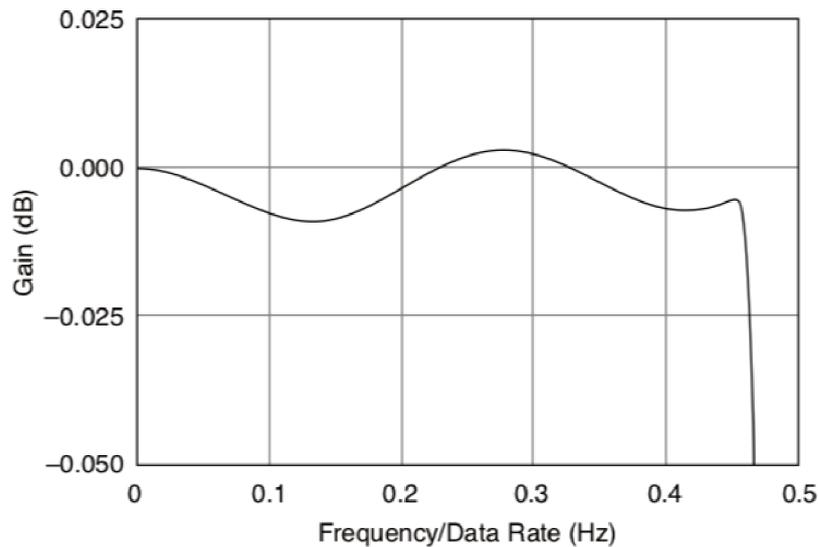


Figura 14 – Banda de passagem e variação do ganho ao longo da banda [23].

## 3.2 Programa

Existem diversas soluções proprietárias para aquisição e processamento de sinais, uma delas é o LabVIEW, um *software* de instrumentação virtual que permite a programação por meio de diagrama de blocos, facilitando a aquisição de dados e tornando mais simples a aplicação de técnicas de processamento de sinais. Neste trabalho, foi utilizado o *software* LabVIEW 2017 em conjunto com o pacote *Sound and Vibration Toolkit*, que fornece funções e indicadores para análise e exibição em aplicações de teste de áudio, medição acústica e de vibração. Para o projeto e aplicação dos filtros digitais foi utilizado o pacote *Digital Filter Design Toolkit*.

Para iniciar a programação no LabVIEW, primeiramente foi necessário criar um *Virtual Instrument* (VI). VI é o ambiente de programação gráfica, que permite ao usuário selecionar várias funções de uma paleta de controles, utilizar outros VIs como subprogramas, bem como desenvolver funções personalizadas.

### 3.2.1 Aquisição

A comunicação entre o LabVIEW e a placa de aquisição NI-9229 é realizada por meio de um conjunto de VIs presentes na biblioteca DAQmx. A criação de um canal virtual possibilita a interface com a placa de aquisição e leitura dos sinais. Para isso, foi utilizado o VI *DAQmx Create Virtual Channel(AI Voltage)* com os parâmetros de nível de tensão máximo e mínimo, tipo de configuração dos terminais e endereço do canal físico para mapeamento, os quais são obtidos no manual da placa de aquisição. Para este trabalho foi utilizado o canal físico AI0, conectado à saída *Full* do andrômetro, tensões máxima e mínima de  $\pm 60$  V e terminal do tipo diferencial, pois a placa de aquisição possui canais

isolados. Na Figura 15 é apresentado o VI *DAQmx Create Virtual Channel(AI Voltage)* e seus parâmetros.

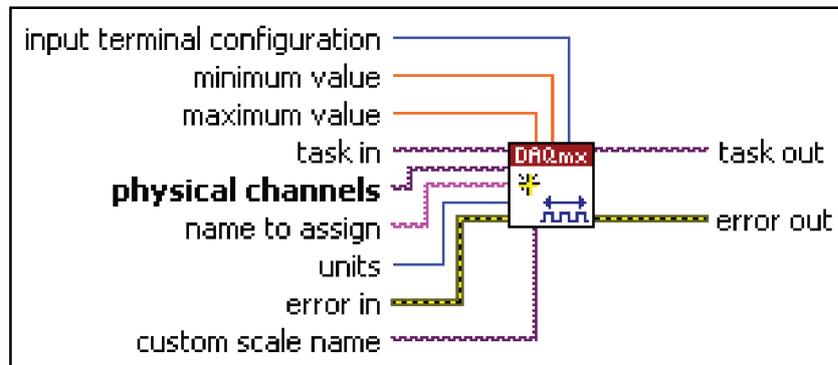


Figura 15 – VI *DAQmx Create Virtual Channel(AI Voltage)*.

O canal virtual foi então conectado ao VI *DAQmx Timing(Sample Clock)* ilustrado na Figura 16, que configura o modo de amostragem, taxa de amostragem e número de amostras por canal para aquisição e cria um *buffer* quando necessário. Foram utilizados os parâmetros de modo de amostragem contínua, taxa de amostragem de 50 kS/ch/s e 200k amostras por canal. O parâmetro de amostras por canal, quando configurado o modo de amostragem contínua, indica o tamanho do *buffer* alocado para as amostras.

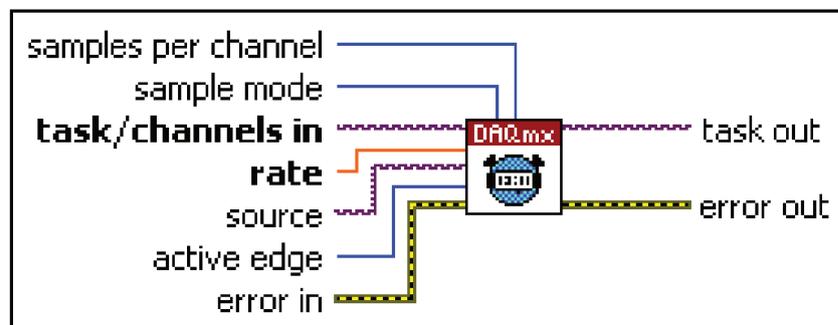


Figura 16 – VI *DAQmx Timing(Sample Clock)*.

Após a criação do canal virtual e configuração do *clock*, o VI *DAQmx Start Task*, ilustrado na Figura 17, é necessário para iniciar a comunicação e aquisição dos sinais.



Figura 17 – VI *DAQmx Start Task*.

A leitura dos sinais é realizada por meio da instância *Analog Wfm 1Chan NSamp* do VI *DAQmx Read*, exibido na Figura 18. Esse bloco faz a leitura de 10k amostras adquiridas

no canal AI0 e converte os sinais no tipo de dados *waveform*, facilitando o processamento posterior. Para que a leitura e processamento das amostras seja contínua, o VI *DAQmx Read* necessita estar dentro de um laço de repetição do tipo *while*.

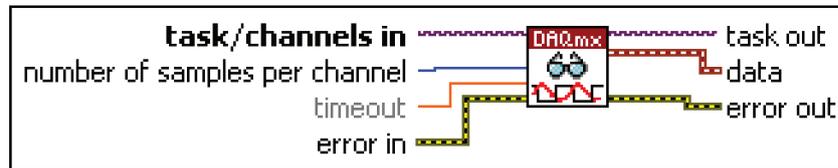


Figura 18 – VI *DAQmx Read(Analog Wfm 1Chan NSamp)*

Ao final do código de programação, ainda são necessários os blocos *DAQmx Stop Task* e *DAQmx Clear Task* para parar e encerrar a tarefa de leitura de tensão analógica criadas anteriormente. Esses blocos são apresentados na Figura 19.

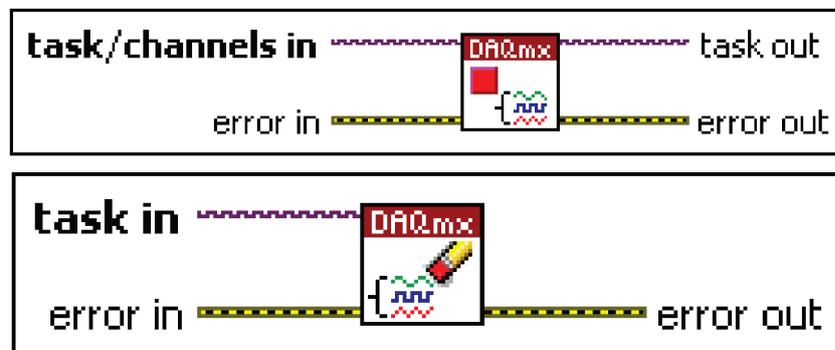


Figura 19 – VIs *DAQmx Stop Task* e *DAQmx Clear Task*.

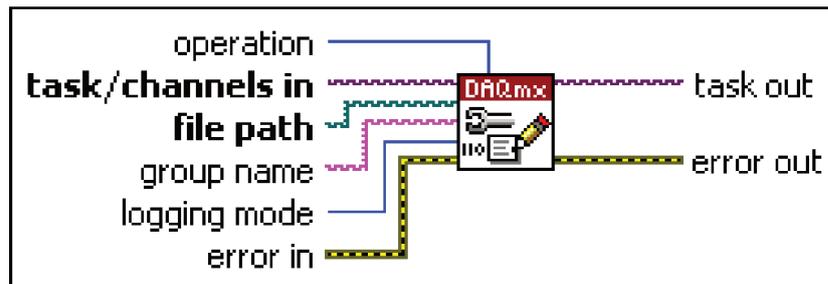
O programa desenvolvido para aquisição do sinal do andêmetro pode ser visto no Apêndice A, no qual o bloco denominado *Signal Processing* tem seu desenvolvimento detalhado na Seção 3.2.3.

### 3.2.2 Registro de dados

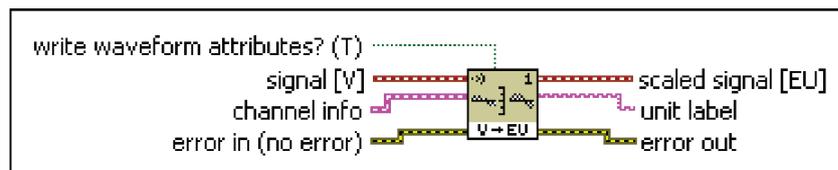
Com o intuito de salvar os dados adquiridos durante os ensaios para análises futuras, foi adicionado ao programa o VI *DAQmx Configure Logging*, apresentado na Figura 20. Assim, todas as amostras adquiridas são salvas em um arquivo com extensão ".tdms" que pode ser lido e processado utilizando diferentes técnicas posteriormente.

### 3.2.3 Processamento

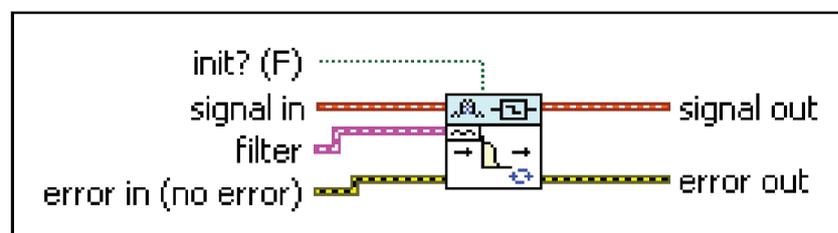
Antes de realizar a identificação dos níveis de vibração nas bandas baixa, média e alta, foi necessário converter o sinal lido em Volts para  $\mu\text{m/s}$ . Para isso o VI *SVL Scale Voltage to EU* foi utilizado. Esse bloco, apresentado na Figura 21, faz parte do pacote *Sound and Vibration Toolkit* e realiza o escalonamento do sinal de acordo com os parâmetros

Figura 20 – VI *DAQmx Configure Logging*.

escolhidos. Por meio de comparações da saída *Full* com as saídas *Low*, *Medium* e *High* do andrômetro, foi identificado que o sinal possui ganhos diferentes em cada banda de frequência. Portanto, foram aplicados dois ganhos no sinal adquirido, sendo o primeiro por meio do bloco *SVL Scale Voltage to EU* com o parâmetro de sensibilidade de 3 mV/ $\mu$ m/s. O segundo ganho é definido para cada banda de frequências com base nos sinais de calibração que são gerados pelo próprio andrômetro. O valor dos ganhos por banda serão definidos na Seção 4.1.1.

Figura 21 – VI *SVL Scale Voltage to EU*

Em seguida foi utilizado o VI *DFD Filtering(Waveform)*, ilustrado na Figura 22, para filtragem do sinal nas mesmas bandas de frequência utilizadas pelo andrômetro, que foram apresentadas na Tabela 3. Os filtros foram projetados utilizando a ferramenta *Classical Filter Design* presente no pacote *Digital Filter Design Toolkit* da NI. Os parâmetros de cada filtro e a ordem mínima calculada são apresentados na Tabela 8.

Figura 22 – VI *DFD Filtering(Waveform)*

As respostas em frequência dos filtros das bandas baixa, média e alta são apresentadas no Apêndice B.

A identificação dos níveis RMS do sinal filtrado foi realizada por meio do VI *SVL Running RMS Level(Time Waveform)*, ilustrado na Figura 23, que estima o valor RMS

Tabela 8 – Parâmetros dos filtros e ordem mínima calculada.

	Banda de frequência		
	Baixa	Média	Alta
Tipo do filtro	Passa-faixa IIR Butterworth		
Frequência de amostragem	50 kHz		
Frequência de rejeição 1	45 Hz	270 Hz	1620 Hz
Frequência de passagem 1	55 Hz	330 Hz	1980 Hz
Frequência de passagem 2	270 Hz	1620 Hz	9000 Hz
Frequência de rejeição 2	330 Hz	1980 Hz	11000 Hz
<i>Ripple</i> na banda de passagem	1 dB		
Atenuação na banda de rejeição	100 dB		
Ordem mínima calculada	88		

do sinal continuamente durante a aquisição, com tempo de integração de 1 segundo.

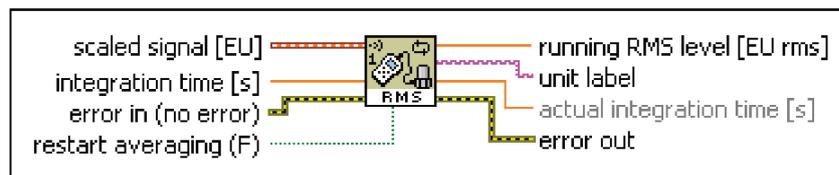


Figura 23 – VI SVL Running RMS Level (Time Waveform)

Também foi desenvolvida uma rotina para aplicar a técnica do envelope no sinal adquirido e, em seguida, realizar a transformada rápida de Fourier do resultado dessa operação. Para que toda a faixa de frequência desejada fosse analisada, a técnica do envelope foi aplicada por meio do VI OAT Envelope Detection (Waveform Output) com os parâmetros  $center\ frequency = 5000\ Hz$  e  $span = 4950\ Hz$ . O bloco em questão é ilustrado na Figura 24.

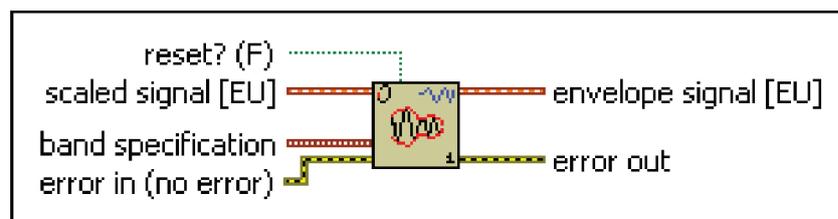


Figura 24 – VI OAT Envelope Detection (Waveform Output)

Após aplicada a técnica do envelope, foi utilizado o VI SVFA Power Spectrum para obter os componentes de frequência do sinal resultante.

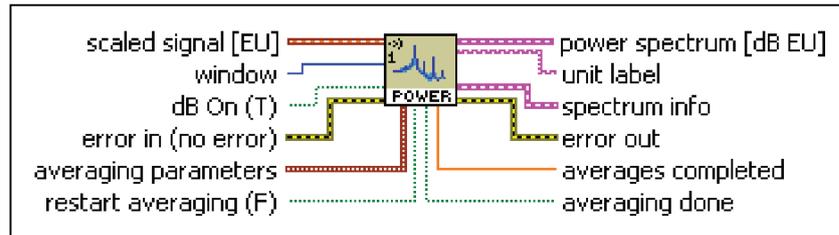


Figura 25 – VI *SVFA Power Spectrum*

Por fim, foram identificados os picos do espectro do envelope, que são as frequências características com maior incidência no sinal analisado. Realizando a comparação desses valores com as frequências características dos defeitos, é possível identificar a ocorrência de falhas e possíveis fontes. Para a detecção de picos, foi utilizado o VI *SVFA Spectrum Peak Search* configurado de maneira que somente os picos maiores que  $50 (\mu\text{m/s})^2$  fossem detectados. O VI usado é apresentado na Figura 26.

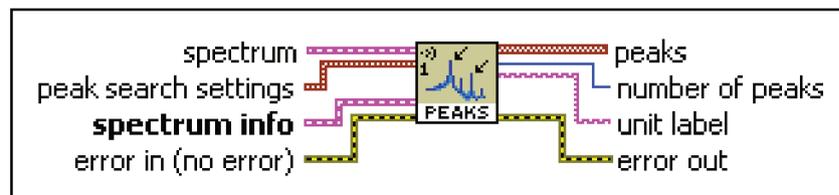


Figura 26 – VI *SVFA Spectrum Peak Search*

### 3.2.4 Interface

A interface do programa desenvolvido é apresentada no Apêndice C. A partir da interface desenvolvida, é possível visualizar os gráficos do sinal nos domínios do tempo e da frequência, os valores RMS para cada banda de filtragem, o espectro do envelope e o *array* contendo os picos detectados no espectro do envelope e suas amplitudes. Também foram adicionados à interface controles para configuração do canal físico a ser amostrado, parâmetros do tipo de sinal adquirido, informações para criação do arquivo de log e ainda configurações dos filtros e ganhos de calibração das bandas analisadas.

## 4 Resultados

A partir dos sinais adquiridos nos ensaios, são apresentados neste capítulo os resultados obtidos no processamento dos sinais por meio da rotina implementada no *software* LabVIEW. Inicialmente é apresentada a metodologia de testes, calibração do sistema de medição e as características dos rolamentos utilizados nos ensaios. Em seguida, é apresentada a análise do processamento dos sinais para rolamentos com e sem defeitos. Sendo os resultados do processamento dos sinais coletados comparados com os valores observados no andrômetro.

### 4.1 Metodologia de testes

O desenvolvimento da investigação experimental iniciou-se com a montagem do sistema de medição apresentado no Capítulo 3. É importante ressaltar que antes de efetuar ensaios no andrômetro, é indicado que o mesmo esteja ligado por pelo menos 30 minutos para estabilização do sistema, evitando assim erros de medição.

Inicialmente, foi efetuada a calibração do sistema de medição por meio do circuito de calibração do andrômetro. Em seguida, para o ajuste e validação do *software* desenvolvido, foram efetuados testes com rolamentos novos e sem defeitos conhecidos.

Após a etapa de testes e validação do sistema proposto, foram efetuados testes utilizando 6 rolamentos, com defeitos previamente conhecidos (pista, esfera e polimento) indicados pelo inspetor de qualidade da WEG. Os rolamentos foram escolhidos de diferentes fabricantes e modelos propositalmente para que fosse possível a análise e comparação dos sistemas em diferentes cenários. Além desses ensaios com rolamentos com defeitos conhecidos, os testes com 2 rolamentos novos e sem defeitos também foram registrados e apresentados neste trabalho.

O procedimento experimental foi desenvolvido de modo a coletar sinais com uma frequência de aquisição de 50 kHz e intervalo de coleta de 1 segundo, totalizando uma amostra de 50 mil pontos por coleta. A frequência de aquisição definida foi suficientemente alta para avaliar os níveis RMS da vibração nas três bandas de frequência, bem como verificar a frequência dos impulsos gerados pelos defeitos e ressonâncias do sistema.

Na Figura 27 é apresentado o esquema de montagem do sistema de medição utilizado nos ensaios experimentais.

#### 4.1.1 Calibração

Conforme mencionado na Seção 3.1, o andrômetro utilizado possui um circuito de calibração interno que gera sinais senoidais nas frequências de 122, 737 e 4243 Hertz.

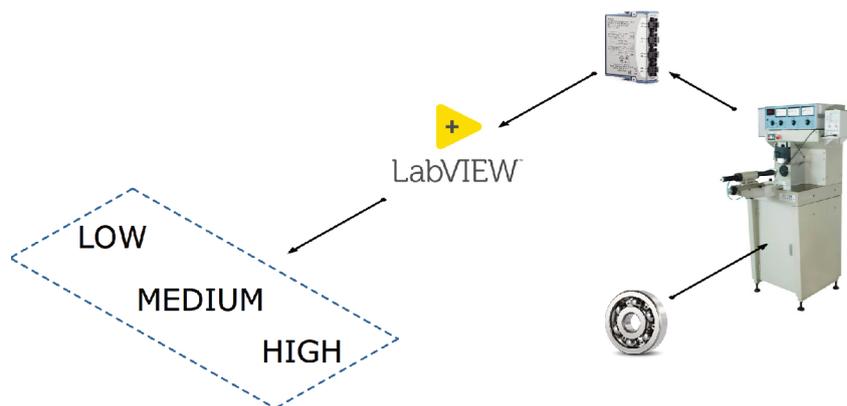


Figura 27 – Esquema de montagem do sistema de medição.

Esses sinais foram utilizados como padrão de calibração para o *software* desenvolvido. Nos ensaios realizados, identificou-se que as frequências dos sinais de calibração apresentam uma pequena diferença (menor que 0,8%) do especificado no manual do equipamento, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Frequências de calibração especificadas e verificadas.

Banda	Frequência especificada (Hz)	Frequência verificada (Hz)	Diferença observada (%)
Baixa	122	122,01	0,008
Média	737	731,15	-0,794
Alta	4243	4219,54	-0,553

Os sinais padrão foram gerados individualmente e em seguida aplicado um ganho ao nível RMS da respectiva banda, de forma que o valor identificado pelo *software* apresentasse o mesmo valor do mostrador presente no andrômetro. Os ganhos resultantes foram de 3,2545 na banda baixa, 1,0675 na banda média e 1,2845 na banda alta. Na Figura 28 são apresentados os sinais de calibração resultantes após aplicação dos ganhos calculados.

#### 4.1.2 Rolamentos e seus defeitos conhecidos

Foram utilizados oito amostras de rolamentos de diferentes fabricantes e modelos, sendo seis com defeitos previamente conhecidos e dois sem defeito. As características dos rolamentos testados e a localização dos defeitos são apresentadas na Tabela 10. Os defeitos foram identificados, utilizando os três parâmetros descritos na Seção 2.4, pelo inspetor de qualidade da empresa WEG, que possui vasta experiência em testes e classificação de rolamentos utilizando o andrômetro.

Para o cálculo das frequências características foram utilizados os dados geométricos de cada rolamento, a rotação do eixo do andrômetro igual a 1800 RPM (30 Hz) e pista

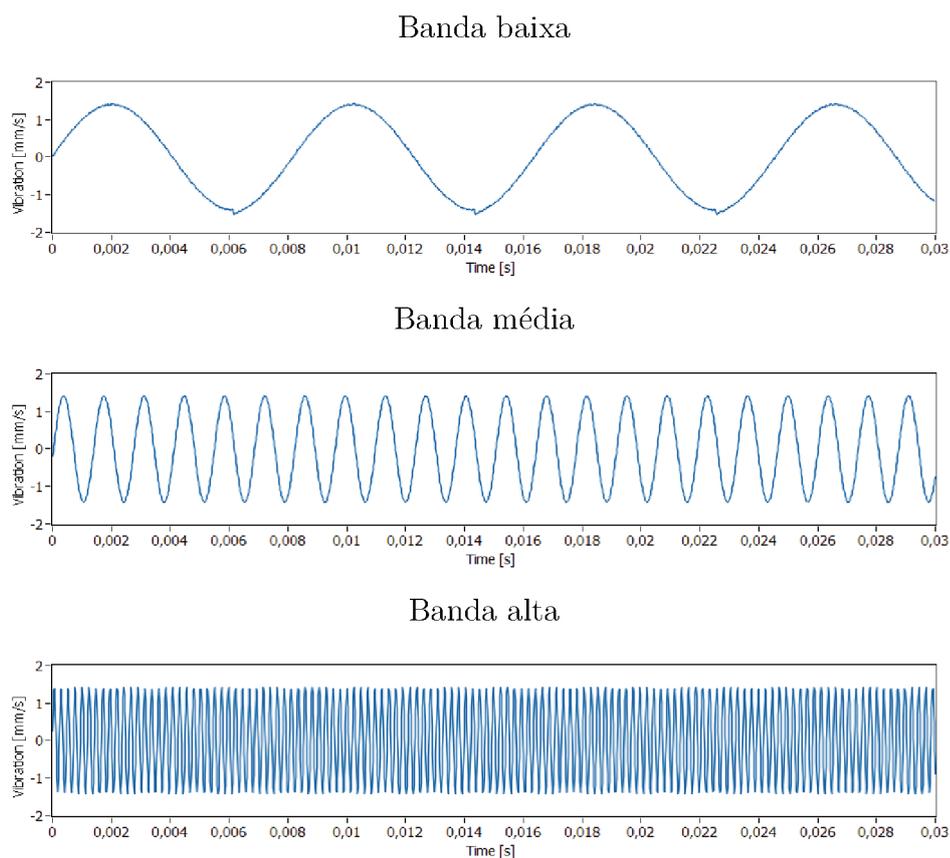


Figura 28 – Sinais de calibração no domínio do tempo escalonados.

Tabela 10 – Rolamentos testados e seus defeitos conhecidos.

Amostra	Fabricante	Modelo	Diâmetro interno (mm)	Defeito conhecido
1	NSK	6309	45	Sem defeito
2	SKF	6207	35	Sem defeito
3	C&U	6309	45	Marca na pista
4	SKF	6209	45	Marca na pista
5	NSK	6209	45	Marca na esfera
6	NSK	6311	55	Marca na esfera
7	C&U	6311	55	Polimento
8	SKF	6207	35	Polimento

interna como sendo a pista girante. Os valores obtidos conforme as fórmulas apresentadas na Tabela 1 são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Frequências características dos defeitos para os rolamentos testados.

Amostra	Frequência característica do defeito (Hz)		
	Pista interna	Pista externa	Esfera
1	148,119	91,881	120,997
2	163,040	106,960	138,207
3	148,119	91,881	120,997
4	177,475	122,525	158,288
5	177,475	122,525	158,288
6	148,304	91,696	120,117
7	148,304	91,696	120,117
8	163,040	106,960	138,207

## 4.2 Análise dos dados

A fase inicial do processamento consiste em avaliar o sinal no domínio do tempo e no domínio da frequência. Em seguida, são identificados os picos do sinal no domínio da frequência e, por fim, é realizado o cálculo de vibração em  $\mu\text{m/s}$  RMS para as bandas baixa, média e alta.

### 4.2.1 Rolamentos sem defeito

#### 4.2.1.1 Amostra 1

Inicialmente foi avaliado o sinal no domínio do tempo e no domínio da frequência, sendo que o *software* desenvolvido está preparado para apresentar as duas representações, conforme apresentado na Figura 29.

Após aplicação da técnica do envelope e sua transformação para o domínio da frequência, a rotina busca os picos maiores que  $50 (\mu\text{m/s})^2$  no espectro do envelope. Os picos representam as frequências com maior repetição no sinal processado. Esses valores são então comparados diretamente com as frequências de defeito características da geometria do rolamento analisado. Em seguida, também são calculados os níveis de vibração RMS nas bandas baixa, média e alta. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 30.

Nesta amostra, que não apresentava defeito, foi observado que tanto o espectro de potência quanto o espectro do envelope possuem baixa amplitude, pois são menores que  $50 (\mu\text{m/s})^2$ . Também foi verificado que os picos no espectro do envelope são bem distribuídos por toda a faixa de frequência analisada e suas amplitudes constantes. Estas características indicam que o rolamento não apresenta defeitos.

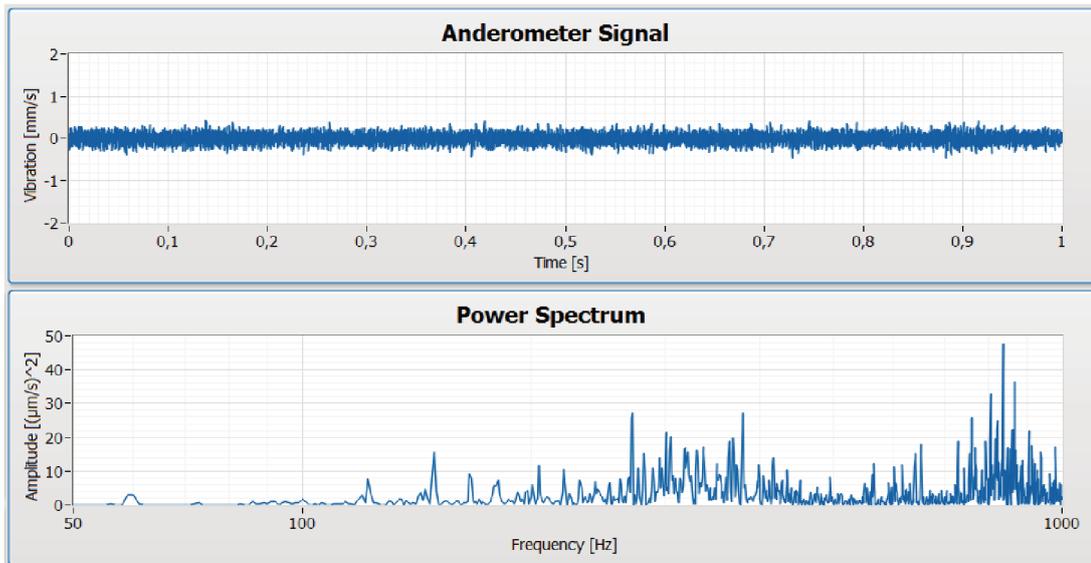


Figura 29 – Representação do sinal analisado nos domínios do tempo e da frequência para a amostra 1.

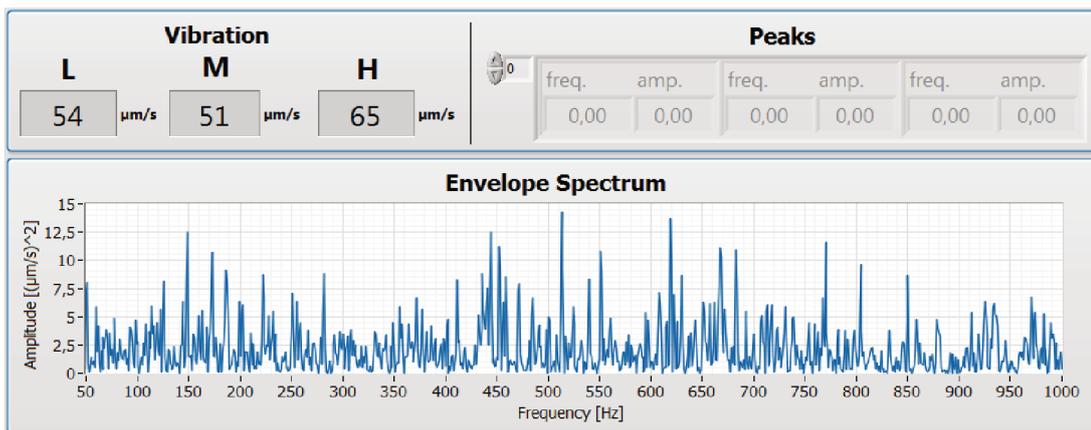


Figura 30 – Resultado da análise de vibração nas bandas baixa, média e alta, técnica do envelope e picos no espectro do envelope para a amostra 1.

Os valores das bandas de frequência observados no anderômetro para essa amostra foram de aproximadamente 45  $\mu\text{m/s}$  para a banda baixa, 50  $\mu\text{m/s}$  para a banda média e 60  $\mu\text{m/s}$  para a banda alta. Conforme mencionado na Seção 2.4, esta leitura é realizada observando os mostradores analógicos do anderômetro durante o ensaio, sendo esse método subjetivo e pouco preciso. No *software* desenvolvido os valores obtidos após processamento foram de 54  $\mu\text{m/s}$  para a banda baixa, 51  $\mu\text{m/s}$  para a banda média e 65  $\mu\text{m/s}$  para a banda alta.

Os níveis de vibração identificados tanto no anderômetro quanto no *software* se mantiveram bem abaixo dos valores máximos definidos pelo grupo V2 da norma JB/T 10187-2011 apresentado na Tabela 4, outra característica que indica a ausência de defeitos.

### 4.2.1.2 Amostra 2

Os gráficos do sinal no domínio do tempo e no domínio da frequência para a amostra 2 são apresentados na Figura 31. Foi observado que, para a amostra analisada, a amplitude de ambos sinais é maior do que na amostra 1 e com a ocorrência de um pico maior que  $125 (\mu\text{m/s})^2$  no espectro de potência. Porém, somente essa análise não é suficiente para classificar o estado do rolamento, sendo que o pico de frequência detectado pode não ser relacionado a um defeito e sim à ressonância de algum componente do sistema.

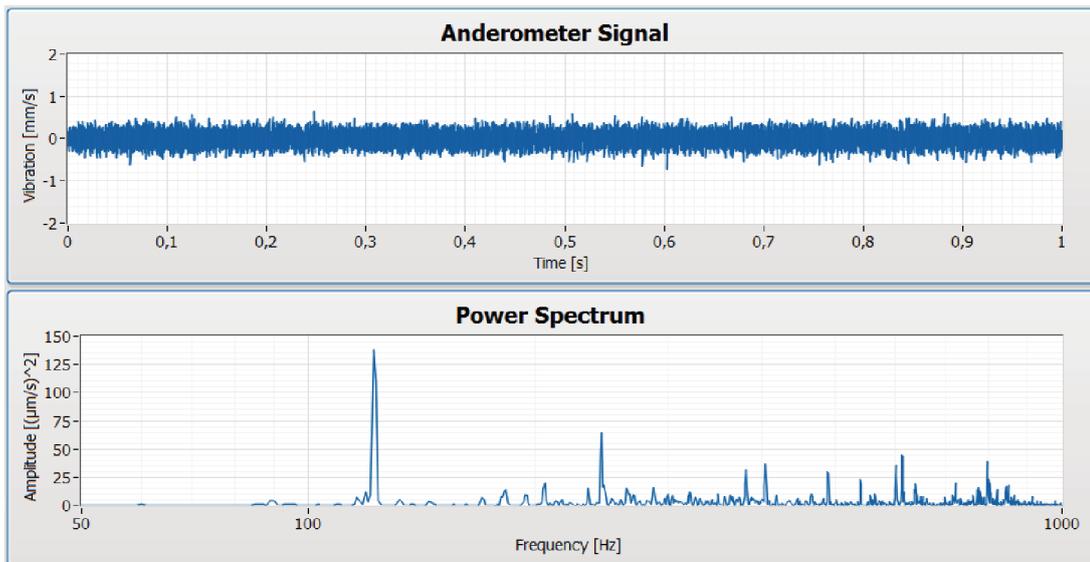


Figura 31 – Representação do sinal analisado nos domínios do tempo e da frequência para a amostra 2.

Depois de aplicar a técnica do envelope e obtenção do espectro do envelope por meio da FFT, foi verificado que, assim como na amostra 1, a ocorrência de picos e suas amplitudes se manteve distribuída em todo o espectro do envelope da amostra 2, não sendo identificados picos predominantes. Os resultados são ilustrados na Figura 32.

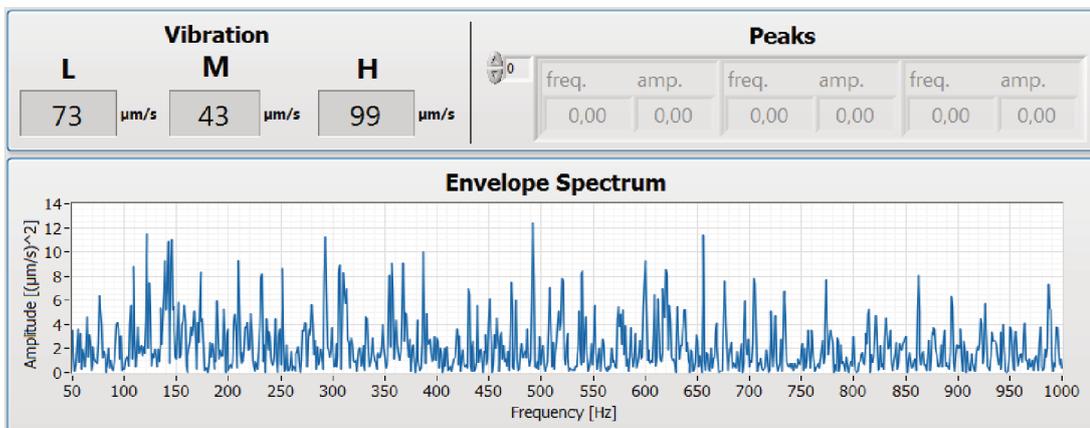


Figura 32 – Resultado da análise de vibração nas bandas baixa, média e alta, técnica do envelope e picos no espectro do envelope para a amostra 2.

Para essa amostra, o anderômetro apresentou  $65 \mu\text{m/s}$  para a banda baixa,  $40 \mu\text{m/s}$  para a banda média e  $90 \mu\text{m/s}$  para a banda alta. No *software* os valores foram de  $73 \mu\text{m/s}$  para a banda baixa,  $43 \mu\text{m/s}$  para a banda média e  $99 \mu\text{m/s}$  para a banda alta. Foi identificada uma diferença nos valores das bandas baixa e alta, que pode ser atribuída ao fato de o anderômetro utilizar filtros analógicos com menor seletividade do que a filtragem digital realizada via *software*.

## 4.2.2 Rolamentos com defeito na pista

### 4.2.2.1 Amostra 3

Na Figura 33 são apresentados os sinais nos domínios do tempo e da frequência para um sinal de rolamento com defeito na pista.

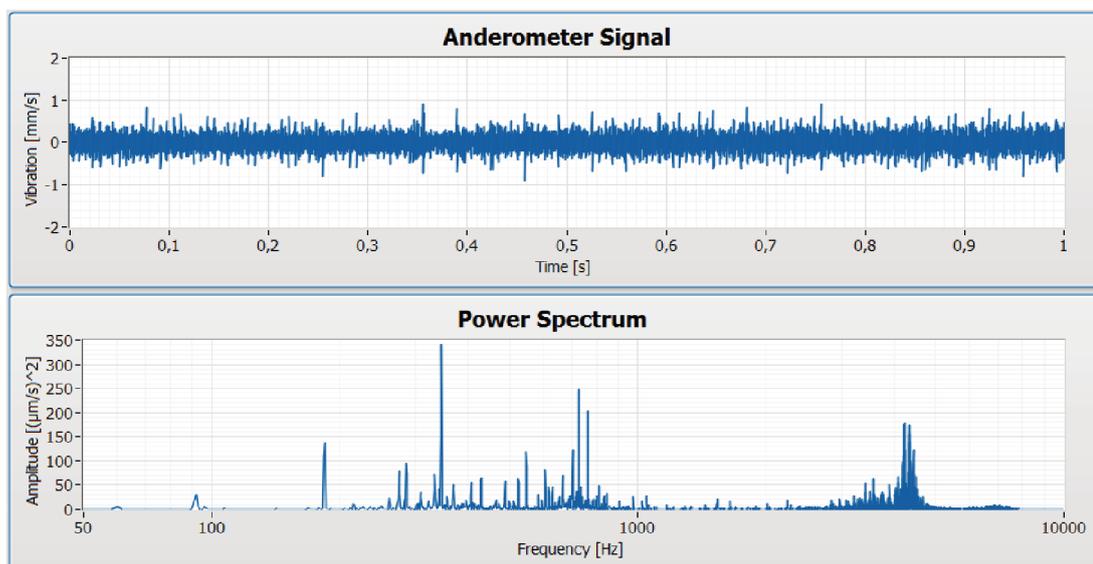


Figura 33 – Representação do sinal analisado nos domínios do tempo e da frequência para a amostra 3.

Pode ser observado que o sinal no domínio do tempo possui impulsos, estes são gerados pelos impactos das esferas contra o defeito na pista. Esses impulsos são igualmente espaçados no sinal no domínio do tempo quando o rolamento possui defeito na pista interna ou externa, não sendo possível identificar em qual pista o defeito está localizado.

A técnica do envelope foi então aplicada ao sinal do rolamento com defeito na pista, sendo que o espectro do envelope é apresentado na Figura 34, juntamente com os picos detectados no espectro e níveis de vibração.

O espectro do envelope apresentou os três maiores picos nas frequências  $147,52 \text{ Hz}$ ,  $294,94 \text{ Hz}$  e  $442,62 \text{ Hz}$ . Pode-se constatar a forte indicação do defeito, pois a frequência mais proeminente no sinal é a frequência de defeito na pista interna do rolamento, sendo que suas harmônicas também foram identificadas, o que indica a capacidade da rotina na identificação do defeito no rolamento analisado.

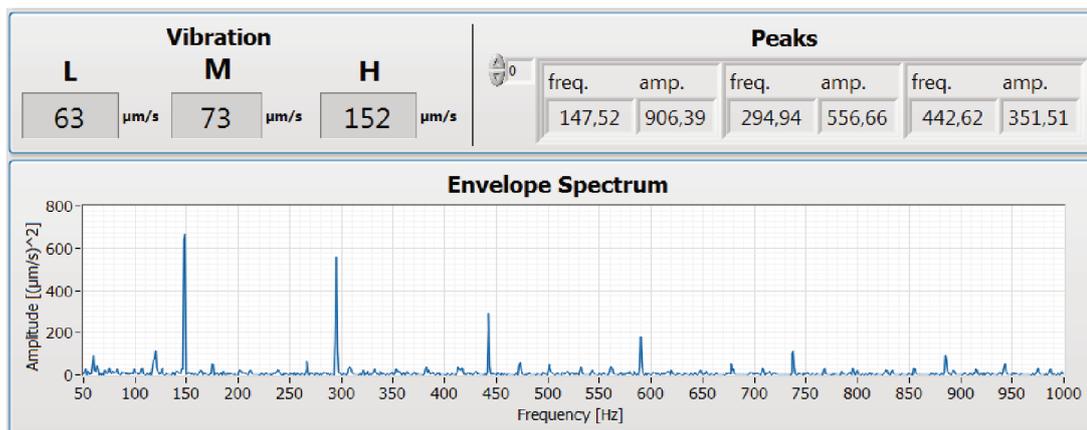


Figura 34 – Resultado da análise de vibração nas bandas baixa, média e alta, técnica do envelope e picos no espectro do envelope para a amostra 3.

Foi observada uma pequena diferença entre a frequência calculada (148,119 Hz) e a frequência identificada (147,52 Hz). Isso é causado pela resolução de frequência do sinal, que no caso dos sinais analisados é de 1 Hz, maior que a diferença entre os dois valores que é de 0,599 Hz. Dessa forma, qualquer valor inferior a 1 Hz na comparação do valor calculado com o valor identificado é aceitável, visto que não se tem resolução do sinal suficiente para identificar com mais precisão o valor da frequência. Entretanto, tal erro não prejudica a análise, uma vez que os valores encontrados foram muito próximos aos calculados.

Os valores de vibração identificados foram de  $63 \mu\text{m/s}$  para a banda baixa,  $73 \mu\text{m/s}$  para a banda média e  $152 \mu\text{m/s}$  para a banda alta. Enquanto que o nível de vibração observado no anderômetro foi de  $70 \mu\text{m/s}$  para a banda baixa,  $60 \mu\text{m/s}$  para a banda média e  $110 \mu\text{m/s}$  para a banda alta. Os valores calculados nas bandas baixa e média se mantiveram próximos aos observados no anderômetro. Porém, o valor da banda alta apresentou diferença de  $42 \mu\text{m/s}$ . Esse valor elevado é esperado, visto que o rolamento possui um defeito. Na comparação com os níveis de vibração da norma utilizada, os valores observados no anderômetro estão dentro do limite aceitável, enquanto que no *software* o valor da banda alta excede esse limite. Isso indica que, mesmo analisando somente a vibração nas bandas de frequência, o *software* desenvolvido obteve desempenho superior ao processamento disponível diretamente no anderômetro.

#### 4.2.2.2 Amostra 4

O sinal da amostra 4, que possui defeito na pista, foi adquirido e transformado para o domínio da frequência. Os respectivos resultados são apresentados na Figura 35.

Observando o sinal no domínio do tempo, notou-se a ausência de impulsos gerados pelos impactos das esferas contra o defeito e sua amplitude reduzida. Tal fato pode ser um indicativo que o rolamento de fato não possua defeitos, ou que o defeito ainda esteja

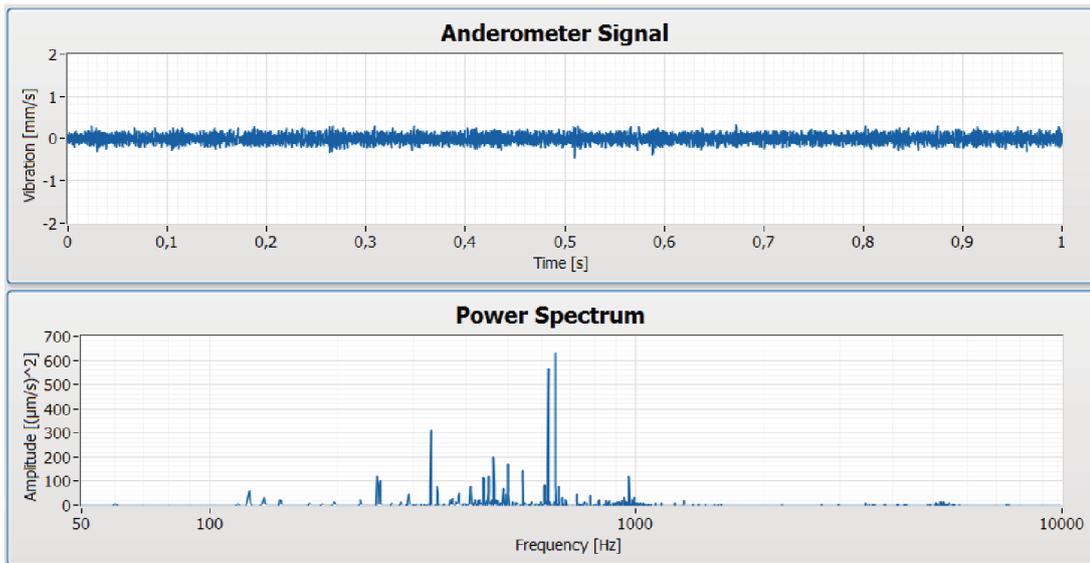


Figura 35 – Representação do sinal analisado nos domínios do tempo e da frequência para a amostra 4.

em seus estágios iniciais. O sinal foi então processado utilizando a técnica do envelope e, em seguida, foram identificados os picos e níveis de vibração. Os resultados são ilustrados na Figura 36.

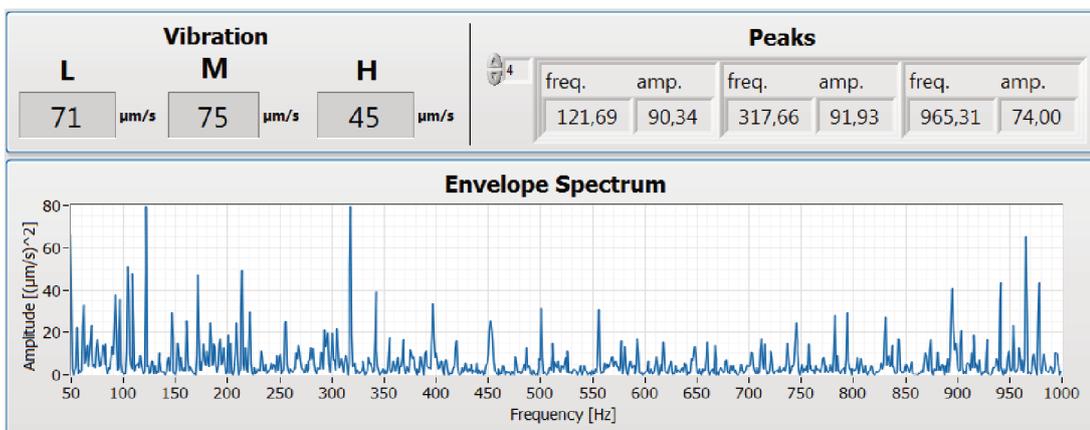


Figura 36 – Resultado da análise de vibração nas bandas baixa, média e alta, técnica do envelope e picos no espectro do envelope para a amostra 4.

Para a amostra analisada, o espectro do envelope apresentou picos distribuídos por todo o espectro e com baixos valores de amplitude. Os picos com maior amplitude foram detectados nas frequências 317,66 Hz, 121,99 Hz e 965,31 Hz. A frequência de defeito na pista externa (122,525 Hz) foi identificada como a segunda mais proeminente no sinal. Também foi identificado que o pico com maior amplitude é uma harmônica da frequência de defeito na esfera (2x 158,288 Hz). Dessa forma, existe um forte indício de que o rolamento possua algum defeito, como relatado pelo inspetor de qualidade, mas não é possível identificar por meio da análise realizada no *software* a localização deste defeito.

A outra frequência identificada (965,31 Hz), não possui relação direta com as frequências de defeito do rolamento ou suas harmônicas. Assim, pode-se concluir que essa frequência provavelmente é relativa à ressonância de algum componente que está sendo excitada pelo funcionamento do sistema.

O *software* identificou as vibrações de 71  $\mu\text{m/s}$  para a banda baixa, 75  $\mu\text{m/s}$  para a banda média e 45  $\mu\text{m/s}$  para a banda alta. Os níveis no andrômetro foram de 50  $\mu\text{m/s}$  para a banda baixa, 70  $\mu\text{m/s}$  para a banda média e 40  $\mu\text{m/s}$  para a banda alta. Ambos se mantiveram abaixo dos valores limite, outro indício de que o defeito ainda esteja em seus estágios iniciais.

### 4.2.3 Rolamentos com defeito na esfera

#### 4.2.3.1 Amostra 5

Na Figura 37 é apresentado o sinal nos domínios do tempo e da frequência para um rolamento com defeito na esfera.

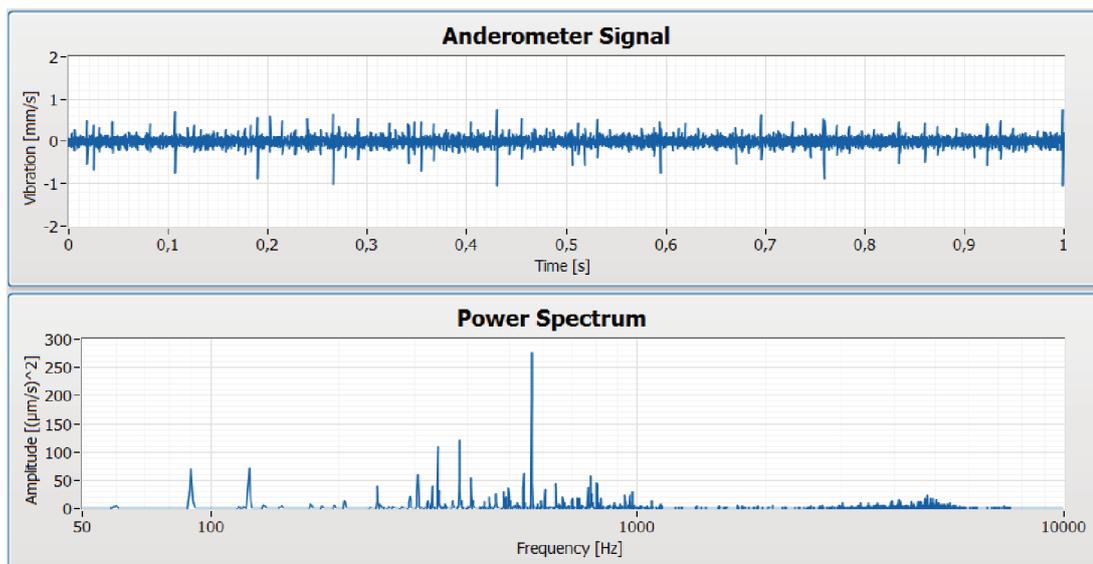


Figura 37 – Representação do sinal analisado nos domínios do tempo e da frequência para a amostra 5.

Por meio da análise visual do sinal no domínio do tempo, é possível identificar impulsos gerados pela passagem do defeito. Sabendo que o movimento das esferas não ocorrem somente em um eixo, a identificação do defeito na esfera é complexa. De acordo com [25], o movimento da esfera em planos distintos pode fazer com que o defeito não tenha contato com nenhuma das pistas e, conseqüentemente, o padrão do sinal poderá apresentar características não estacionárias.

Na Figura 38 é apresentado o espectro obtido após a aplicação da técnica do envelope. É possível observar que foi detectada a frequência do defeito na esfera (158,288 Hz) e

também suas harmônicas (316,576 Hz e 474,864 Hz), sendo que todos os picos detectados possuem relação direta com a frequência de defeito na esfera.

Novamente ocorreu uma pequena diferença, porém aceitável, entre os valores identificados e calculados, visto que são inferiores à resolução de frequência do sinal (1 Hz).

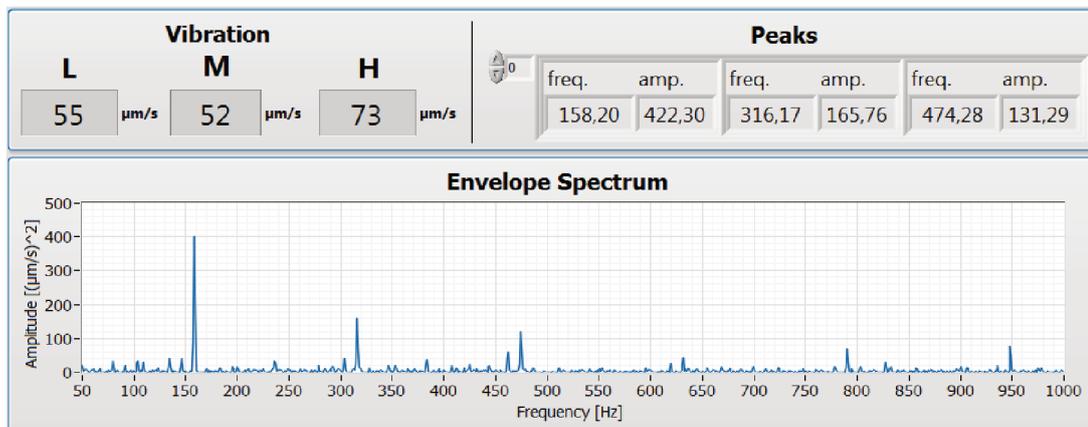


Figura 38 – Resultado da análise de vibração nas bandas baixa, média e alta, técnica do envelope e picos no espectro do envelope para a amostra 5.

Para a amostra 5, o anderômetro indicou os seguintes níveis de vibração: 50  $\mu\text{m/s}$  para as bandas baixa e média, e 60  $\mu\text{m/s}$  para a banda alta. Já o processamento via *software* resultou em 55  $\mu\text{m/s}$  para a banda baixa, 52  $\mu\text{m/s}$  para a banda média e 73  $\mu\text{m/s}$  para a banda alta, sendo os resultados obtidos próximos ao observado durante o ensaio no anderômetro.

#### 4.2.3.2 Amostra 6

Outra amostra com defeito na esfera foi testada, sendo o sinal nos domínios do tempo e da frequência apresentados na Figura 39.

Novamente é possível observar a ocorrência de impulsos no sinal no domínio do tempo, que podem indicar defeitos na pista e na esfera, não sendo suficientes para o correto diagnóstico do estado do rolamento.

A aplicação da técnica do envelope resultou em um espectro com um pico predominante em 120,18 Hz, e picos de menor amplitude nas frequências 480,68 Hz e 600,80 Hz. Os picos no espectro do envelope e níveis de vibração RMS são apresentados na Figura 40. Todos os picos identificados são equivalentes à frequência de defeito na esfera (120,117 Hz) e suas harmônicas.

A vibração observada no anderômetro foi de 50  $\mu\text{m/s}$  para a banda baixa, 70  $\mu\text{m/s}$  para a banda média e 90  $\mu\text{m/s}$  para a banda alta. Os resultados deste trabalho para a amostra 6 foram de 67  $\mu\text{m/s}$  para a banda baixa, 76  $\mu\text{m/s}$  para a banda média e 117  $\mu\text{m/s}$  para a banda alta.

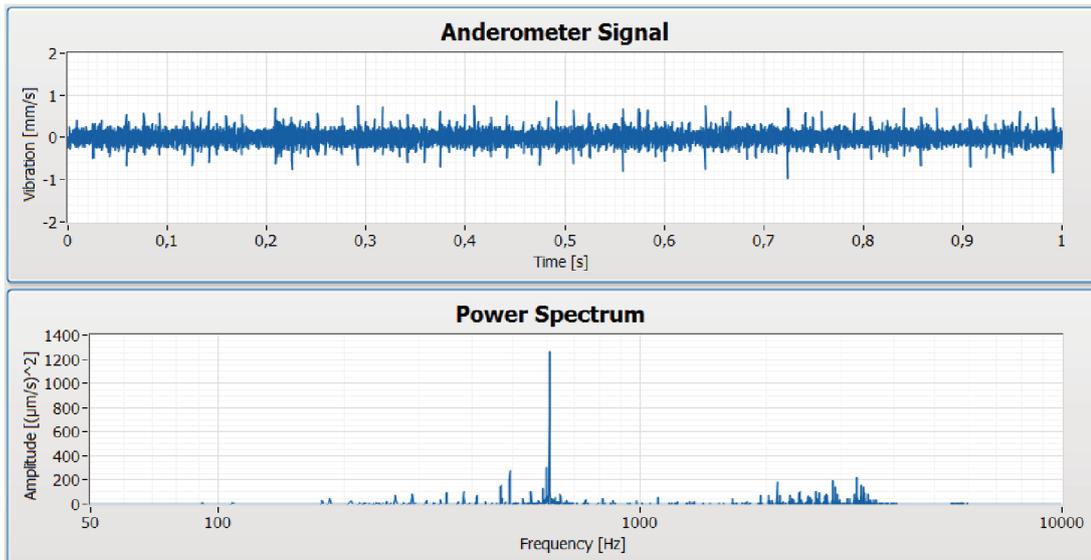


Figura 39 – Representação do sinal analisado nos domínios do tempo e da frequência para a amostra 6.

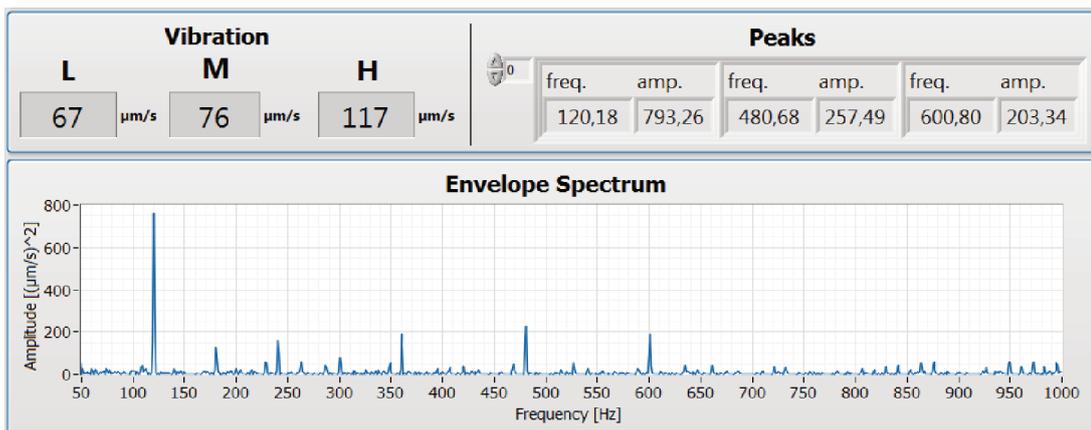


Figura 40 – Resultado da análise de vibração nas bandas baixa, média e alta, técnica do envelope e picos no espectro do envelope para a amostra 6.

Os resultados do processamento apresentou níveis de vibração maiores do que o observado no anderômetro, com o valor da banda alta ficando mais próximo do limite definido no grupo V2 da norma utilizada, o que pode indicar uma maior sensibilidade do *software* a defeitos.

## 4.2.4 Rolamentos com defeito de polimento

### 4.2.4.1 Amostra 7

Também foram realizados ensaios utilizando rolamentos com defeito de polimento nas pistas. Esse é um defeito que ocorre devido à baixa qualidade dos materiais utilizados ou problemas de processo na linha de produção dos fabricantes. Na Figura 41 é apresentado o sinal nos domínios do tempo e da frequência para esta amostra.

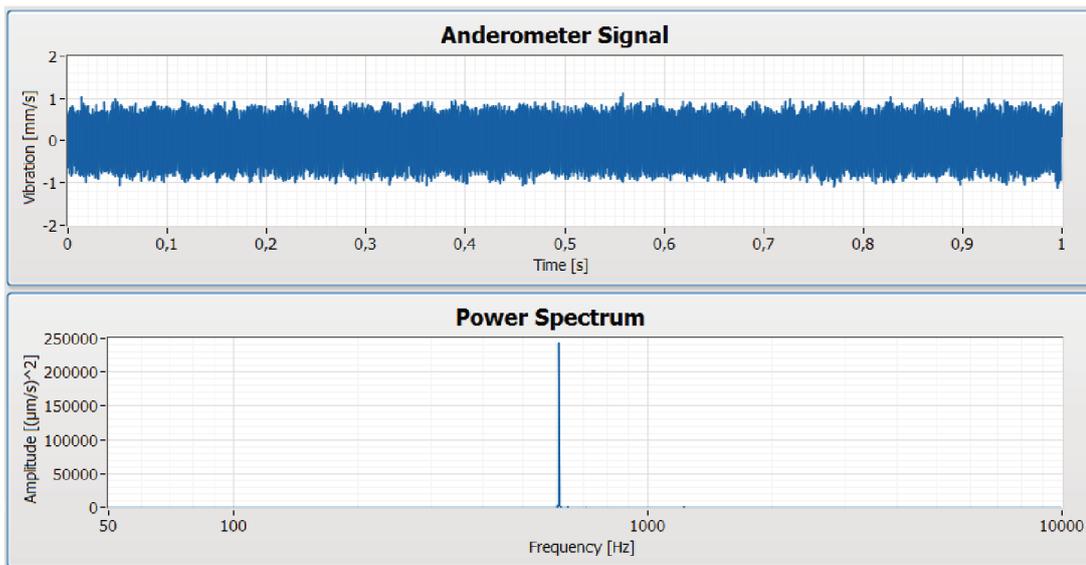


Figura 41 – Representação do sinal analisado nos domínios do tempo e da frequência para a amostra 7.

Observou-se que esse tipo de defeito gera um ruído com amplitude muito elevada, sendo facilmente identificado por meio da análise visual do sinal.

Aplicada a técnica do envelope, seu espectro apresentou picos nas frequências 611,75 Hz, 59,10 Hz, e 702,84 Hz, sendo o primeiro o pico com maior amplitude. A análise do envelope e os níveis de vibração são apresentados na Figura 42.

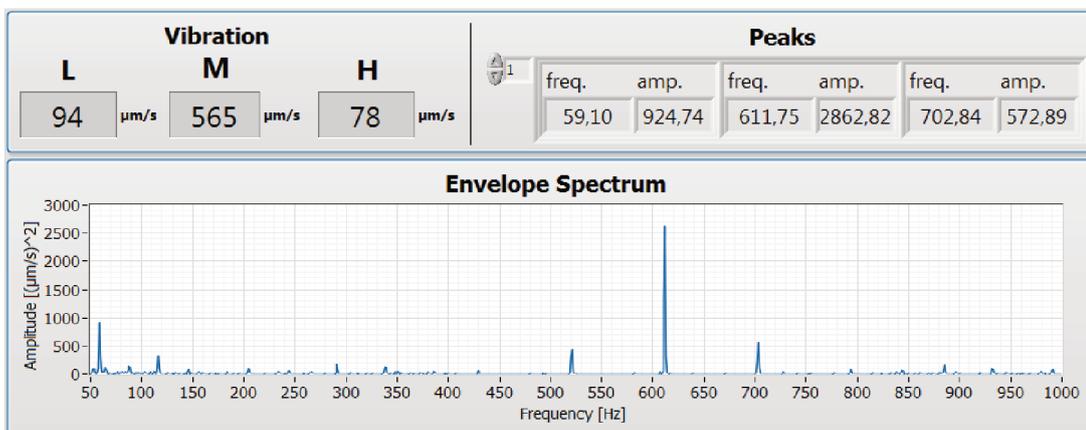


Figura 42 – Resultado da análise de vibração nas bandas baixa, média e alta, técnica do envelope e picos no espectro do envelope para a amostra 7.

O segundo maior pico identificado está relacionado a uma harmônica da frequência de rotação do eixo ( $2 \times 30$  Hz). As demais frequências não possuem relação direta com a rotação do eixo, nem são relativas as frequências de defeito do rolamento ou suas harmônicas.

O defeito de polimento também pode ser identificado pelo alto nível de vibração detectado nas bandas de frequência. Para a amostra analisada, os valores identificados no

*software* foram de  $94 \mu\text{m/s}$  para a banda baixa,  $565 \mu\text{m/s}$  para a banda média e  $78 \mu\text{m/s}$  para a banda alta, enquanto que o *anderômetro* apresentou  $90 \mu\text{m/s}$  para a banda baixa,  $580 \mu\text{m/s}$  para a banda média e  $70 \mu\text{m/s}$  para a banda alta. Vale ressaltar que para valores de vibração maiores que  $130 \mu\text{m/s}$ , o inspetor de qualidade necessita ajustar a escala do mostrador analógico no *anderômetro*, diminuindo a precisão dos valores observados. Assim, os níveis de vibração obtidos por meio do processamento do sinal via *software* são considerados mais precisos.

#### 4.2.4.2 Amostra 8

A representação do sinal da amostra 8 nos domínios do tempo e da frequência é apresentada na Figura 43. Novamente foi possível identificar altos níveis de ruído no sinal amostrado, característica de rolamentos com defeito de polimento nas pistas.

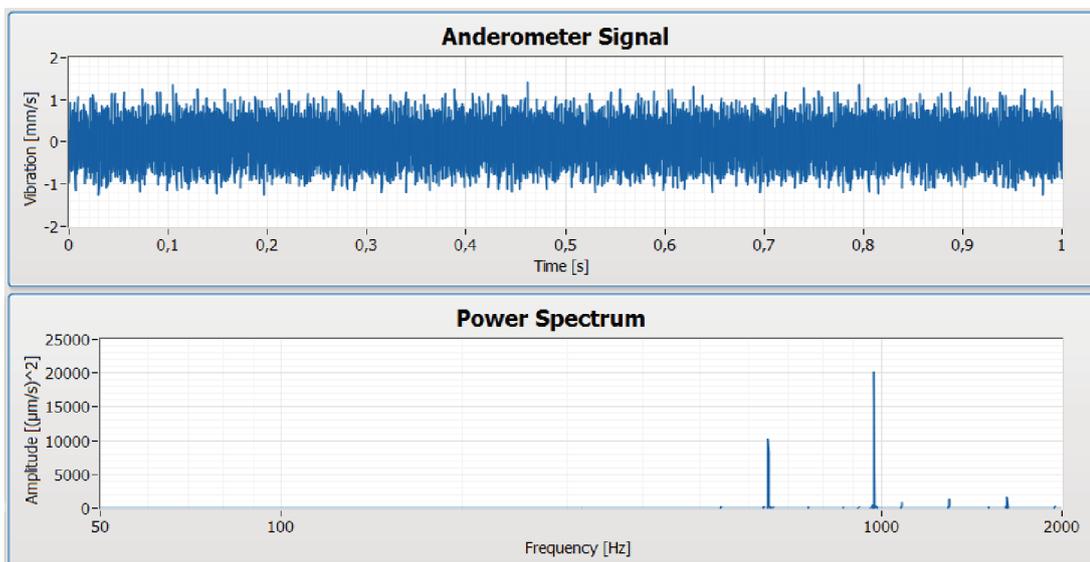


Figura 43 – Representação do sinal analisado nos domínios do tempo e da frequência para a amostra 8.

Ao aplicar a técnica do envelope foi possível identificar um pico proeminente na frequência de  $324,21 \text{ Hz}$ , e picos menores, porém acima do limite definido, nas frequências  $1621,06 \text{ Hz}$  e  $1945,29 \text{ Hz}$ . Todos os picos possuem frequência próxima a frequência de defeito na pista interna e suas harmônicas, o que pode indicar a presença de dois tipos de defeito no rolamento. Os dados obtidos são apresentados na Figura 44.

Apesar de serem identificadas frequências próximas à frequência de defeito na pista interna, os indícios de defeito de polimento são mais fortes. Isso porque as principais características de defeito de polimento são as altas amplitudes nos espectros de potência e do envelope, e também elevados níveis de vibração nas bandas analisadas.

O *anderômetro* indicou, para esse ensaio, vibrações na ordem de  $50 \mu\text{m/s}$  para a banda baixa,  $210 \mu\text{m/s}$  para a banda média e  $320 \mu\text{m/s}$  para a banda alta. Os valores observados

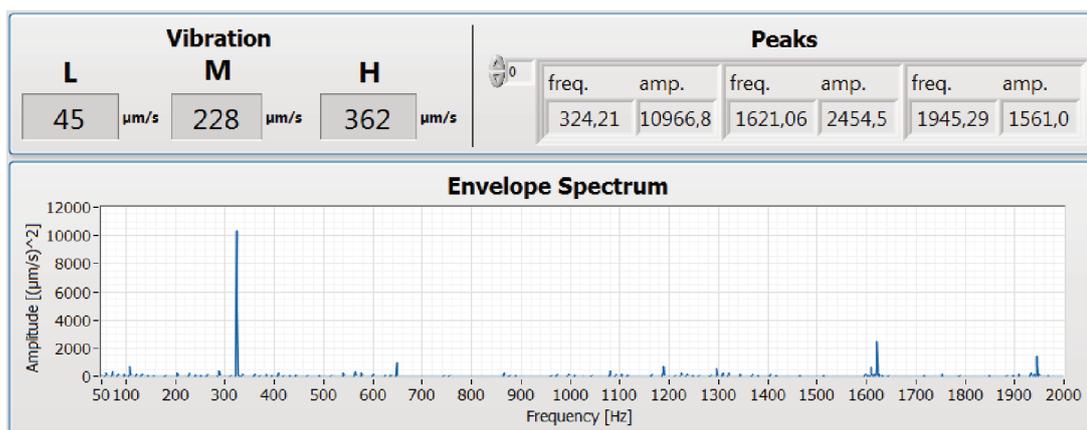


Figura 44 – Resultado da análise de vibração nas bandas baixa, média e alta, técnica do envelope e picos no espectro do envelope para a amostra 8.

foram semelhantes aos calculados, sendo  $45 \mu\text{m/s}$  para a banda baixa,  $228 \mu\text{m/s}$  para a banda média e  $362 \mu\text{m/s}$  para a banda alta. Tanto a banda média quanto a banda alta apresentaram valores muito acima do limite definido na norma utilizada, indicando grave problema de qualidade no rolamento.

## 5 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo estudar o anderômetro e implementar técnicas de identificação e classificação de falhas em rolamentos com base no sinal gerado por esse equipamento. Foram estudados os principais tipos de falhas e métodos de detecção utilizando técnicas nos domínios do tempo e da frequência.

Na pesquisa realizada foi verificada a possibilidade de se obter níveis de vibração RMS compatíveis com os disponíveis no anderômetro e, assim, automatizar a leitura desses valores. As técnicas no domínio do tempo se mostraram eficazes para indicar o nível de vibração em diferentes bandas de frequência, que são utilizadas para indicar a existência de defeitos em rolamentos. A limitação desses parâmetros é a impossibilidade de caracterizar os defeitos encontrados.

Com relação às técnicas no domínio da frequência, verificou-se que essas permitem caracterizar os padrões de defeitos, mesmo para falhas em estágios iniciais. A técnica do envelope foi escolhida, pois permite extrair as frequências características do sinal de vibração. A partir da identificação dessas frequências é possível identificar não somente a existência de falhas, mas também suas possíveis causas por meio da comparação direta dos resultados com as frequências características de defeito de rolamentos, as quais são calculadas em função de sua geometria.

Por meio do estudo e revisão bibliográfica realizados ao longo deste trabalho, foram adquiridos conhecimentos que possibilitaram a aquisição dos sinais disponíveis no anderômetro e implementação de técnicas de identificação e classificação de falhas no domínio do tempo e da frequência. A implementação dessas técnicas foi realizada por meio do desenvolvimento de um programa utilizando o *software* LabVIEW. Com o objetivo de validar o programa desenvolvido, foram realizados ensaios utilizando rolamentos com defeitos previamente conhecidos e identificados pelo inspetor de qualidade da empresa WEG Motores. Os sinais coletados a partir de oito rolamentos foram processados por meio das técnicas implementadas. Os resultados obtidos por meio do sistema desenvolvido foram bastante satisfatórios, pois foi possível identificar a existência de defeitos, mesmo em estágios iniciais, e sua localização no rolamento.

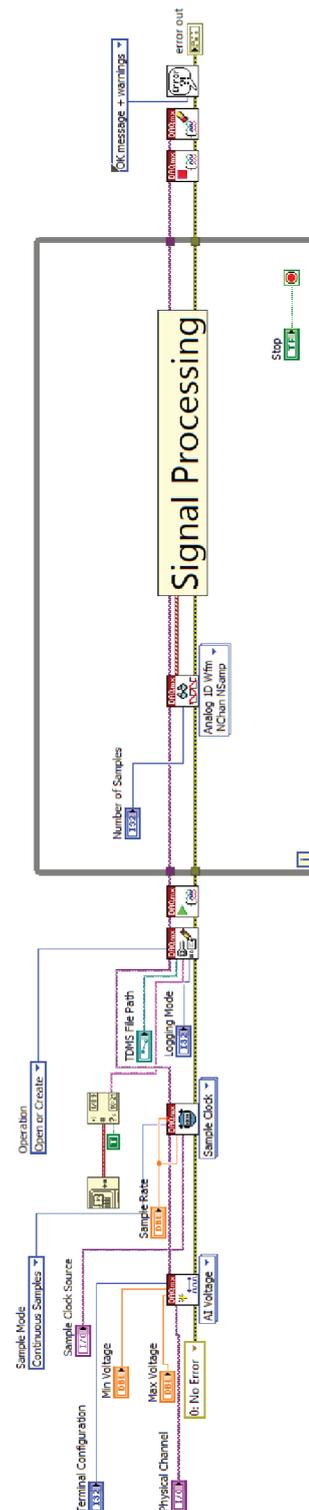
Como tema para trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de um sistema computacional que automatize o processo de classificação de falhas a partir dos resultados provenientes do *software* desenvolvido no presente trabalho. A integração desses dois sistemas possibilitará a construção de um dispositivo de ensaios automáticos, reduzindo a carga de trabalho envolvida e aumentando a confiabilidade do processo de inspeção de qualidade dos rolamentos.

# Referências Bibliográficas

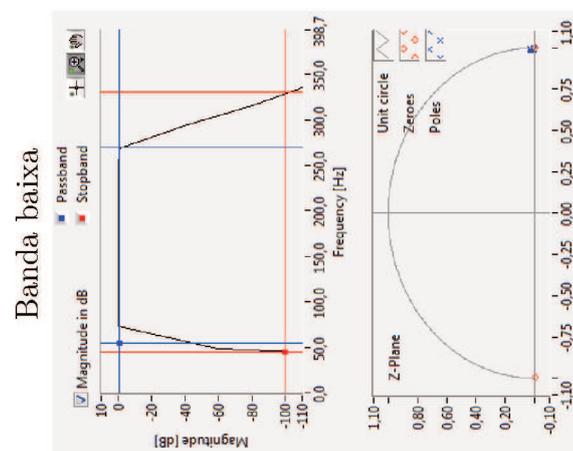
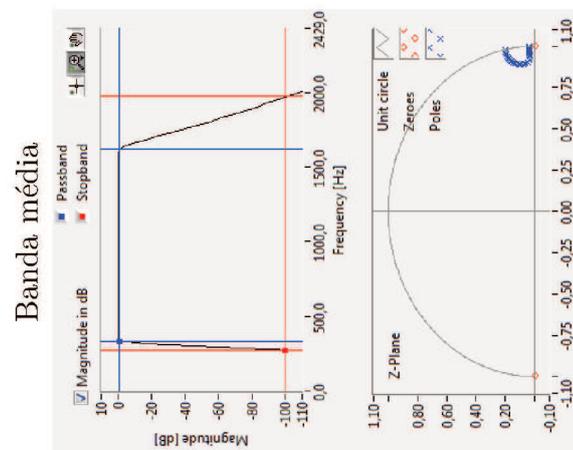
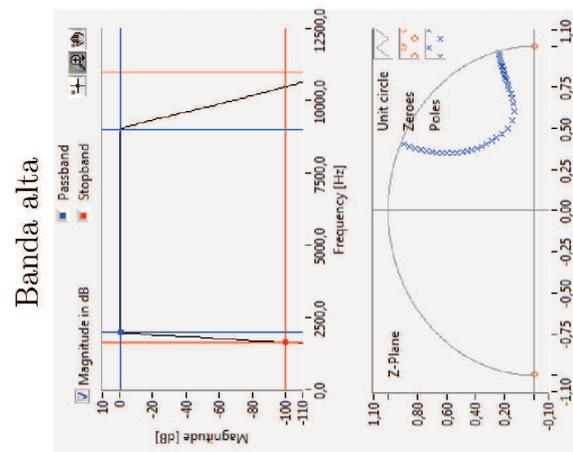
- 1 GUPTA, S. A safety device for metal rolling mill bearings in small scale industry. *Journal of the Institution of Engineers(India), Part MC, Mechanical Engineering Division*, v. 88, p. 3–7, 2007.
- 2 KIM, J. O.; CHUN, H. Y. Interaction between the torsional vibration of a circular rod and an adjacent viscous fluid. *Journal of vibration and acoustics*, American Society of Mechanical Engineers, v. 125, n. 1, p. 39–45, 2003.
- 3 FERRERO, A.; SALICONE, S. Fully comprehensive mathematical approach to the expression of uncertainty in measurement. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, IEEE, v. 55, n. 3, p. 706–712, 2006.
- 4 FERRERO, A.; SALICONE, S. An easy vi program to detect transient disturbances in the supply voltage. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, IEEE, v. 54, n. 4, p. 1471–1474, 2005.
- 5 BILSKI, P.; WINIECKI, W. Virtual spectrum analyzer based on data acquisition card. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, IEEE, v. 51, n. 1, p. 82–87, 2002.
- 6 HUANG, H.-P.; LEE, M.-W.; TSAI, C.-Y. Structure identification for block-oriented nonlinear models using relay feedback tests. *Journal of chemical engineering of Japan*, The Society of Chemical Engineers, Japan, v. 34, n. 6, p. 748–756, 2001.
- 7 VOLKER, E.; MARTIN, H. Early detection of damage in rolling bearings. *ISA Trans*, v. 23, n. 3, p. 27–32, 1984.
- 8 WASHO, M. W. A quick method for determining root causes and corrective actions of failed ball bearings. *Lubrication engineering*, Society of Tribologists and Lubrication Engineers, v. 52, n. 3, p. 206–213, 1996.
- 9 NSK. Nsk bearing doctor, diagnóstico rápido de ocorrências em rolamentos. NSK, 2001.
- 10 CHOUDHURY, A.; TANDON, N. A theoretical model to predict vibration response of rolling bearings to distributed defects under radial load. *Journal of vibration and acoustics*, American Society of Mechanical Engineers, v. 120, n. 1, p. 214–220, 1998.
- 11 MEYER, L.; AHLGREN, F.; WEICHBRODT, B. An analytic model for ball bearing vibrations to predict vibration response to distributed defects. *Journal of Mechanical Design*, American Society of Mechanical Engineers, v. 102, n. 2, p. 205–210, 1980.
- 12 SUNNERSJÖ, C. Rolling bearing vibrations—the effects of geometrical imperfections and wear. *Journal of sound and vibration*, Elsevier, v. 98, n. 4, p. 455–474, 1985.
- 13 MCFADDEN, P.; SMITH, J. Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing. *Journal of sound and vibration*, Elsevier, v. 96, n. 1, p. 69–82, 1984.

- 14 BEZERRA, R. d. A. *Detecção de Falhas em Rolamentos por Análise de Vibração, 2004. 152 f.* Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2004.
- 15 ALFREDSON, R.; MATHEW, J. Time domain methods for monitoring the condition of rolling element bearings. *NASA STI/Recon Technical Report A*, v. 86, p. 102–107, 1985.
- 16 SAWALHI, N.; RANDALL, R. et al. Simulation of vibrations produced by localised faults in rolling elements of bearings in gearboxes. In: ENGINEERS AUSTRALIA. *Proceedings of the 5th Australasian Congress on Applied Mechanics*. [S.l.], 2007. p. 496.
- 17 BARILLI, R. J. de C. *Análise de Falhas em Mancais de Rolamento Utilizando a Técnica do Envelope*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2013.
- 18 BONNARDOT, F. et al. Enhanced unsupervised noise cancellation using angular resampling for planetary bearing fault diagnosis. *International journal of acoustics and vibration*, v. 9, n. 2, p. 51–60, 2004.
- 19 MENDEL, E. et al. Rolling element bearing fault diagnosis in rotating machines of oil extraction rigs. In: IEEE. *2009 17th European Signal Processing Conference*. [S.l.], 2009. p. 1602–1606.
- 20 BEARING Vibration Tester - Anderon Meter. Sugawara Laboratories Inc., 2019. Disponível em: <[https://www.sugawara-labs.co.jp/en/bearings/anderon/bearing\\_vibration\\_tester\\_anderon\\_meter](https://www.sugawara-labs.co.jp/en/bearings/anderon/bearing_vibration_tester_anderon_meter)>.
- 21 BVT-1A Bearing vibration tester. Hangzhou Bearing Test & Research Center Co., 2019. Disponível em: <<http://en.hzbrc.com/product/23.html>>.
- 22 DSO1000 Series. Qingdao Hantek Electronic Co., 2019. Disponível em: <[http://www.hantek.com/en/productdetail\\_1\\_19.html](http://www.hantek.com/en/productdetail_1_19.html)>.
- 23 NI-9229. National Instruments, 2019. Disponível em: <<http://www.ni.com/pt-br/support/model.ni-9229.html>>.
- 24 CDAQ-9174. National Instruments, 2019. Disponível em: <<http://www.ni.com/pt-br/support/model.cdaq-9174.html>>.
- 25 OLIVEIRA, R. J. G. d. Implementação de técnicas de processamento de sinais para o monitoramento da condição de mancais de rolamento. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2005.

# A Diagrama de Blocos em LabVIEW para aquisição dos sinais



## B Resposta em frequência e localização dos polos e zeros dos filtros projetados



# C Interface do programa desenvolvido em LabVIEW

