

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE SÃO PAULO
CAMPUS SÃO PAULO
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GIOVANI FONSECA RAVAGNANI DISPERATI

**Monitoramento de danos em rolamentos por análise de vibração com
utilização de sensor filme PVDF**

São Paulo

2022

GIOVANI FONSECA RAVAGNANI DISPERATI

**Monitoramento de danos em rolamentos por análise de vibração com
utilização de sensor filme PVDF**

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus São Paulo como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Wilson Carlos da Silva Junior

Coorientadora: Profa. Dra. Vanessa Seriacopi

São Paulo

2022

Agradecimentos

Agradeço ao Programa de Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo pela oportunidade de desenvolver este trabalho, bem como pelo apoio de todos os docentes e colegas discentes que foram parte, de alguma forma, da realização do mesmo.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Wilson Carlos da Silva Junior, bem como à minha coorientadora, Profa. Dra. Vanessa Seriacopi, por todo o conhecimento, paciência e valorosos encaminhamentos em todas as etapas deste projeto.

Ao Prof. Dr. Rene Ramos de Oliveira

Ao Prof. Me. Rogério Daniel Dantas, por toda a ajuda prestada com seu grande arcabouço de conhecimentos técnicos e metodológicos.

Ao Sr. Lucas Willenshofer, que sempre esteve disposto a fornecer grande ajuda em todo o processo de desenvolvimento e construção dos aparelhos experimentais.

Ao Sr. Victor Hugo Deuner, por suas inestimáveis contribuições e enorme disposição em nos auxiliar com sua sabedoria, sem o qual este projeto não seria possível.

Resumo

O fluoreto de polivinilideno, conhecido pela sigla PVDF, é um polímero com características piezo e piroelétricas, além de alta estabilidade e resistência química e física que, aliadas ao fácil processamento desse material, o tornam um excelente elemento para uso tecnológico. PVDF é um material semicristalino flexível, de baixo custo de fabricação e fácil de usinar. Seu uso passa por diversas aplicações, desde sensores até a construção de tubos e dutos para o transporte de água ultrapura. Sua cristalização ocorre em pelo menos quatro fases distintas, alfa, beta, gama e delta, sendo que a fase beta é caracterizada por apresentar os comportamentos piezo e piroelétricos já mencionados. Dadas estas características, trabalhos têm sido desenvolvidos utilizando filmes feitos deste material como sensores para manutenção preditiva baseada em análise de vibração. O tema deste trabalho surge da proposta de avaliar o filme PVDF como um sensor aplicado na detecção de falhas em mancais de rolamentos, um dos elementos de máquina mais comuns, uma vez que o PVDF possui características que o tornam candidato a ser uma alternativa aos sensores habitualmente utilizados para este fim. O PVDF tem menor custo em relação a estes e, portanto, o componente econômico é a motivação para esta investigação. O objetivo deste trabalho é adquirir um sinal de vibração utilizando um sensor PVDF, para que seja realizada a detecção de falhas em mancais em um software supervisório com aplicações de manutenção preditiva. Com base nos sinais captados deste sensor, será possível avaliar a viabilidade de um sistema de sensor PVDF para monitoramento das condições dos mancais. Para tanto, foi construída uma bancada experimental na qual o sensor PVDF é acoplado aos mancais escolhidos como objeto de estudo. Um circuito também foi construído para condicionar e amplificar o sinal de saída do sensor, de forma que ele possa ser capturado por um sistema de aquisição de dados. A partir desta saída espera-se encontrar o melhor posicionamento do sensor para capturar os sinais de falha, a fim de diferenciar os sinais de um rolamento autocompensador de rolos com as seguintes falhas: desgaste da pista do anel externo e desgaste no elemento rotativo. Espera-se que isso culmine na possibilidade de determinar um nível de alarme indicativo de uma situação de pré-falha.

Palavras-chaves: Manutenção preditiva. Rolamentos. Análise de vibração. PVDF.

Abstract

Polyvinylidene fluoride, known by the acronym PVDF, is a polymer with piezo and pyroelectric characteristics, in addition to high chemical and physical stability and resistance that, combined with the easy processing of this material, make it an excellent element for technological use. PVDF is a flexible semi-crystalline material, low in manufacturing cost and easy to machine. Its use goes through a variety of applications, from sensors to the construction of pipes and ducts for the transport of ultrapure water. Its crystallization occurs in at least four distinct phases, alpha, beta, gamma and delta, and the beta phase is characterized by having the aforementioned piezo and pyroelectric behaviors. Given these characteristics, works have been developed using films made of this material as sensors for predictive maintenance based on vibration analysis. The theme of this work arises from the proposal to evaluate the PVDF film as a sensor applied in the detection of failures in bearing housings, one of the most common machine elements, since the PVDF has characteristics that make it a candidate to be an alternative to the ceramic sensors customarily used for this purpose. The PVDF also has a much lower cost compared to them and this economic component, therefore, is the motivation for this investigation. The objective of this work is to acquire a vibration signal using a PVDF sensor, so that the detection of bearing failures in a supervisory software with predictive maintenance applications is performed. Based on the signals captured from this sensor, it will be possible to assess the viability of a PVDF sensor system for monitoring bearing conditions. For this purpose, an experimental bench was built in which the PVDF sensor is coupled to the bearings chosen as the object of study. A circuit was also built-in order to condition and amplify the sensor's output signal, so that it can be captured by a data acquisition system. From this output it is expected to find the best positioning of the sensor to capture the failure signals, in order to differentiate signals from a spherical roller bearing with the following failures: wear of the inner ring raceway, wear on the outer ring raceway and wear on the rolling element. It is expected that this culminates in the possibility of determining an alarm level indicative of a pre-failure situation.

Keywords: Predictive Maintenance. Bearings. Vibration analysis. PVDF.

Lista de figuras

Figura 1 – a) Componentes de um rolamento. (b) Dimensões do rolamento.	26
Figura 2 – a) Processo de fabricação dos anéis internos e externos.	28
Figura 3 – Anéis internos de rolamentos apresentando escamamento.	31
Figura 4 – Pista de rolamento com descascamento.	32
Figura 5 – Rolamentos com amassados e arranhaduras.	32
Figura 6 – Aneís interno e externo com danos por escorregamento.	33
Figura 7 – Anéis internos e anel externo com fraturas.	33
Figura 8 – Rolamento com lasca e trincas.	34
Figura 9 – Gaiolas danificadas.	34
Figura 10 – Anel interno e rolos com impressões.	35
Figura 11 – Anel interno e esfera com <i>pitting</i>	35
Figura 12 – Anel interno e externo com desgaste.	36
Figura 13 – Rolamentos com corrosão por contato.	36
Figura 14 – Pistas com esmagamento.	37
Figura 15 – Deformação de deslizamento.	37
Figura 16 – Dano causado superaquecimento.	38
Figura 17 – Corrosão eletrolítica em rolamentos.	38
Figura 18 – Rolamentos com oxidações e corrosões.	39
Figura 19 – Rolamentos com falhas de instalação.	39
Figura 20 – Manchas e descoloração em rolamentos.	40
Figura 21 – Causas de defeitos em rolamentos.	41
Figura 22 – Representação dos níveis de um sinal harmônico.	46
Figura 23 – Relação entre os valores de Pico e RMS com o desgaste progressivo de rolamentos.	47
Figura 24 – Fator de Crista no tempo.	47
Figura 25 – Exemplo de ressonância com decaimento exponencial ocorrendo perio- dicamente na frequência de falha.	49
Figura 26 – Exemplo de sinal AM e FFT de seu Envelope.	50
Figura 27 – Padrões de sinais de vibração gerados a partir de danos em diferentes componentes dos rolamentos.	51

Figura 28 – Comparação de espectros de vibração de um rolamento em bom estado e de um rolamento defeituoso. O sinal de cima representa o rolamento em bom estado e o sinal debaixo, o rolamento defeituoso. A faixa destacada mostra a região de dano, explicitando as diferenças entre ambos.	52
Figura 29 – Sinal temporal do rolamento com dano introduzido.	52
Figura 30 – Envelope do sinal temporal do rolamento com dano introduzido.	53
Figura 31 – Espectro do envelope do sinal temporal do rolamento com dano introduzido.	53
Figura 32 – Análise de Envelope com etapas de pré-processamento do sinal.	55
Figura 33 – Exemplo de dano no primeiro estágio de falha de um rolamento.	56
Figura 34 – Primeiro estágio de defeito no rolamento.	56
Figura 35 – Segundo estágio de defeito no rolamento.	57
Figura 36 – Pista externa em segundo estágio de defeito no rolamento.	57
Figura 37 – Terceiro estágio de defeito no rolamento.	58
Figura 38 – Quarto estágio de defeito no rolamento.	58
Figura 39 – Estrutura molecular do PVDF	60
Figura 40 – Rolamento autocompensador de rolos. Retirado de NSK, 2018.	67
Figura 41 – Rolamento autocompensador de rolos. Retirado de NSK, 2018.	68
Figura 42 – Ângulo de contato calculado a partir do modelo CAD disponibilizado pela NSK.	69
Figura 43 – Diâmetro do elemento rolante calculado a partir do modelo CAD disponibilizado pela NSK.	69
Figura 44 – Projeto da bancada experimental.	70
Figura 45 – Projeto da bancada experimental visto lateralmente.	71
Figura 46 – Bancada experimental em fase inicial de construção.	71
Figura 47 – Bancada experimental finalizada.	72
Figura 48 – Isoamortecedor afixado à bancada.	73
Figura 49 – Eixo com acoplamento.	73
Figura 50 – Medição de rotação com partida direta.	74
Figura 51 – Painel de controle da bancada experimental.	75
Figura 52 – Inversor de frequências e instalação elétrica do painel da bancada experimental.	76
Figura 53 – Versão final da bancada experimental.	77

Figura 54 – Sensor de vibração piezoelétrico.	79
Figura 55 – Encapsulamento de alumínio com amplificador operacional e sensor filme PVDF.	81
Figura 56 – Sensor de vibração piezoelétrico no encapsulamento de alumínio.	81
Figura 57 – Circuito amplificador operacional do sensor piezoelétrico.	82
Figura 58 – Processo de teste do circuito rejeita-faixa para filtragem dos 60 Hz da rede. O circuito rejeita-faixa é indicado pela seta vermelha.	83
Figura 59 – Circuito rejeita-faixa para filtragem dos 60 Hz da rede.	83
Figura 60 – Comparaçāo do sinal filtrado com o sinal não-filtrado, com a bancada desligada.	84
Figura 61 – Comparaçāo do sinal do sensor filtrado com o sinal não-filtrado, com bancada conectada à energia elétrica.	85
Figura 62 – Sensor acelerômetro conectado ao equipamento de captura dos dados. .	86
Figura 63 – DAQ USB 6212. Retirado de National Instruments, 2021.	87
Figura 64 – Sistema de aquisição desenvolvido com LabView.	87
Figura 65 – Dano introduzido no elemento rolante. A seta vermelha aponta o elemento rolante onde o dano foi inserido.	90
Figura 66 – Processo de inserção do dano na pista externa.	91
Figura 67 – Pista externa com dano inserido. A seta vermelha aponta o furo realizado na pista externa.	92
Figura 68 – Sinal temporal do motorredutor sob rotação de 61,3 RPM.	94
Figura 69 – Espectro de frequências do motorredutor sob rotação de 61,3 RPM. .	95
Figura 70 – Sinal temporal do rolamento em bom estado sob rotação de 61,3 RPM. .	96
Figura 71 – Espectro de frequências do rolamento em bom estado sob rotação de 61,3 RPM.	97
Figura 72 – Sinal temporal do rolamento com dano no elemento rolante sob rotação de 61,3 RPM.	98
Figura 73 – Sinal espectral do rolamento com dano no elemento rolante sob rotação de 61,3 RPM.	99
Figura 74 – Sinal espectral demodulado do rolamento com dano no elemento rolante.	100
Figura 75 – Sinal temporal do rolamento com dano na pista externa.	101
Figura 76 – Sinal espectral demodulado do rolamento com dano na pista externa. .	102

Figura 77 – Indicações das harmônicas no sinal espectral demodulado do rolamento com dano na pista externa.	103
Figura 78 – Sinal temporal da bancada desconectada da energia elétrica.	104
Figura 79 – Espectro do sinal da bancada desconectada da energia elétrica.	105
Figura 80 – Sinal temporal da bancada conectada à energia elétrica.	106
Figura 81 – Espectro de densidade de potência da bancada conectada à energia elétrica.	107
Figura 82 – Sinal temporal da bancada conectada à energia elétrica e energizada. .	108
Figura 83 – Espectro de densidade de potência da bancada conectada à energia elétrica e energizada.	109
Figura 84 – Sinal temporal do motorredutor.	110
Figura 85 – Espectro de densidade de potência do motorredutor.	111
Figura 86 – Sinal temporal do rolamento em bom estado.	112
Figura 87 – Espectro de densidade de potência do rolamento em bom estado. . .	113
Figura 88 – Sinal temporal do rolamento com dano no elemento rolante.	114
Figura 89 – Espectro de densidade de potência do rolamento com dano no elemento rolante	115
Figura 90 – Curtose espectral para diferentes janelas no rolamento com dano no elemento rolante.	116
Figura 91 – Envelope do sinal do rolamento com dano no elemento rolante	117
Figura 92 – Microcontrolador STM32F103. Retirado de ST, 2021.	126

Lista de tabelas

Tabela 1 – Cenários de caracterização dos sinais.	89
Tabela 2 – Caracterização do ruído elétrico capturado pelo sistema	109

Lista de abreviaturas e siglas

BPFI	Ball Pass Frequency Inner Race
BPFO	Ball Pass Frequency Outer Race
BSF	Ball Spin Frequency
DAQ	Data Acquisition
FFT	Fast Fourier Transform
PSD	Power Spectral Density
PVDF	Fluoreto de Polivinilideno

Lista de símbolos

α	Letra Alfa, indicando fase cristalina Alfa do PVDF
β	Letra Beta, indicando fase cristalina Beta do PVDF
γ	Letra Gama, indicando fase cristalina Gama do PVDF
δ	Letra Delta, indicando cristalina fase Delta do PVDF
θ	Letra Teta, indicando ângulo de contato dos elementos rolantes
μ	Letra Mi, indicando momento dipolar
σ	Letra Sigma, indicando desvio-padrão
ϕ	Letra Phi maiúscula, indicando fase inicial
ω	Letra Omega, indicando velocidade angular
m	Metro
μm	Micrometro
\in	Pertence

Sumário

1	Introdução	15
2	Objetivos	18
2.1	Geral	18
2.2	Específicos	18
3	Estado da arte	19
3.1	Aplicações do Fluroreto de Polivinilideno como sensor de vibração	19
4	Revisão Bibliográfica	23
4.1	Manutenção	23
4.1.1	Manutenção preditiva	24
4.2	Fundamentos e aplicações de rolamentos	26
4.2.1	Tipos de rolamentos	27
4.2.2	Processos de fabricação de rolamentos	27
4.2.3	Carga e vida útil de rolamentos	29
4.2.4	Falhas em rolamentos	30
4.2.5	Principais causas de defeitos em rolamentos	40
4.3	Análise de vibrações	42
4.3.1	Frequências características de defeitos e detecção de falhas em rolamentos	44
4.3.2	Detecção de falhas em rolamentos por análise de vibração	45
4.3.3	Análise de envelope do sinal	49
4.3.4	Estágios de falhas em rolamentos	55
4.4	Fluroreto de polivinilideno	60
4.5	Sistemas de aquisição de dados	64
4.5.1	Condicionamento de Sinal	64
4.5.2	DAQ - Data Acquisition	65
5	Materiais e métodos	67
5.1	Rolamentos autocompensadores de rolos	67

5.2	Bancada experimental	70
5.3	Cálculo das frequências esperadas	77
5.4	Filme PVDF e circuitos condicionadores de sinal	79
5.5	Aquisição dos dados	86
5.6	Métodos de análise dos dados	88
5.7	Definição dos experimentos	88
6	Resultados	93
6.1	Caso 1 - caracterização dos sinais de falha com utilização de sensor acelerômetro	93
6.1.1	Motorredutor	93
6.1.2	Rolamento em bom estado	95
6.1.3	Falha no elemento rolante	97
6.1.4	Falha na pista externa	100
6.2	Caso 1 - caracterização do sinal do sensor PVDF	104
6.3	Caso 2.1 - caracterização do sinal do motorredutor com sensor PVDF	110
6.4	Caso 3 - caracterização do sinal do rolamento em bom estado	112
6.5	Caso 4 - caracterização do sinal e identificação da frequência característica de defeitos no rolamento com dano no elemento rolante	114
6.6	Caso 5 – caracterização do sinal e identificação da frequência característica de defeitos no rolamento com dano na pista externa	117
6.7	Comparação dos resultados obtidos pelo sensor PVDF e pelo sensor acelerômetro	117
7	Comparação dos custos dos sistemas	118
8	Conclusões	119
	Referências¹	121

¹ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

Apêndice A – Programa para aquisição de dados na plataforma LabView	125
Apêndice B – Programa para aquisição de dados com micro- controlador STM32	126
Apêndice C – Programas para análise dos sinais dos rolamentos	127
Apêndice D – Cálculo do isoamortecedor	132

1 Introdução

De acordo com a Confederação Nacional das Indústrias, o setor industrial representava, em outubro de 2019, 21,6% do produto interno bruto do Brasil. Também respondia por 70,8% das exportações nacionais, 67,4% dos investimentos empresariais em pesquisa e 34,2% dos tributos federais, excetuando-se receitas previdenciárias (CNI, 2019).

Nesse âmbito destaca-se, portanto, a importância da manutenção como ferramenta econômica para a indústria e, consequentemente, para a economia nacional. Processos de manutenção preventiva, ou de manutenção preditiva, têm por finalidade mitigar a ocorrência de falhas catastróficas, diminuindo perdas econômicas por paradas inesperadas ou, mesmo, por custos de seguridade social decorrentes de acidentes de trabalho causados por maquinário defeituoso.

De acordo com a NBR 5462, a manutenção preventiva é uma "manutenção efetuada em intervalos pré-determinados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item" (NBR 5462, p. 7). Já a manutenção preditiva, é definida como uma manutenção que "permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva" (NBR 5462, p. 7).

Para que o processo de manutenção preditiva possa ocorrer é necessário, como estabelecido pela NBR 5462, a aplicação sistemática de técnicas de análise. Para tanto, a coleta de informações relativas ao estado dos elementos de máquina é pré-requisito, sendo, para isso, utilizada uma vasta gama de sensores com diferentes propósitos e especificidades a fim de aferir os mais distintos parâmetros desses elementos.

Dentre os diversos elementos de máquina um dos mais comuns são os rolamentos, com utilização em virtualmente todas as áreas da indústria. Essa categoria de elemento de máquina, portanto, foi escolhida como objeto de testes e estudo a fim de verificar a viabilidade de uma tecnologia de sensores com finalidade, dentre outras, de manutenção preditiva: o filme de fluoreto de polivinilideno.

Tem-se vários tipos de polímeros, sendo os de maior interesse tecnológico os eletroativos, capazes de realizar a conversão entre energia elétrica e energia mecânica. Em outras palavras, esses polímeros apresentam alteração em seu tamanho e/ou forma

quando são sujeitos a um campo elétrico. Alguns materiais dentro dessa família apresentam também outro efeito: geram um sinal elétrico quando sujeitos a uma força. Devido a essas características, os polímeros eletroativos são ideais para a aplicação em sensores e atuadores, onde por sua baixa massa específica, substituem sistemas pesados e complexos, possibilitando projetos de novas aplicações devido a uma implementação e miniaturização mais simples (BAR-COHEN, 2002).

O fluoreto de polivinilideno, conhecido pela sigla PVDF, apresenta características piezo e piroelétricas, além de elevada estabilidade e resistência química e física que, combinadas ao fácil processamento desse material, o tornam um excelente elemento para utilização tecnológica. O PVDF é um material semicristalino flexível e de baixo custo de fabricação, de fácil usinagem, múltiplas aplicações e com grande resistência química (FUKADA, 2000; LANG, 2006). O PVDF foi descoberto em 1969 por Kawai, sendo um material novo com utilização perpassando uma variedade de campos que vão desde sensores para medição de vibrações mecânicas até a construção de canos e dutos para transporte de água ultrapura. A sua cristalização ocorre em pelo menos quatro fases distintas, α , β , γ e δ (SILVA, 2009). A fase β é caracterizada por possuir comportamento piezo e piroelétrico (WISNIEWSKI, 2002).

O tema deste trabalho surge da proposta de se avaliar o filme PVDF como sensor de vibração com finalidades de manutenção preditiva, em particular, aqui, aplicado a falhas de rolamentos, uma vez que esse sensor possui baixo custo, mostrando-se como possível alternativa aos acelerômetros cerâmicos costumeiramente utilizados para essa finalidade. O componente econômico, portanto, faz-se basilar neste trabalho.

Dadas essas características do material, o filme PVDF foi utilizado como sensor de vibração. Uma vez que a tensão de saída é proporcional à força mecânica aplicada é possível avaliar a severidade da vibração sofrida pelo rolamento e, assim, realizar-se a detecção de padrões que indiquem o comprometimento do elemento, bem como apontar qual o problema em potencial.

Essa tensão então, a partir de sua aquisição e conversão por um conversor analógico-digital, pode ser transmitida e seus dados armazenados por meio de um software de aquisição de dados, para que se realize posterior análise. Uma vez que o filme PVDF é de alta impedância e está sujeito a interferências por vibrações externas, sinais de alta frequência e outros fatores, bem como tende a possuir baixa voltagem de saída, é necessário o condicionamento desse sinal a circuito eletrônico específico para tanto.

Portanto, foi construído um encapsulamento para o sensor, bem como um circuito de condicionamento do sinal e um sistema de software para aquisição de dados a fim de promover a análise das informações capturadas pelo sensor durante os testes na bancada experimental, também construída para este trabalho. Tal bancada experimental foi construída com mancais de rolamentos de rolos, da empresa NSK, acoplados a um eixo em um motoredutor cedido pela empresa parceira WEG/Cestari. Além disso, foi desenvolvida revisão bibliográfica acerca do tema, bem como construídos softwares que implementam métodos de análise de falhas em rolamentos.

Buscou-se, assim, a partir dos experimentos e análise dos dados, uma resposta inicial quanto à viabilidade de utilização do filme PVDF como sensor de baixo custo para fins de manutenção preditiva.

2 Objetivos

2.1 Geral

Em relação aos objetivos do trabalho, visa-se, de forma geral, à aquisição de sinal de vibração, com a utilização de sensor PVDF, para que seja realizada a detecção de falhas em rolamentos em um sistema supervisor com aplicações de manutenção preditiva. A partir disso espera-se ser possível avaliar a viabilidade de um sistema de sensores PVDF para monitoramento das condições de rolamentos em maquinários, a fim de possibilitar uma alternativa mais barata em relação aos sensores atualmente utilizados para esse fim.

2.2 Específicos

Os objetivos específicos do trabalho podem ser summarizados em:

- Construir uma bancada experimental em que o sensor PVDF possa ser acoplado aos rolamentos escolhidos.
- Realizar o tratamento do sinal de saída do sensor, de forma a ser capturado por um sistema de aquisição de dados.
- Desenvolver um sistema de aquisição de dados para o sensor PVDF, quando trabalhando com sinais de falha de rolamento.
- Desenvolver um sistema de análise dos dados capturados.
- Diferenciar um sinal de falha de rolamento autocompensador de rolos, com as seguintes falhas: 1 - desgaste na pista do anel externo e 2 - desgaste no elemento rolante.
- Comparar o custo do sistema proposto com o de um sistema comercial atualmente disponível no mercado.

3 Estado da arte

O PVDF é um polímero semi-cristalino, que apresenta um elevado nível de coeficiente piezoelétrico e grande estabilidade química. Suas características mecânicas, químicas e elétricas são apresentadas com detalhes na seção 4.4 deste trabalho.

Dentre as diversas aplicações deste material, apresenta-se aqui o Estado da Arte quanto a utilização de sensores PVDF em aplicações de monitoramento e medições de vibração.

3.1 Aplicações do Fluroreto de Polivinilideno como sensor de vibração

Dentre as distintas aplicações do PVDF, uma revisão de literatura é desenvolvida com base em Xin et al., 2016, quanto ao seu uso como sensor de vibrações. Nesse trabalho são apresentadas aplicações para dispositivos médicos portáteis, monitoramento de saúde estrutural, monitoramento de maquinário, entre outras.

No que diz respeito à sua aplicação em dispositivos médicos portáteis, a utilização nesse segmento se dá pois a respiração e os batimentos cardíacos, de humanos e de animais, geram vibrações das superfícies corporais. Essas vibrações, em diversos casos, refletem as condições de saúde, podendo ser medidas por meio de sensores colocados na pele. Nesse sentido os sensores PVDF têm como vantagem sua flexibilidade, baixo custo e leveza, o que o torna bom candidato para a aplicação nesta área da saúde, o que tem levado pesquisadores a envidarem esforços em relação ao seu estudo e desenvolvimento (XIN et al., 2016).

Kim et al., 2006, desenvolveram um dispositivo de assistência pulmonar intravascular vibratória, utilizando um atuador de PZT, titanato zirconato de chumbo, e um sensor filme PVDF destinado a medir vibrações da membrana onde ajudar os pacientes que sofrem de problemas respiratórios crônicos.

Jee et al., 2011, desenvolveram um sistema de detecção de ronco através da utilização de dois sensores PVDF em um travesseiro. O primeiro sensor é posicionado na região da nuca e detecta os padrões de vibração gerados pelo ronco, enquanto o segundo é posicionado na parte superior do travesseiro, de forma a detectar ruídos provenientes de sons e vibrações ambientes. Após o processamento dos sinais, os autores concluem que

foi possível a remoção dos ruídos ambientes do sinal gerado pelo ronco, sendo a solução desenvolvida com o sensor PVDF adequada para tal aplicação.

Lee et al., 2012, compararam sinais cardíacos monitorados por sensores PVDF, microfone e ECG anexando o filme de PVDF, um microfone e eletrodos de referência do tipo Ag/AgCl a uma cama, posicionados na região do coração e caixa torácica. Os autores concluem que o PVDF demonstrou bom desempenho na medição de batimentos cardíacos.

Estes são alguns exemplos que demonstram a utilização das capacidades do PVDF, enquanto sensor de vibração, aplicado ao desenvolvimento tecnológico na área de dispositivos médicos.

Em relação ao PVDF como sensor aplicado a monitoramento de integridade estrutural, o PZT, titanato zirconato de chumbo, é o material mais comum para monitoramento de integridade de estruturas. Contudo, esse material é rígido e não pode ser aplicado em superfícies curvas (Xin et. al, 2016). Dessa característica decorrem os desenvolvimentos do PVDF como material alternativo, uma vez que ele pode ser uma resposta para aplicações específicas dada sua flexibilidade. Assim, o PVDF é estudado em aplicações de ensaios não destrutivos de detecção de emissão acústica, detecção precoce de danos em lâminas de turbina eólica, determinação da localização e severidade de danos sísmicos em estruturas de aço de edifícios, entre outras.

Neste sentido, Brown e Mason, 1996, demonstraram que o PVDF é sensível a impactos, podendo ser utilizados em aplicações de ensaios não-destrutivos de emissões acústicas, mas que as propriedades dielétricas e eletromecânicas apresentavam variação com temperatura, o que deveria ser considerado para tais aplicações de monitoramento de integridade estrutural.

Huh et al., 2011, realizaram experimentos da aplicação do sensor PVDF para detecção de danos, em estágio inicial, em pás de turbinas eólicas através da instalação da aplicação do filme PVDF, em conjunto com sensores do tipo extensômetros, na região de cisalhamento dos componentes de bordo de fuga. Os autores concluem que o sensor PVDF se mostrou efetivo para tal aplicação.

Kurata et al., 2013, desenvolveram uma aplicação envolvendo um conjunto de sensores PVDF, ligado em rede através de unidades de medição sem fio, a fim de medir danos decorrentes de terremotos, tais como encurvadura e fraturas, em construção do tipo *steel frame*. O sistema foi avaliado experimentalmente com uma estrutura de testes de

cinco andares, demonstrando excelente desempenho no monitoramento de deformação dinâmica sob variadas condições de carga e vibrações.

Quanto ao PVDF como sensor aplicado à medição de vibrações em maquinário, por sua vez, materiais cerâmicos, como o próprio PZT, costumam ser encontrados nessas aplicações por possuírem maior nível de atividade piezoelétrica. Benech et. al, 1996, entretanto, apresentaram os princípios e *design* da medição de vibrações com o sensor PVDF e concluíram que ele apresenta, nessa área, potencial de utilização em aplicações de baixo custo. Os autores afirmam que a vantagem desse sensor está em sua resistência em relação aos materiais cerâmicos, demonstrando também que o PVDF pode ser utilizado para medições de vibrações em que o custo fosse um parâmetro importante.

Jeon et al., 2011, acoplaram filmes PVDF em estruturas de alumínio e o testaram em um dispositivo *shaker*, ou agitador, aplicando excitações de varredura senoidal, demonstrando boa linearidade e performance na faixa de frequência entre 0 Hz até 5 kHz, o que torna este material bom candidato para uma série de aplicações industriais de monitoramento de máquinas.

Liu et. al, 2011, desenvolvem um circuito condicionador de sinal para o filme PVDF, baseado em amplificador operacional do tipo JFET e filtro rejeita-faixa na região dos 50 Hz, a fim de eliminar as componentes de ruído advindas da rede elétrica. Eles, então, acoplam o filme PVDF a um *shaker* e o submetem a uma vibração de 150 Hz, demonstrando que o sensor, em conjunto com o circuito condicionador, foi capaz de captar tal vibração. Os autores concluem que o sensor pode ser utilizado em testes de vibrações mecânicas.

Wan et al., 2011, exploram a possibilidade de utilização do PVDF como um acelerômetro para aplicações de baixa e ultra-baixa frequência. Os autores propõe uma nova estrutura de sensor, discutindo seu princípio de funcionamento e modelo matemático. Concluem que o método proposto pode melhorar a sensibilidade, precisão e desempenho do filme PVDF para tais aplicações, superando as interferências de aceleração no eixo vertical e melhorando o unilateralismo e estabilidade do mesmo.

Rastegari et. al, 2014, estudaram o desenvolvimento de um acelerômetro baseado no filme PVDF LTD0-028k, desenvolvendo, através da utilização de análise por elementos finitos, um modelo de viga em balanço em que o sensor encontrava-se afixado à base da mesma. Com a utilização de um motor desbalanceado os autores, então, compararam o sinal do acelerômetro PVDF com o de um sensor acelerômetro comercial. Os autores concluem que o acelerômetro desenvolvido apresentou bom desempenho, dado que ele

rastreou adequadamente os sinais gerados e que possui potencial de aplicação dado seu baixo custo.

Kern et al., 2016, fizeram um estudo comparando o filme PVDF com um acelerômetro microeletromecânico para aplicação de monitoramento de rolamentos de aplicação automotiva. Os autores aquisitaram os sinais de ambos sensores e fizeram a comparação entre eles, utilizando como ferramentas para análise do sinal os métodos de curtose, valor RMS e densidade espectral de potência. Após os ensaios, os autores chegaram à conclusão de que foi possível diferenciar com o sensor PVDF os sinais de um rolamento em bom estado para um rolamento com defeitos, ainda que apontem as interferências eletromagnéticas como um fator de inclusão de ruído no sinal quando comparado ao sensor microeletromecânico.

Baumgärtel et al., 2016, buscaram as características elétricas, de frequência e deriva térmica do filme PVDF a fim de verificar sua potencial utilidade como material para sensores de ruídos estruturais, bem como seus limites de aplicabilidade. Para tanto os autores testaram dez amostras de sensor filme pvdf em vinte e sete pontos entre 50 Hz e 2 kHz, repetindo vinte vezes cada medida a fim de garantir validade estatística. Os autores mostraram que a constante piezoelétrica e o módulo de elasticidade do material podem ser influenciados por variações de temperatura. Ainda assim, os autores concluíram que o PVDF possui potencial para ser um material central de novos sensores de monitoramento de ruídos estruturais, não apenas em pesquisas, mas também em aplicações industriais.

Hadas et al., 2020, fazem uma revisão sobre as possibilidades da utilização do PVDF na indústria 4.0. Os autores afirmam que a aplicação de material PVDF polimérico tem grande potencial para serem utilizados em aplicações da Indústria 4.0.

4 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo propõe-se uma revisão bibliográfica acerca dos principais conceitos abordados neste trabalho, a saber: fundamentos da manutenção; fundamentos, aplicações e revisão de falhas de mancais de rolamentos; fundamentos de análise de vibrações; fundamentos do PVDF e suas aplicações.

Esse tópicos embasam o posterior desenvolvimento do trabalho e os experimentos que serão apresentados nos capítulos seguintes.

4.1 Manutenção

Todo e qualquer meio no qual se pretenda fabricar alguma coisa demanda recursos que permitam essa produção. Tais recursos podem variar desde instrumentos simples, como tesouras, agulhas e novelos de lã, até maquinário industrial de alta complexidade. Em qualquer desses casos sempre surgem as questões de desgaste, avarias, quebras e fraturas, dentre outros possíveis problemas. Portanto, em toda atividade produtiva há necessidade de manutenção, sem a qual a produção colapsa (NEPOMUCENO, 1989).

Usualmente classifica-se a manutenção em três formas distintas: corretiva, preventiva e preditiva (HOLANDA, 2016).

A manutenção corretiva, também conhecida por manutenção reativa, diz respeito à prática correspondente à primeira geração das técnicas de manutenção. A manutenção corretiva foi utilizada desde as primeiras indústrias até, aproximadamente, o final dos anos 40 do século XX – período em que a indústria era pouco mecanizada e com maquinário comparativamente mais simples. Seu princípio é a utilização do equipamento até sua quebra, sendo apenas então realizado o reparo (HOLANDA, 2016).

Entretanto, ainda de acordo com Holanda, 2016, esse tipo de manutenção não elimina a possibilidade de falhas inesperadas.

Assim, faz-se necessária uma forma de manutenção que particularize cada máquina, de forma a avaliar sistematicamente suas condições. Isto começa a ocorrer nos anos 70 do século XX, com os avanços da automação e elevação das exigências de confiabilidade e disponibilidade. A esse método de manutenção chama-se de manutenção preditiva. (HOLANDA, 2016).

4.1.1 Manutenção preditiva

Para Nepomuceno, 1989, a manutenção preditiva tem por finalidade permitir que sejam adotadas medidas de forma a evitar estragos ou situações catastróficas. Para tanto, é necessário o estabelecimento, em função de cada tipo de máquina, de quais são os parâmetros que devem ser escolhidos para monitoramento. Assim, com base na análise dessas informações de determinado componente, podem-se ter subsídios para que sejam tomadas tais medidas.

Nesse sentido, segundo Slack, 2008, a manutenção preditiva visa a que se realize o processo de manutenção apenas quando for necessário para as instalações.

Ainda de acordo com Nepomuceno, 1989, quando se estuda a manutenção preditiva, em uma análise superficial, parece demasiadamente dispendiosa. Há a evidente necessidade de medição e análise de diversos parâmetros e, para tanto, são necessários instrumentos de análise e medição, além de alteração de processos convencionais de medição e controle da condição do maquinário. Entretanto, analisando mais detalhadamente essa questão percebe-se que a manutenção preditiva apresenta vantagens que a tornam economicamente viável. Entre outras, citam-se:

- Reparos tornam-se menos custosos que uma quebra de maquinário e consequente interrupção da produção;
- A rejeição é diminuída devido ao constante ajuste do equipamento, acarretando, portanto, em menor perda de materiais;
- Equipamentos reserva podem, em muitos casos, ser eliminados;
- Controle de peças e materiais sobressalentes, diminuindo sensivelmente os custos de estoque;
- Controle de componentes mais substituídos bem como de equipamentos que apresentam maior número de defeitos permitindo o rastreamento da origem dos problemas: se no material, equipamento ou operadores;
- Diminuição da ociosidade produtiva acarretada por falhas;
- Redução de 15% a 20% do custo global em comparação aos métodos clássicos de manutenção, quando computados os custos de peças, materiais e mão de obra;
- Diminuição sensível, ou mesmo eliminação, da manutenção corretiva;

Além desses argumentos Holanda, 2016, chama a atenção para o fato de a manutenção preditiva ter como benefício colateral a capacidade de determinação automática do Tempo Médio Entre Falhas, MTBF (*Mean Time Between Failures*). Segundo Holanda, 2016, o MTBF fornece subsídios para que se determine o tempo mais efetivo em termos de custo para substituição do maquinário. Evita-se, assim, a absorção de altos custos de manutenção, uma vez que uma vez que o MTBF atinge o ponto no qual custos de manutenção e operação excedem os de substituição, a mesma é realizada.

Para a condução de um processo de manutenção preditiva existem diferentes técnicas. Holanda, 2016, cita como as principais técnicas:

- termografia, técnica que, por meio de temperatura, realiza a formação de imagens térmicas para atuação no diagnóstico de falhas;
- análise de lubrificantes, técnica que verifica fatores que possam ser danosos à operação do equipamento por meio da análise de viscosidade, acidez, teor da água dentre outros;
- ultrassom, técnica que permite a detecção de descontinuidades internas por meio da propagação de ondas através do equipamento;
- líquido penetrante, técnica que possibilita a verificação de descontinuidades superficiais tais como: trincas, poros e dobras;
- análise de vibrações, técnica que permite o monitoramento do desenvolvimento de falhas em maquinário e peças através de medições de suas assinaturas vibracionais.

Cada elemento de máquina possui características particulares que influenciam os métodos de manutenção preditiva adotados. No caso dos mancais de rolamentos geram vibrações mesmo quando geometricamente perfeitos, uma vez que possuem um número finito de elementos rolantes a fim de suportar a carga. Ainda, quando ocorre um defeito em um dos componentes de um mancal de rolamentos, há aumento considerável nos níveis de vibração do mesmo (BARILLI, 2013).

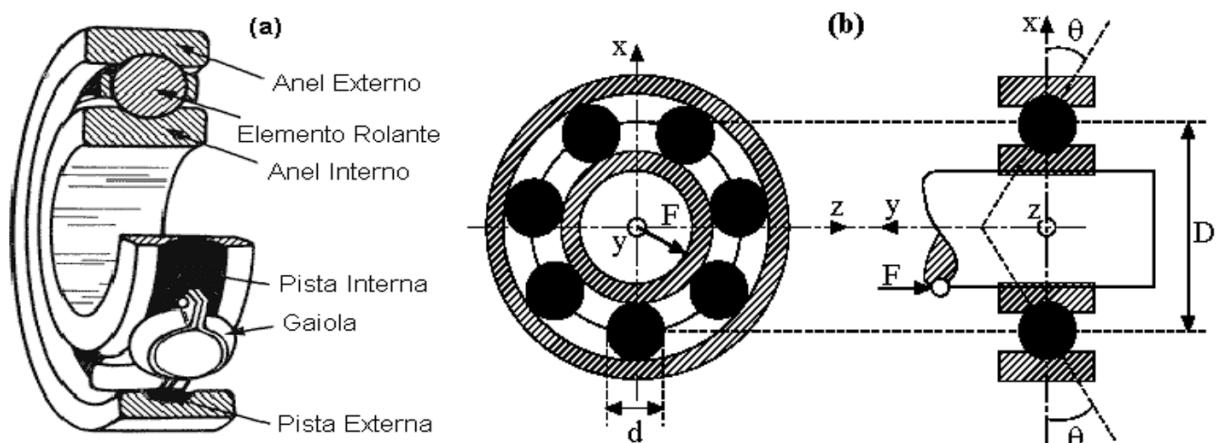
Assim, a manutenção preditiva baseada em análise de vibrações, aplicada a mancais de rolamentos, será abordada em maiores detalhes por se tratar da técnica escolhida dadas as características dos rolamentos, bem como do sensor objeto de estudo deste trabalho.

4.2 Fundamentos e aplicações de rolamentos

Rolamentos são dispositivos para transmissão de movimentos rotacionais ou lineares, com finalidade de redução de atrito entre partes móveis. Rolamentos são compostos, geralmente, de dois anéis, elementos rolantes e uma gaiola, sendo classificados como rolamentos radiais ou axiais, dependendo da direção da carga principal (NSK, 2018). Adicionalmente, os rolamentos são classificados, em função do tipo de elemento rolante, como rolamentos de esferas e rolamentos de rolos, que podem assumir forma cilíndrica, de agulhas ou cônicos, bem como são segregados quanto a seus propósitos específicos (NSK, 2018).

A Figura 1 demonstra os componentes de um rolamento de uma carreira de esferas e suas dimensões.

Figura 1 – a) Componentes de um rolamento. (b) Dimensões do rolamento.



Fonte: Mesquita et al. (2002)

Segundo a NSK (2018), rolamentos são um dos elementos de máquinas mais utilizados, visto que seu movimento rotacional torna demais movimentos mais fáceis e ajudam a reduzir fricção. Esses elementos têm dupla-função, realizando tanto a transferência de movimento, ou seja, guiando e suportando componentes que giram em relação um a outro, bem como a transmissão de forças.

Em comparação aos mancais de deslizamento, os rolamentos apresentam vantagens como: torque de partida e atrito baixos, com diferença entre torque de partida e torque de funcionamento pequenos; grande padronização internacional, facilitando sua substituição, entre outras (NSK, 2018).

A seguir apresenta-se uma revisão sobre tipos de rolamentos, suas principais características, propriedades e tipos de falhas.

4.2.1 Tipos de rolamentos

Os rolamentos, de forma semelhante às rodas, são componentes que podem rolar e que servem para redução de atrito entre eles e a superfície (ABECOM, 2019). Existem distintos tipos de rolamentos, dentre os quais citam-se:

- Rolamentos de rolos cilíndricos, constituídos por uma carreira de rolos em uma gaiola;
- Rolamentos de rolos cônicos, contrítudos por pistas de anel interno e externo, cônicas e rolos cônicos;
- Rolamentos autocompensadores, que possuem duas carreiras de esferas ou rolos com uma pista esférica comum no anel externo e duas pistas no anel interno;
- Rolamentos rígidos de esfera, que são rolamentos versáteis de concepção simples e tipo não separáveis;
- Rolamentos de esfera de contato angular, que possui pistas nos anéis interno e externo
- Rolamentos axiais de esferas, que são projetados para cargas axiais não devendo ser submetidos a cargas radiais

Cada tipo de rolamento possui suas aplicações e a escolha de rolamento depende de uma série de fatores específicos, tais como: a carga a ser suportada, a velocidade de funcionamento, temperatura de trabalho, folga interna, alinhamento e desalinhamento do eixo, espaço disponível, e outros.

4.2.2 Processos de fabricação de rolamentos

Nos rolamentos usualmente segregase o processo de fabricação em: fabricação dos anéis interno e externo; fabricação das esferas; fabricação das gaiolas e, por fim, montagem (SANTOS et al., 2017).

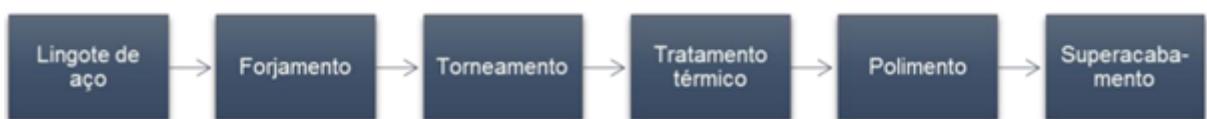
As esferas, ou rolos, são feitas a partir de barras de aço cortadas em comprimentos específicos. Um processo de forjamento dos fragmentos de barra confere às peças o formato desejado, mas ainda com rebarbas. É realizado, então, o desbaste dessas rebarbas. Após o

processo de desbaste as esferas passam por tratamento térmico de têmpera. Por fim, é realizado o polimento.

Os anéis interno e externo, por sua vez, são criados pelos mesmos processos, a saber: forjamento, torneamento, tratamento térmico, polimento e super acabamento. No primeiro processo, forjamento, os lingotes de aço são aquecidos e, por meio de prensagem, são formados os anéis interno e externo em cada movimento da prensa. Os processos ocorrem, portanto, simultaneamente e no mesmo equipamento. Após o forjamento, se dá o processo de torneamento. Neste, o torneamento do anel interno e externo se dá pelos mesmos passos. Primeiramente é torneada uma face lateral, a largura do anel. Em seguida, a outra face lateral é torneada. O próximo passo do processamento do anel é o torneamento do perfil da pista e largura. Simultaneamente é usinado o chanfro do anel. Em sequência ao processo de torneamento, se dá o tratamento térmico dos anéis por têmpera, que são aquecidos a temperaturas superiores aos 800 °C, bruscamente resfriados em óleo, reaquecidos em temperaturas de 150 °C e resfriados ao ar. Por fim, há o processo de acabamento quando processos abrasivos e de polimento são utilizados para atingir acabamento fino e exatidão de dimensão das peças (SANTOS et al., 2017).

A Figura 2 demonstra o fluxo de ordenação destes processos acima descritos.

Figura 2 – a) Processo de fabricação dos anéis internos e externos.



Fonte: Santos et al. (2017).

As gaiolas, por sua vez, são produzidas com lâminas de aço que recebem a forma de anéis planos por meio de estampagem, sendo, então, prensadas para receber forma ondulada a fim de manter as esferas na posição, feitos os furos para rebites e tratamento térmico da peça. (Dos Santos et al., 2017).

Com todas as partes produzidas é realizada, então, a montagem do rolamento. Primeiro, os anéis interno e externo são colocados concentricamente na linha de produção com as esferas preenchendo os espaços entre eles. O tamanho dos elementos rolantes se dá por cálculo a partir do diâmetro da ranhura do anel interno, que são, então, uniformemente organizados por um divisor e uma metade da gaiola é adicionada. Em sequência outra máquina adiciona a metade restante da gaiola e finaliza-se, assim, a montagem da peça. (SANTOS et al., 2017).

4.2.3 Carga e vida útil de rolamentos

A vida nominal básica de um rolamento está prevista na ISO 281:2007, que também especifica os métodos de cálculo de classificação de carga dinâmica básica. Em relação à classificação de carga dinâmica básica, C, esta é utilizada para cálculos que envolvem rolamentos dinamicamente tensionados (SKF, 2019). Tal classificação expressa a carga do rolamento que resultará em uma vida nominal básica, L_{10h} , de um milhão de revoluções (SKF, 2019). O valor de C é usualmente encontrado nos catálogos de referência das fabricantes.

Para a vida nominal básica temos na ISO 281:2007 que:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad (1)$$

Onde L_{10} é a vida nominal básica, com 90% de confiabilidade, expressa em milhões de revoluções; C é a classificação da carga dinâmica básica, em kN; P é a carga dinâmica equivalente do rolamento, em kN; e, por fim, p é o expoente da equação de vida, que é 3 para rolamentos de esferas e $\frac{10}{3}$ para rolamentos de rolos (SKF, 2019).

Se a velocidade for constante, por sua vez, torna-se preferível calcular a vida útil em horas de operação (SKF, 2019). Para tanto, utiliza-se :

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} L_{10} \quad (2)$$

Onde L_{10h} é a vida nominal básica, com 90% de confiabilidade, expressa em horas operacionais e n é a velocidade de rotação, em rotações por minuto. Para que se possa calcular a vida nominal básica de um rolamento usando as classificações de cargas dinâmicas básicas é necessário, entretanto, que essa seja convertida, primeiramente, em carga dinâmica equivalente do rolamento. A carga dinâmica equivalente do rolamento, P, é “definida como uma carga hipotética, com magnitude e direção constantes, que atua radialmente em rolamentos radiais e axial e centralmente em rolamentos axiais” (SKF, 2019). Essa carga hipotética teria influência na vida do rolamento igual às cargas reais as quais o rolamento é submetido.

Para os rolamentos híbridos, por sua vez, as mesmas vidas nominais podem ser utilizadas. Segundo a SKF, 2019, experiência e testes atestam que a vida útil de um rolamento híbrido é maior que a vida útil de um rolamento com elementos rolantes de

aço, devendo-se isto à dureza, que confere menor desgaste aos elementos rolantes, à baixa densidade, que miniza cargas internas de força centrífuga e inércia, bem como ao acabamento superficial, que otimiza os efeitos do lubrificante.

Em relação à carga mínima requerida, rolamentos que operem em alta velocidade e/ou estejam sujeitos a acelerações bruscas, forças de inércia dos elementos rolantes e atrito do lubrificante podem ser prejudiciais aos elementos rolantes e as pistas (SKF, 2019). Assim, para o adequado funcionamento os rolamentos devem estar sujeitos a uma carga mínima de 0,01C para rolamentos de esferas e 0,02C para rolamentos de rolos.

Por fim, em determinadas aplicações as condições operacionais, tais como a magnitude, sentido das cargas, velocidades, temperaturas e lubrificação são variáveis (SKF, 2019). O cálculo de vida útil em condições operacionais variáveis não pode ser realizado antes da redução do espectro de carga e do ciclo de trabalho. Para tanto, cada nível de carga pode ser acumulado e o espectro de carga reduzido a um histograma de blocos constantes de carga (SKF, 2019).

Para o cálculo de vida útil em condições variáveis, utiliza-se:

$$L_{10} = \frac{1}{\frac{U_1}{L_{10\ 1}} + \frac{U_2}{L_{10\ 2}} + \frac{U_3}{L_{10\ 3}} + \dots} \quad (3)$$

Onde L_{10} é a vida nominal básica, com 90% de confiabilidade, $L_{10\ 1}$, $L_{10\ 2}$ são as vidas nominais básicas, com 90% de confiabilidade, em condições constantes 1, 2 e, por fim, U_1 , U_2 são as frações, que devem totalizar 1, do ciclo de vida sob as condições 1, 2 etc. De acordo com SKF, 2019, em cada intervalo de trabalho a carga e condições operacionais podem apresentar valor médio constante. Assim, o número de horas ou revoluções esperadas para cada intervalo de trabalho definem a fração de vida para essa condição específica. Nesse âmbito, se N_1 representar o número de rotações necessárias dada uma condição de carga P_1 , e N for o número de rotações para conclusão dos ciclos de carga variável, logo a fração do ciclo $U_1 = N_1/N$ é utilizada pela condição de carga P_1 , a qual apresenta vida útil calculada de $L_{10\ 1}$ (SKF, 2019).

4.2.4 Falhas em rolamentos

O correto manuseio dos rolamentos permite que eles sejam utilizados por longos períodos de tempo antes de surgirem sinais de fadiga. Entretanto, devido à seleção incorreta

do rolamento, lubrificação inadequada ou mesmo falhas de manuseio ou de condição de serviço, podem ocorrer falhas prematuras (NSK, 2014).

Ainda que a operação se dê de forma adequada, entretanto, a ação das tensões cíclicas de cisalhamento causa o aparecimento de microfissuras que, em sua maioria, surgem em pontos de pouca resistência, ou onde o material é anisotrópico ou em pontos onde ocorrem inclusões de materiais não metálicos. Assim, com o tempo, essas microfissuras evoluem para a superfície da pista onde surgirão microtrincas que evoluem gradativamente (HARRIS, 1991; JUVINALL e MARSHEK, 1991).

Dentre as falhas mais comuns em rolamentos temos as seguintes: escamamento, descascamento, arranhadura, escorregamento, fraturas, trinca e lascamento, gaiola danificada, impressões, *pitting*, desgaste, corrosão por atrito, falso brinel, deslizamento, superaquecimento, corrosão eletrolítica, oxidação e corrosão, falha na instalação e alteração na coloração.

Escamamento é o processo em que regiões com textura áspera e grosseira são formadas por separação de pequenas partes de material dos rolamentos devido à fadiga do mesmo. Dentre as possíveis causas estão: carga excessiva, falha na instalação, carga de momento elevada, contaminação por partículas ou por água, lubrificação deficiente ou folga inapropriada (NSK, 2014). A Figura 3 mostra anéis internos de rolamentos com escamamento.

Figura 3 – Anéis internos de rolamentos apresentando escamamento.

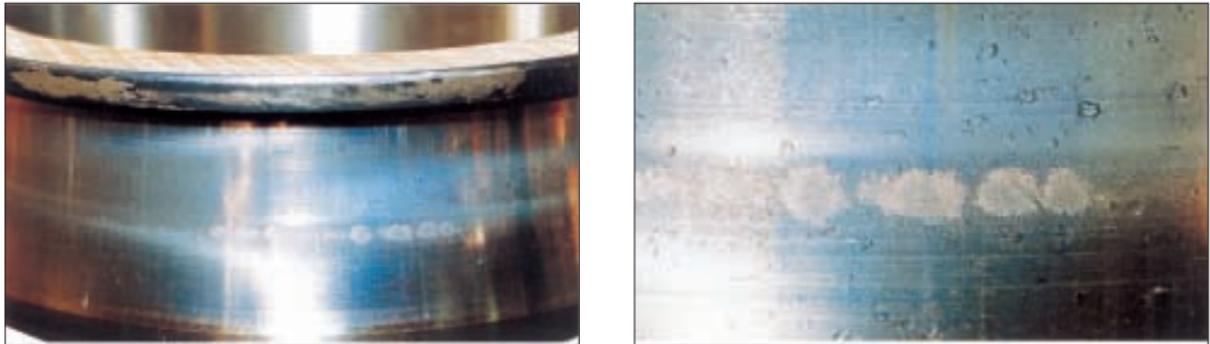


Fonte: NSK (2014).

Descascamento, por sua vez, é o processo em que a superfície da pista começa a descascar, logo em seguida sendo percebidas ondulações. Dentre as possíveis causas para essa falha estão: excesso de carga ou manejo inadequado, montagem inadequada, precisão incorreta no eixo ou alojamento, folga insuficiente, contaminação, oxidação, lubrificação

inadequada ou mesmo queda de dureza devido a temperaturas altas anormais (NSK, 2014). A Figura 4 mostra uma pista com descascamento.

Figura 4 – Pista de rolamento com descascamento.



Fonte: NSK (2014).

Arranhaduras tratam-se de riscos que podem ocorrer durante a montagem, arranhões em razão de objetos estranhos e duros, além de amassados superficiais devido a impactos. As causas são presença de objetos estranhos, penetração por impacto no lado descascado, quedas e choques devido a manejo inadequado, além de montagem desalinhada (NSK, 2014). A Figura 5 mostra amassados e arranhaduras.

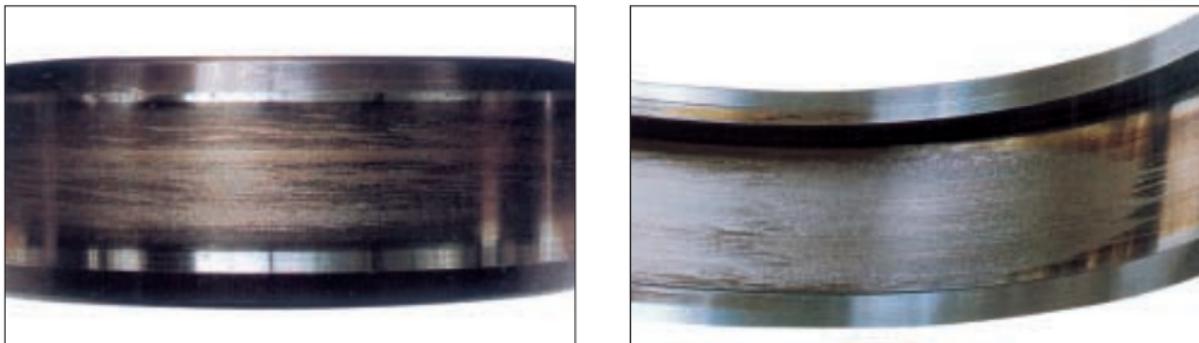
Figura 5 – Rolamentos com amassados e arranhaduras.



Fonte: NSK (2014).

Escorregamento refere-se ao dano causado na superfície das pistas e elementos rolantes causados pelo rompimento do filme de lubrificação. As causas são alta velocidade e baixa carga, acelerações e desacelerações repentinas, lubrificante inadequado e entrada de água. A Figura 6 mostra um anel interno e um anel externo que sofreram escorregamento.

Figura 6 – Aneís interno e externo com danos por escorregamento.



Fonte: NSK (2014).

Fraturas, por sua vez, referem-se a corpos rolantes partidos, anel interno ou externo partidos ou, mesmo, a gaiolas danificadas. As causas usualmente são carga anormal na gaiola por problema na instalação ou deficiência de lubrificantes, avanço do processo de escamamento ou, ainda, carga excessiva de choque e desenvolvimento de trinca de fricção. A Figura 7 mostra três exemplos de anéis internos e um de anel externo com fraturas.

Figura 7 – Anéis internos e anel externo com fraturas.



Fonte: NSK (2014).

O aparecimento de trinca e lascamento se dá quando ocorre um descascamento localizado, surgindo pequenas trincas ou lascamentos, dentre as possíveis causas para essa falha estão excessivas cargas de choque, excessiva interferência, formação de grandes

descascamentos, formação de descascamento por atritos, encostos ou chanfros inadequados ou, ainda, manejo inadequado (NSK, 2014). A Figura 8 mostra rolamento com trincas e lascamentos.

Figura 8 – Rolamento com lasca e trincas.



Fonte: NSK (2014).

Em relação à gaiola danificada, tal falha acontece quando há fratura do pilar da gaiola resultando na sua quebra. As possíveis causas para essa falha são: instalação incorreta, carga de momento elevada, altas rotações ou excesso de variação de rotação, lubrificação inadequada, impacto com objetos estranhos, vibração excessiva ou, mesmo, aumento anormal da temperatura (NSK, 2014). A Figura 9 mostra gaiolas danificadas.

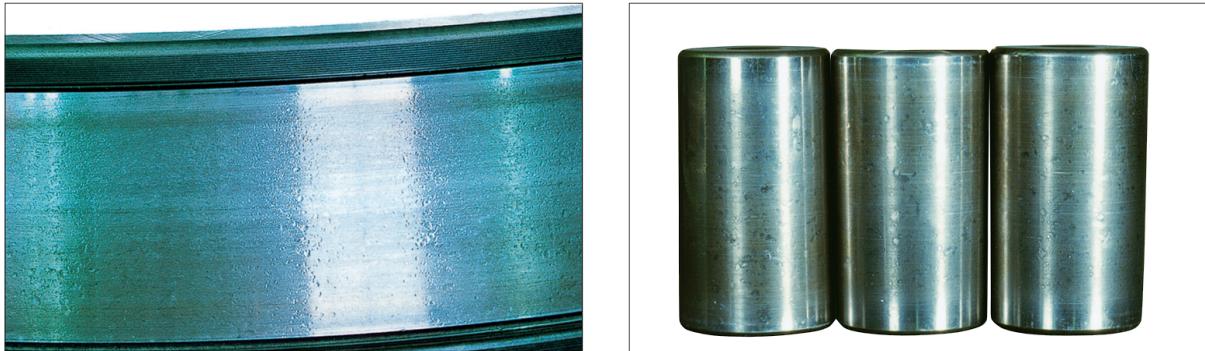
Figura 9 – Gaiolas danificadas.



Fonte: NSK (2014).

Impressões referem-se ao contato de partículas com os elementos rolantes, marcando a superfície da pista e dos próprios elementos. Dentre as possíveis causas estão a contaminação por partículas, carga excessiva ou impactos durante transporte e instalação. A Figura 10 mostra um anel interno e elementos rolantes do tipo rolos com impressões.

Figura 10 – Anel interno e rolos com impressões.



Fonte: NSK (2014).

Outra falha comum, *Pitting*, ocorre quando a superfície se torna áspera e os elementos apresentam uma coloração fosca. As causas incluem lubrificação inadequada, presença de partículas estranhas, afinamento das pontas dos corpos rolantes em razão de um desalinhamento, ruptura da película lubrificante a devido excesso de cargas axiais (NSK, 2014). A Figura 11 apresenta um anel interno e uma esfera com *pitting*.

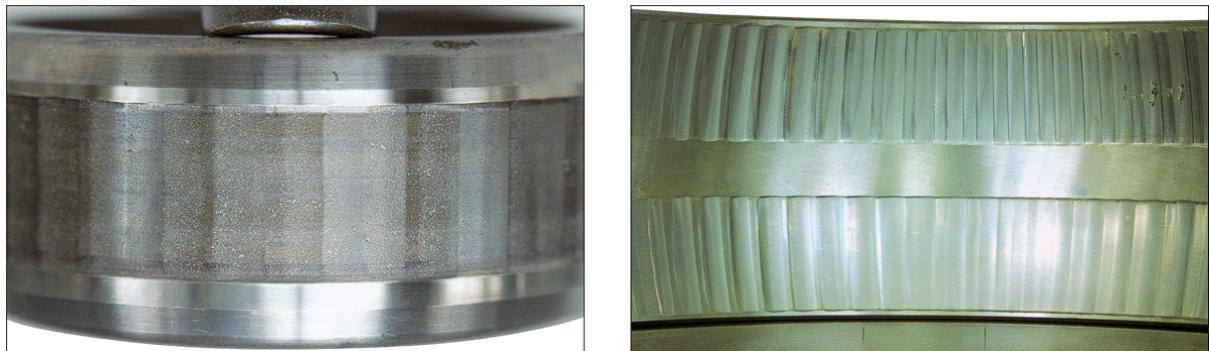
Figura 11 – Anel interno e esfera com *pitting*.



Fonte: NSK (2014).

Desgaste, por sua vez, é o processo em que as superfícies se desgastam e produzem uma deformação dimensional. O desgaste frequentemente acompanha rugosidade e riscos. As causas para o desgaste incluem presença de partículas estranhas no lubrificante, lubrificação inadequada e rolos afinados nas pontas (NSK, 2014). A Figura 12 mostra pistas de rolamentos com desgaste.

Figura 12 – Anel interno e externo com desgaste.



Fonte: NSK (2014).

Corrosão por contato, ou corrosão por atrito, é um tipo de desgaste por raspagem corrosiva. Há duas formas de corrosão por atrito: no primeiro, forma-se um pó de óxido sobre as superfícies de contato; no segundo, ocorre afundamentos nas pistas ao longo do passo dos corpos rolantes. As causas para essas falhas incluem ângulo de oscilação pequeno do rolamento, lubrificação insuficiente, cargas variáveis, vibração durante transporte e, ainda, interferência insuficiente (NSK, 2014). A Figura 13 mostra corrosão por contato.

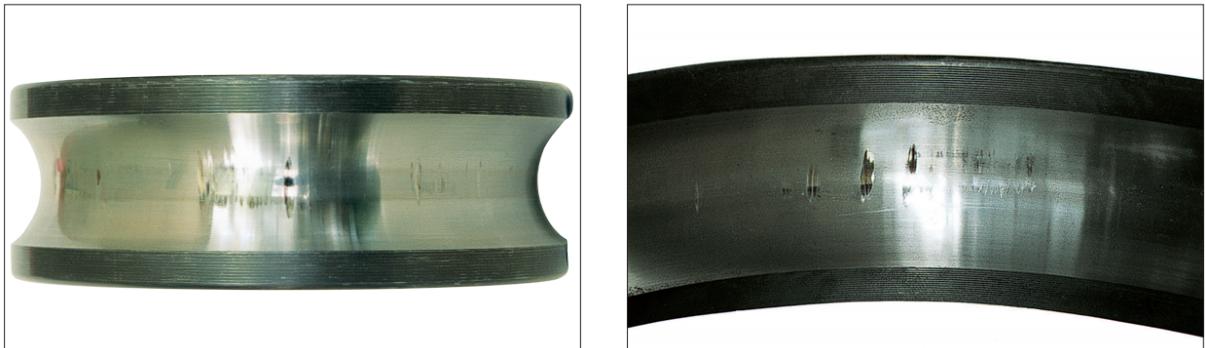
Figura 13 – Rolamentos com corrosão por contato.



Fonte: NSK (2014).

Falso brinel refere-se ao esmagamento nas pistas e elementos rolantes por vibração ou oscilação entre os pontos de contato. Dentre as possíveis causas estão lubrificante deficiente ou pequena amplitude no movimento de oscilação (NSK, 2014). A Figura 14 mostra um anel interno e um externo com esmagamento em suas pistas.

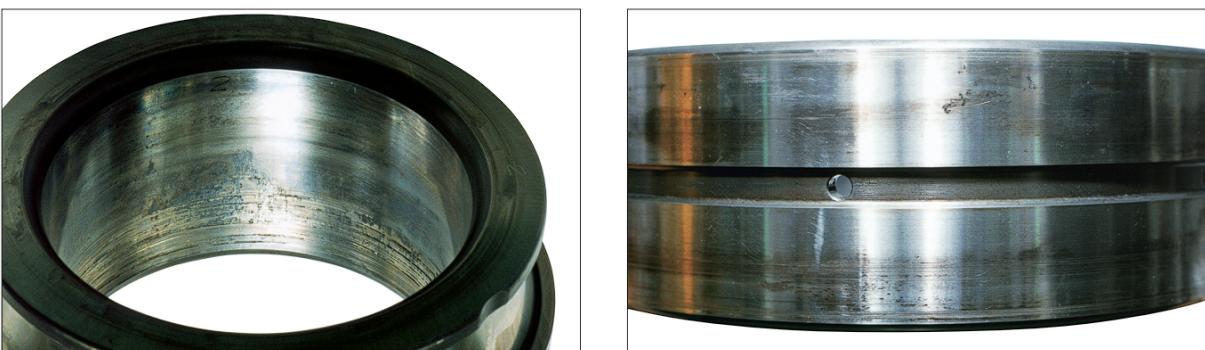
Figura 14 – Pistas com esmagamento.



Fonte: NSK (2014).

Deformação de deslizamento é acompanhada de superfícies brilhantes ou de superfícies descoloridas no anel interno ou externo, também podendo ocorrer desgaste abrasivo. As causas são interferência insuficiente na seção sem brilho, bucha de montagem não fixada apropriadamente, aumento anormal de temperatura ou, ainda, cargas excessivas (NSK, 2014). A Figura 15 mostra deformação de deslizamento.

Figura 15 – Deformação de deslizamento.



Fonte: NSK (2014).

Superaquecimento, por sua vez, diz respeito ao processo em que o rolamento se aquece e descolora, eventualmente travando. Dentre as possíveis causas para esta falha estão folga insuficiente no rolamento, incluindo-se folgas que diminuem em razão de deformações locais, lubrificação insuficiente ou imprópria, cargas excessivas ou ainda corpos rolantes afinados nas extremidades (NSK, 2014). A Figura 16 mostra o dano em um rolamento que superaqueceu.

Figura 16 – Dano causado superaquecimento.



Fonte: NSK (2014).

Corrosão eletrolítica diz respeito à formação de afundamentos sobre as pistas que transformam-se gradualmente em ondulações e cuja causa é a corrente elétrica passando através dos corpos rolantes (NSK, 2014). A Figura 17 mostra a corrosão eletrolítica na pista de um anel interno de um rolamento, com dano ampliado na foto para facilitar a visualização, bem como o dano em rolos.

Figura 17 – Corrosão eletrolítica em rolamentos.



Fonte: NSK (2014).

Oxidação e corrosão é uma falha que ocorre quando a superfície se torna parcial ou totalmente oxidada surgindo, ocasionalmente, óxido ao longo das linhas do passo dos elementos rolantes. Causas para essa falha incluem condições inadequadas de armazenamento, embalagem inadequada, óleo protetivo insuficiente, penetração de água ou ácido, dentre outros elementos, ou, ainda, manuseio inadequado (NSK, 2014). A Figura 18 mostra um rolamento oxidado e corroído.

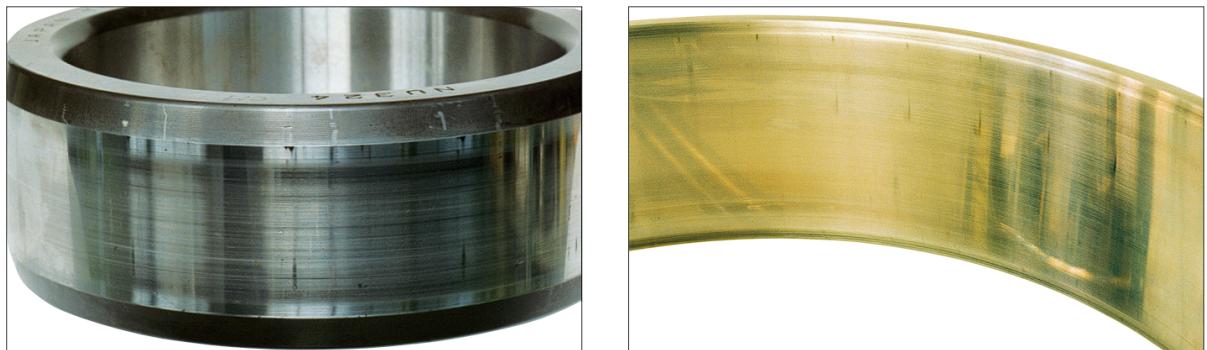
Figura 18 – Rolamentos com oxidações e corrosões.



Fonte: NSK (2014).

Falhas na instalação têm como principais decorrências longo riscos na superfície das pistas ou dos elementos rolantes. As causas mais comuns são inclinação dos anéis ou impactos durante instalação ou remoção. A Figura 19 mostra um anel interno e externo com riscos decorrentes de falha de instalação.

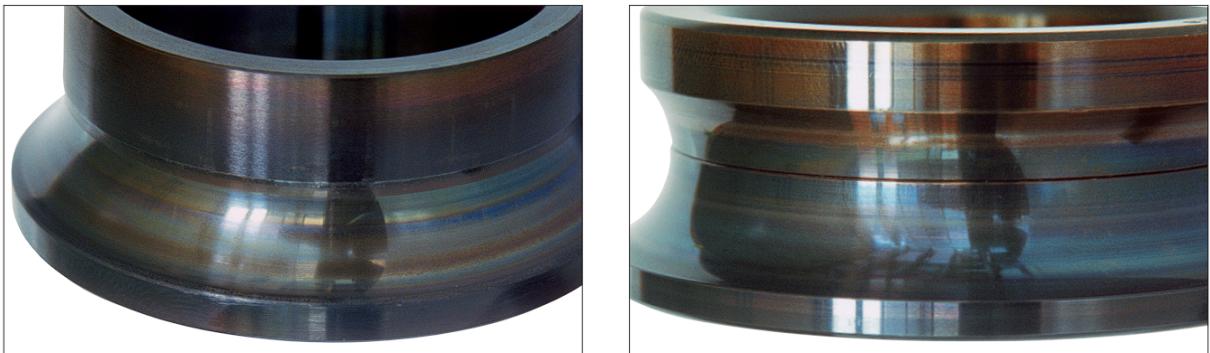
Figura 19 – Rolamentos com falhas de instalação.



Fonte: NSK (2014).

Por fim, manchas e descoloração demonstram superfícies sem brilho, a superfície está fosca, rugosa ou eventualmente deformada, também estando coberta de pequenas depressões. As causas são infiltração de substância estranha ou mesmo lubrificação insuficiente (NSK, 2014). A Figura 20 mostra manchas e descoloração em rolamentos.

Figura 20 – Manchas e descoloração em rolamentos.



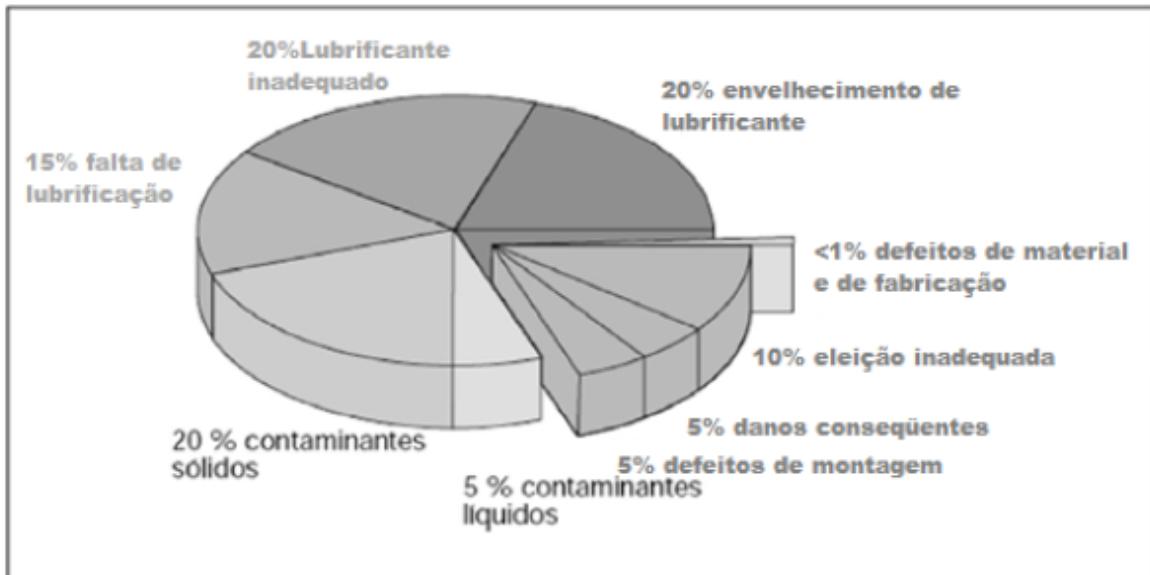
Fonte: NSK (2014).

Ao ocorrem danos em rolamentos, verifica-se que ocorre o contato entre a superfície defeituosa de um elemento rolante e outra superfície sem defeito, gerando um choque entre esses elementos, o que causa um impulso que promove uma excitação tanto na máquina, quanto no rolamento. As causas para isso são variadas.

4.2.5 Principais causas de defeitos em rolamentos

Santander, 2014, fornece uma lista de danos primários que dão origem a danos secundários que, por sua vez, induzem falhas nos rolamentos. A Figura 21 apresenta as causas mais comuns para aparecimento de falhas em rolamentos, onde problemas referentes à lubrificação mostram-se os principais.

Figura 21 – Causas de defeitos em rolamentos.



Fonte: NSK (2014).

Como visto, para detecção de falhas pode-se utilizar análise de vibrações, uma vez que os defeitos nos componentes dos rolamentos apresentam frequências características que podem ser calculadas a partir das especificações do rolamento.

4.3 Análise de vibrações

Para que se possa abordar as técnicas de manutenção preditiva baseada em análise de vibrações faz-se necessário, primeiramente, um breve entendimento relativo ao fenômeno das vibrações mecânicas.

Segundo Rao, 2008, a maior parte das atividades humanas envolve vibração, sendo esse um fenômeno que acontece constantemente na natureza e no cotidiano. Nepomuceno, 1989, afirma que as vibrações mecânicas são fenômenos observados quando uma partícula realiza um movimento entorno uma posição de equilíbrio. Assim, quando há mudança de energia cinética para energia potencial e vice-versa ocorre a vibração.

Quando um corpo oscila em períodos determinados ao redor de uma posição de equilíbrio, tem-se o Movimento Harmônico, forma mais simples que a vibração pode se apresentar (HOLANDA, 2016). Holanda, 2016, apresenta como exemplo desse fenômeno o movimento do pêndulo de um relógio, que oscila da máxima posição à direita até a máxima posição à esquerda, passando pelo ponto central de equilíbrio. Quando esse movimento oscilatório do ponto percorre uma trajetória completa, dá-se o nome de período de oscilação.

Ressalta-se que o tempo que a massa demora para realizar uma oscilação, ou movimento harmônico simples, é chamado de período. Uma oscilação por segundo, ou um ciclo por segundo, CPS, constitui uma medida de frequência denominada Hertz (NEPOMUCENO, 1989).

Para que se mensure os níveis de vibração, utilizam-se parâmetros expressos em termos de deslocamento, velocidade e aceleração (Holanda, 2016). Segundo Kardec e Nascif, 2009 *apud* Holanda, 2016 todos os três parâmetros representam “o quanto o equipamento está vibrando”.

Além disso, esses parâmetros possuem amplitude, frequência e fase. A amplitude, A, se relaciona com a quantidade de energia contida no sinal vibratório, ou seja, a severidade do movimento, sendo medida em milímetros (mm). Pode ser medida em forma de deslocamento, velocidade e aceleração. A frequência, f, conforme anteriormente mencionado, é representada em Hertz e indica o número de vezes em que ocorre um ciclo completo de movimento. Já a fase, ϕ , representa “o ângulo inicial do argumento da função senoidal que descreve o movimento harmônico” (HOLANDA, 2016, p. 22).

Já em relação às formas de mensuração, o Deslocamento é medido em micrometros (μm). De acordo com Holanda, 2016, o deslocamento pode ser medido pelo nível de distanciamento do ponto relativo à sua posição de repouso, sendo a unidade mais intuitiva para a mensuração da vibração, visto que é aquela que mais se assemelha à ideia de oscilação em torno de um ponto. O deslocamento é recomendado para medições abaixo de 10Hz (HOLANDA, 2016). A equação 4 representa o deslocamento, x:

$$x = A \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \quad (4)$$

A velocidade, por sua vez, é medida em milímetros por segundo (mm/s). A velocidade é a derivada primeira do deslocamento. O deslocamento implica existência de uma velocidade que, por sua vez, pode ser variável. A função de velocidade, v, é dada pela equação 5

$$v = A\omega \cos(\omega t + \phi) \quad (5)$$

Holanda, 2016, afirma que a velocidade de vibração é parâmetro “menos representativo para componentes tanto de baixa como de alta frequência, sendo o parâmetro normalmente escolhido para avaliação da severidade de vibração entre 10 Hz e 1000 Hz”.

A aceleração, por sua vez, é medida em metros por segundo ao quadrado (m/s^2). Com velocidade variável, implica-se a existência de uma aceleração no movimento. A equação que representa a aceleração, a, é:

$$a = -A^2\omega \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \quad (6)$$

Limitando-se o escopo de abrangência, o fenômeno das vibrações, na engenharia, é um item de alta relevância para estudo visto que os efeitos das vibrações podem ser nocivos, ou mesmo catastróficos, ao se considerar maquinário industrial.

Fatores como desgaste precoce de elementos mecânicos e falhas por fadiga causadas por movimentos cíclicos podem ser mensurados ao monitorar a assinatura vibracional dos componentes de máquina. A partir disso são aplicadas, então, técnicas específicas que permitam a adequada mensuração do estado dos componentes.

4.3.1 Frequências características de defeitos e detecção de falhas em rolamentos

Rolamentos são um dos elementos mais utilizados em máquinas e suas falhas, também, uma das causas comuns para problemas nestes maquinários. Assim, os sinais de rolamentos, em particular os de vibração, têm sido amplamente estudados.

Randall e Antoni, 2011, apontam que falhas de rolamentos geram frequências características em seus distintos componentes, que estão relacionadas às dimensões e geometria de cada rolamento. Isto ocorre pois a superfície do componente de rolamento danificado gera, ao entrar em contato com outra superfície, um impulso que se propaga através de um choque. Tais impulsos se dão de maneira periódica, com características dependentes da localização do defeito e amplitude dependente de sua posição em relação à zona de carga. Esta característica é base para as técnicas de detecção de falhas em rolamentos, que serão discutidas adiante.

Randall e Antoni, 2011, apresentam quatro fórmulas para o cálculo das frequências característica de defeitos nos rolamentos.

FTF (*fundamental train frequency*), que indica a frequência de defeito na gaiola.

$$FTF = \frac{fr}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \theta \right) \quad (7)$$

BPFI, indica a frequência de defeito na pista interna (*ball pass frequency of the inner race*)

$$BPFI = \frac{N}{2} fr \left(1 + \frac{d}{D} \cos \theta \right) \quad (8)$$

BPFO se trata do indicativo da frequência de defeito na pista externa (*ball pass frequency of the outer race*)

$$BPFO = \frac{N}{2} fr \left(1 - \frac{d}{D} \cos \theta \right) \quad (9)$$

BSF, por sua vez, é o indicativo da frequência de defeito do elemento rolante (*ball spin frequency*).

$$BSF = \frac{D}{2d} fr \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \theta \right)^2 \right] \quad (10)$$

Onde, nas fórmulas, temos f_r , que é frequência de rotação da pista interna do rolamento; D é diâmetro primitivo, calculado a partir da soma do diâmetro externo pelo diâmetro interno e divisão do resultado por dois; d é o diâmetro dos elementos rolantes; N é o número de elementos rolantes; e, por fim, θ é o ângulo de contato.

Logo, a partir dessas frequências características de defeito e das especificações dos rolamentos e de suas propriedades de trabalho - número de elementos rolantes, diâmetros, ângulo de contato e velocidade de rotação -, os componentes podem ser monitorados quanto ao surgimento de falhas.

4.3.2 Detecção de falhas em rolamentos por análise de vibração

Abordados os conceitos fundamentais relativos às vibrações mecânicas e às frequências que caracterizam falhas em rolamentos, faz-se necessário entender como as vibrações podem ser medidas e analisadas sob a ótica do interesse tecnológico na manutenção preditiva.

Nepomuceno, 1989 afirma que a medida e monitoramento da vibração é uma das atividades de manutenção preditiva que apresenta melhores resultados. Mesquita et. al, 2002, afirmam que análise dessas vibrações pode se dar nos domínios do tempo, da frequência e no domínio conjunto tempo-frequência.

Segundo Almeida, 2013, em relação aos rolamentos, com o surgimento de falhas são provocados impulsos através dos choques entre estas e os elementos do rolamento, excitando ressonâncias tanto no rolamento quanto na máquina, dadas pelas frequências características de defeitos para cada rolamento. Sabendo-se que tais frequências podem ser obtidas por meio das referidas características geométricas dos rolamentos, é possível que se apliquem técnicas de análise de sinais a fim de que se determine a severidade do dano e o estado do rolamento.

Em relação às técnicas específicas para análise e detecção de falhas em rolamentos, dadas as características intrínsecas desses elementos, aplicam-se técnicas no domínio do tempo, no domínio da frequência e no domínio conjunto tempo-frequência.

Em relação à análise no domínio do tempo, Segundo Spamer, 2009, p.62 *apud* Holanda, 2016, p.22 a amplitude de vibração em função do tempo pode ser medida em valores de pico a pico, valor de pico e valor RMS, sendo que o valor de pico a pico sinaliza

a excursão máxima da onda, medida relevante para definição de quando um elemento da máquina atinge valores críticos (MEOLA, 2005).

Já o valor de pico, de acordo com Meola, 2005, indica níveis máximos de sinais transientes, sem considerar a cronologia da onda. O valor médio, por sua vez, indica o quanto o sinal está deslocado à sua referência tendo pouca relevância quanto ao monitoramento da vibração.

O valor RMS, ou eficaz, por sua vez, é, ainda de acordo com Meola, 2005, uma das medidas mais relevantes de amplitude, já que quantifica a energia diretamente ligada à vibração e, portanto, é um indicador do seu poder destrutivo. O nível RMS é, por esse motivo, muito utilizado como parâmetro para determinação de níveis de alerta e alarme em manutenção preditiva (MEOLA, 2005).

A relação entre os níveis de pico, o nível médio, é dada por:

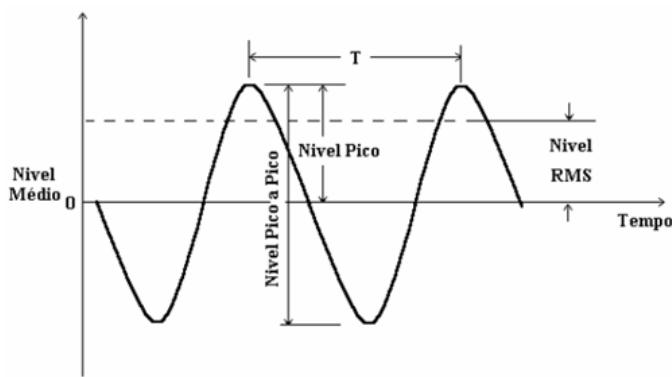
$$\text{Nível Médio} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)dt \quad (11)$$

O nível eficaz, ou nível RMS, de um sinal harmônico é dado pela equação 12

$$\text{Nível RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t)dt} \quad (12)$$

A Figura 22 exemplifica a relação estes níveis.

Figura 22 – Representação dos níveis de um sinal harmônico.



Fonte: Meola (2005).

Ainda de acordo com Meola, 2005 *apud* Tandon, 1999 os métodos mais comuns de detecção de falhas no domínio do tempo são o nível RMS e o Fator de Crista, que representa a razão entre o valor de pico e o valor RMS de aceleração. O Fator de Crista,

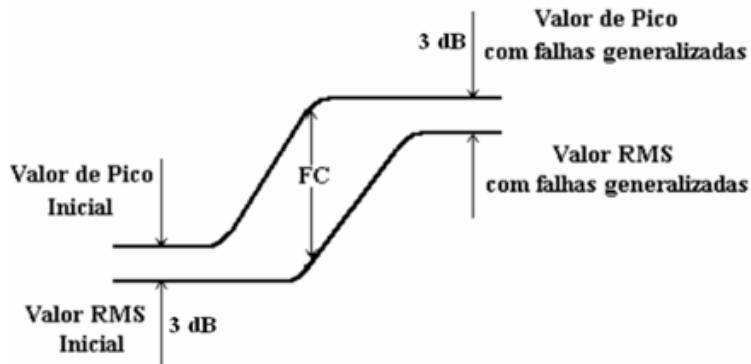
FC, considera a variação do pico e do valor RMS. Considerando-se mancais de rolamentos, Meola afirma que a diferença entre eles é de aproximadamente 3dB, dada por:

$$20\log_{10} \left(\frac{\text{Nível Pico}}{\text{Nível RMS}} \right) \quad (13)$$

Esta diferença aumenta progressivamente com o surgimento de defeitos, até atingir valor aproximado de 18dB quando, devido ao desgaste geral do rolamento, tal diferença volta a diminuir (MEOLA, 2005). Assim, ao retornar para aproximadamente 3dB a falha é iminente e o rolamento deverá ser trocado.

A Figura 23 demonstra esta relação entre os valores de Pico e RMS.

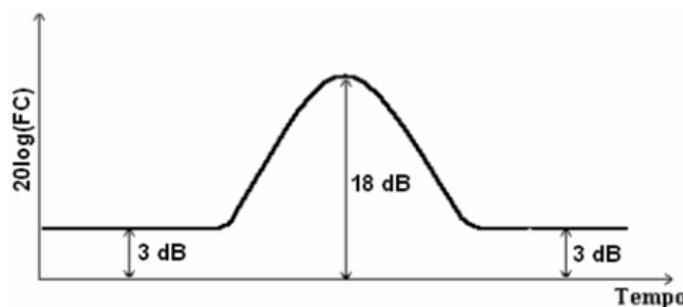
Figura 23 – Relação entre os valores de Pico e RMS com o desgaste progressivo de rolamentos.



Fonte: Meola (2005).

Já a Figura 24 demonstra o comportamento do Fator de Crista no tempo com o desgaste do rolamento.

Figura 24 – Fator de Crista no tempo.



Fonte: Meola (2005).

Outro relevante método para detecção de falhas é a curtose. Neste, os momentos estatísticos são utilizados para descrever o comportamento de variáveis aleatórias. Segundo Mesquita et al. 2002, há diversos momentos estatísticos que podem indicar a forma da

densidade de probabilidade, sendo a curtose, proposta por Dyer e Stewart, utilizada na detecção de falhas incipientes em rolamentos. O fator de Curtose trata-se do quarto momento estatístico normalizado quanto ao desvio padrão elevado à quarta potência. A curtose é descrita da seguinte forma:

$$K = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^4 p(x) dx}{\sigma^4} \quad (14)$$

Ainda segundo Mesquita et al., 2002, a curtose de um rolamento em boas condições possui distribuição Gaussiana de aceleração, ao passo que rolamentos defeituosos apresentam distribuição não-Gaussiana dado o aumento no número dos altos níveis de aceleração.

Na equação 14 $p(x)$ é a função de densidade de probabilidade e \bar{x} o valor médio do sinal de vibração $x(t)$. Segundo Mesquita et al. 2002, o fator de curtose para mancais em bom estado é próximo a três, sendo que esse valor tende a aumentar conforme o rolamento se deteriora.

É importante observar que os métodos acima descritos, de análise de falhas no domínio do tempo, são capazes de indicar o surgimento da falha. Entretanto, tais métodos não são capazes de apontar onde se localiza tal falha. Para tanto, faz-se necessária a utilização de análise no domínio da frequência.

Assim, tendo-se em vista que os mancais possuem frequências características de defeitos, é esperado que, ao apresentar falhas em seus componentes, tais falhas possam ser determinadas a partir das frequências por elas geradas. Sendo assim, técnicas de análise espectral, tal como a transformada rápida de Fourier, podem mostrar em qual local do espectro de frequências localiza-se o defeito. Mesquita et. al, 2002, entretanto, apontam para o fato de que podem ocorrer pequenos deslizamentos entre as pistas, o que pode ocasionar desvios nas frequências de defeitos em relação ao que se espera. Portanto, recomenda-se que tais frequências características sejam utilizadas como referência, não como determinantes. Além disso, ainda, Mesquita et. al, 2002, atentam para o fato de que tais frequências podem ser mascaradas por outros elementos da máquina.

Dentre as técnicas de análise espectral, a mencionada transformada rápida de Fourier, conhecida pela sigla FFT, é uma das mais largamente empregadas. Entretanto, para que se obtenham resultados mais claros com a aplicação da FFT na análise espectral de rolamentos, dado o mascaramento das frequências dos por outros elementos de máquinas,

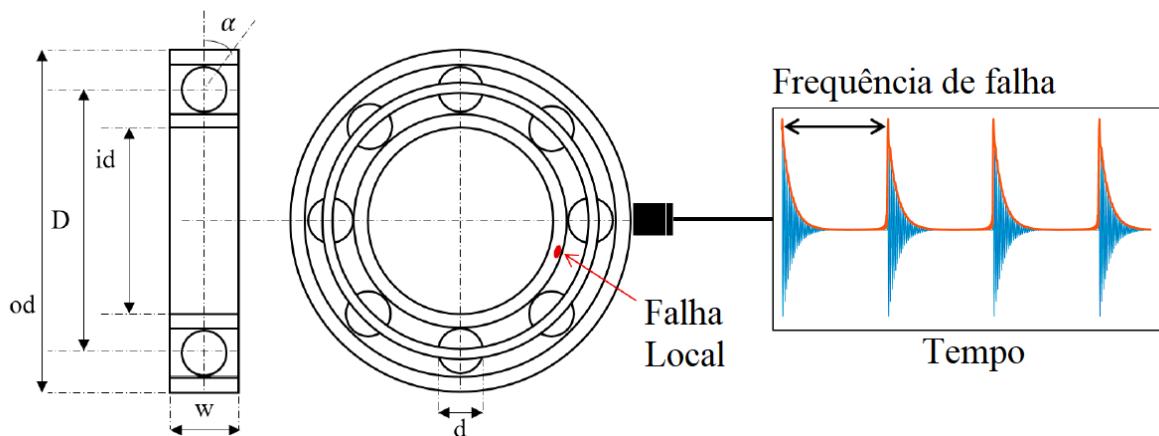
fazem-se necessárias técnicas que permitam o isolamento do sinal dos rolamentos a fim de que se possa detectar os danos em sua fase inicial.

Dentre as técnicas utilizadas com essa finalidade, a análise de envelope é a mais largamente empregada.

4.3.3 Análise de envelope do sinal

Como anteriormente mencionado na seção 4.3.1, os danos em rolamentos geram impulsos que se propagam e excitam frequências mais elevadas de ressonância. Este é um importante conceito para a análise de envelope do sinal do rolamento. Kim et al., 2020, apontam que usualmente estes impulsos são modulados por frequências de ressonâncias muito mais elevadas dos rolamentos. A Figura 25 exemplifica esse fenômeno.

Figura 25 – Exemplo de ressonância com decaimento exponencial ocorrendo periodicamente na frequência de falha.

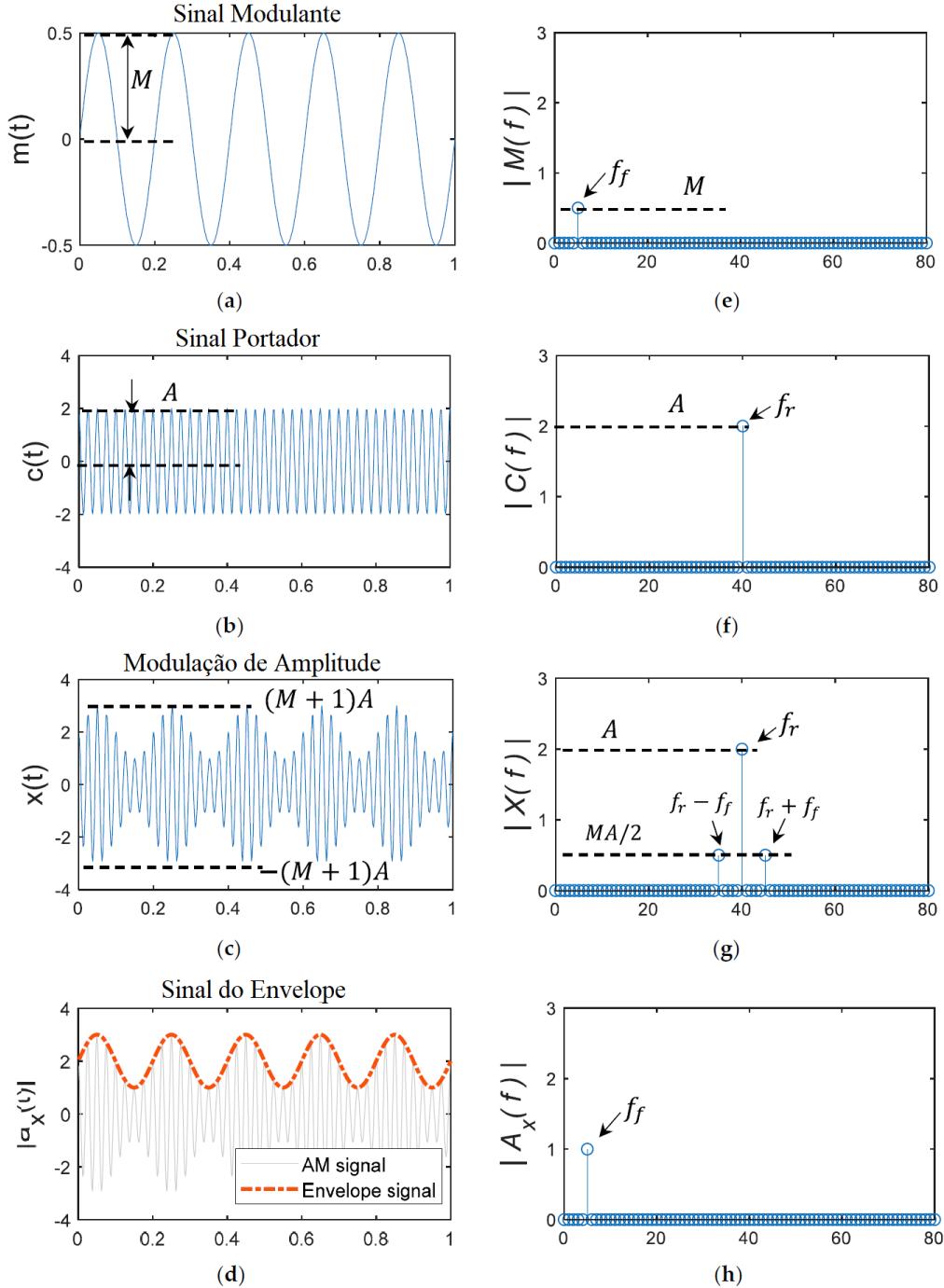


Fonte: Adaptado de Kim et al. (2020).

Ainda, Kim et al., 2020, apontam que este fenômeno é matematicamente o mesmo da modulação de amplitude, ou seja, os mesmos constituem o sinal modulante e o sinal portador, respectivamente. O sinal AM, assim, se torna o sinal portador, com amplitude variável dada pelo sinal modulante. Após aplicação do FFT neste sinal, o domínio da frequência do sinal modulante, portador e AM é dado na Figura 26 (g). É possível visualizar que o espectro de frequências do sinal AM possui picos na frequência portadora, f_r com banda laterais espaçadas pela frequência modulante. A Figura 26 exemplifica tal processo.

O espectro do sinal AM, portanto, é composto por três componentes f_r , $f_r \pm f_f$

Figura 26 – Exemplo de sinal AM e FFT de seu Envelope.

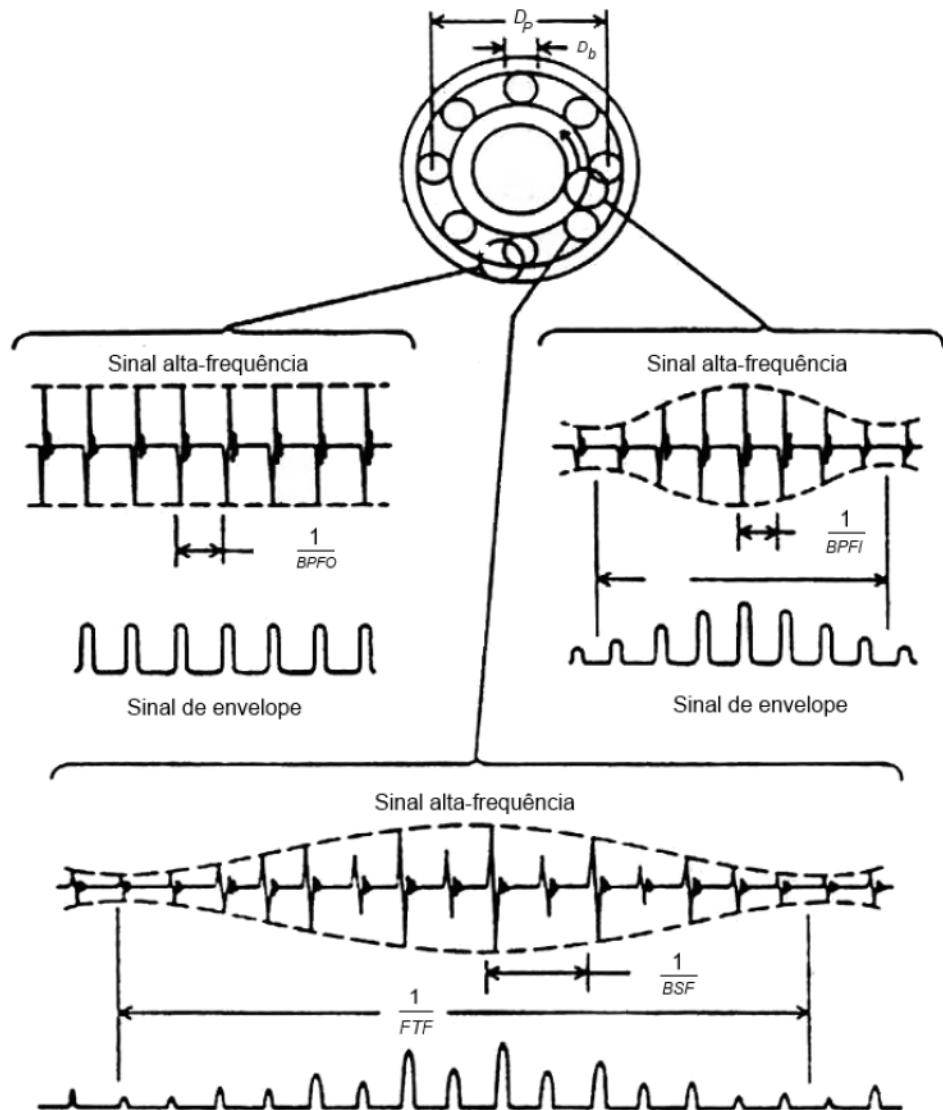


Fonte: Adaptado de Kim et al. (2020).

A Figura 27 mostra os sinais típicos de envelope produzidos por falhas localizadas nos distintos componentes dos rolamentos.

O desenvolvimento deste método de análise se deu quando a NASA apoiou, em 1971, um programa para investigação da detecção de defeitos em rolamentos. Neste, foram conduzidos experimentos onde se deu a comparação dos sinais de rolamentos em bom estado

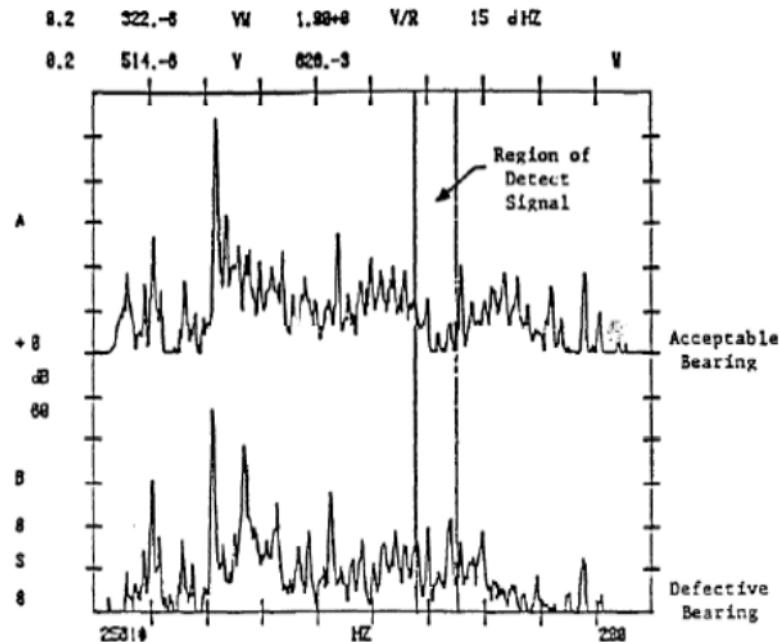
Figura 27 – Padrões de sinais de vibração gerados a partir de danos em diferentes componentes dos rolamentos.



Fonte: Santander (2014).

com o de rolamentos com danos manualmente inseridos na pista interna (BARREIRO, 2010). Para essa comparação os dados de vibração, emissões acústicas e temperatura dos rolamentos foram capturados. A Figura 28 mostra a diferença entre os espectros de vibração de um rolamento em bom estado e de um rolamento com dano introduzido.

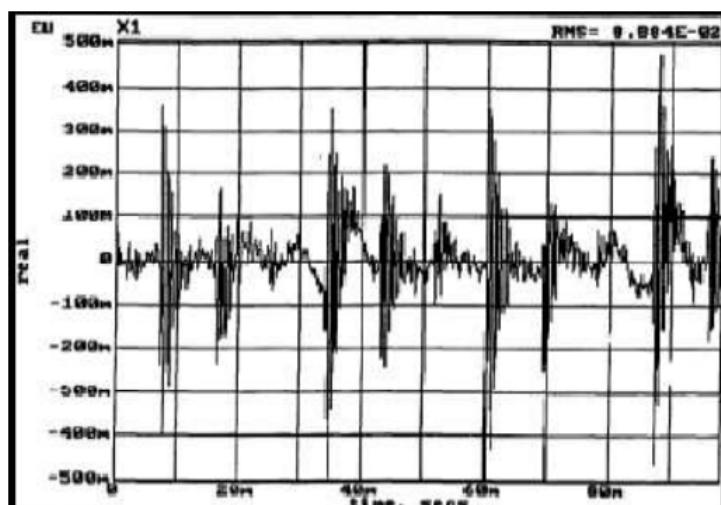
Figura 28 – Comparação de espectros de vibração de um rolamento em bom estado e de um rolamento defeituoso. O sinal de cima representa o rolamento em bom estado e o sinal debaixo, o rolamento defeituoso. A faixa destacada mostra a região de dano, explicitando as diferenças entre ambos.



Fonte: Barreiro (2010).

Dada a sutileza da diferença entre estes, decidiu-se conduzir maiores investigações (BARREIRO, 2010). A Figura 29 mostra o sinal do rolamento com dano introduzido visualizado, através de osciloscópio, no domínio do tempo.

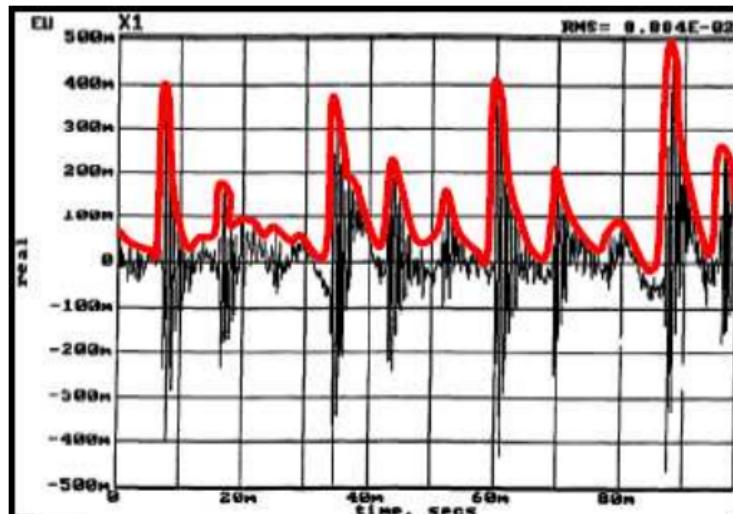
Figura 29 – Sinal temporal do rolamento com dano introduzido.



Fonte: Barreiro (2010).

Com esse sinal visualizado através do osciloscópio, o tempo entre os sinais de impacto foi medido e obteve-se, desta forma, a frequência de defeito na pista interna. Caso uma linha que envolvesse o sinal fosse traçada, conforme mostrado na Figura 30, o espectro desse novo sinal determinado por essa linha deveria mostrar a frequência do defeito. A essa condição dá-se o nome de envelope (BARREIRO, 2010).

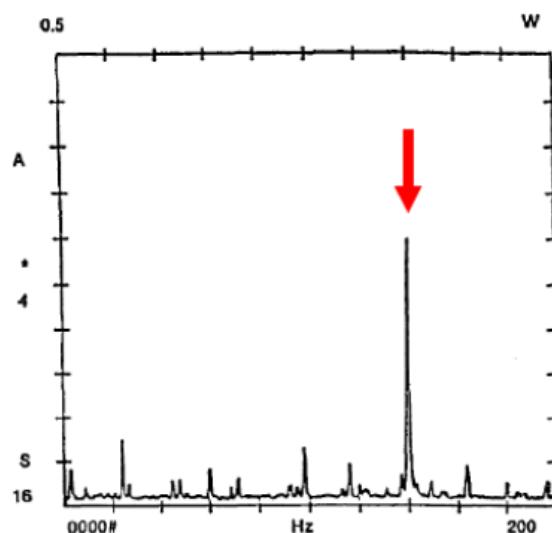
Figura 30 – Envelope do sinal temporal do rolamento com dano introduzido.



Fonte: Barreiro (2010).

A Figura 31 mostra o espectro do envelope do sinal. A seta vermelha aponta a falha, agora evidente devido sua elevada amplitude.

Figura 31 – Espectro do envelope do sinal temporal do rolamento com dano introduzido.



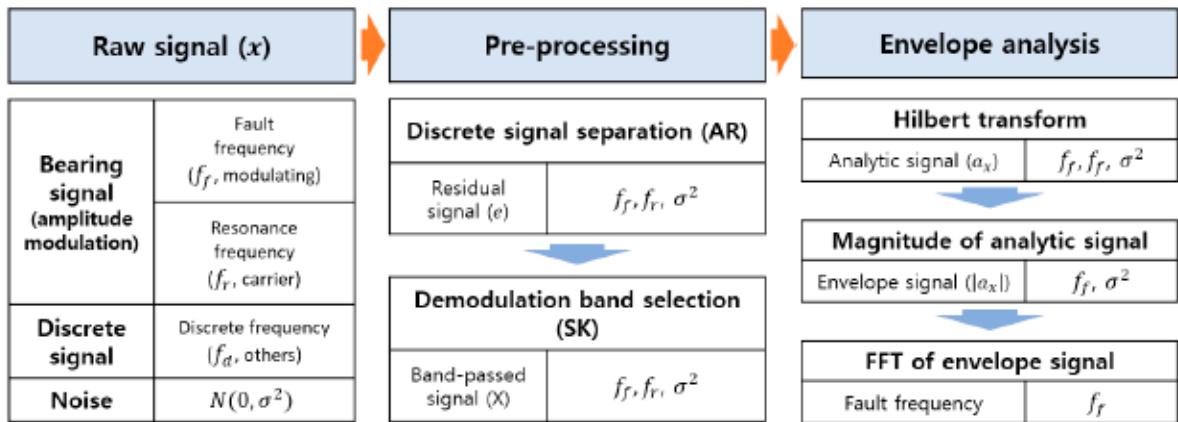
Fonte: Barreiro (2010).

Dessa forma, o trabalho aponta para a eficácia deste método na detecção de falhas incipientes em rolamentos, uma vez que possibilita a detecção de falhas de rolamentos em um espectro de frequências por meio da comparação desse espectro com as frequências esperadas (KIM et. al, 2020). Ainda Segundo Randall, 2011, a análise de envelope da vibração tem como objetivo a troca de uma faixa mais ampla das frequências da FFT para uma faixa menor, de forma que isso permita uma análise com maior resolução. Barreiro, 2010, aponta os seguintes passos para realização da análise de envelope:

1. Mudança da representação do sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência, com utilização da FFT;
2. Filtragem do sinal através da utilização de filtro passa-faixa em torno de frequência de falha ou alteração observadas através da FFT;
3. Demodulação do sinal por meio da transformada de Hilbert ou da aplicação de um filtro passa-baixa, a fim de se remover do sinal os componentes de alta energia, o que possibilita maior acurácia na detecção dos defeitos do rolamento. Caso opte-se pela utilização da transformada de Hilbert, o processo de demodulação se dá pela construção de um sinal analítico complexo no domínio do tempo, na qual a parte imaginária deste sinal se dá pela transformada de Hilbert da parte real.
4. Cálculo do espectro do sinal do envelope, onde se obtém, em módulo, a envoltória das amplitudes obtidas após a demodulação;
5. Utilização da FFT para transformação do domínio do tempo para o domínio da frequência, possibilitando a verificação das frequências das características de falha do mancal.

Kim afirma também que, a fim de obter uma maior acurácia do Envelope, pode ser adotada uma etapa de pré-processamento com utilização de um modelo de autoregressão do sinal, utilização de STFT e de visualização dos níveis de curtose, por meio da curtose espectral por janela de amostragem, para otimização da banda para o filtro passa-faixa. A Figura 32 mostra o processo de análise de Envelope do sinal com as etapas de pré-processamento.

Figura 32 – Análise de Envelope com etapas de pré-processamento do sinal.



Fonte: Adaptado de Kim et. al (2020).

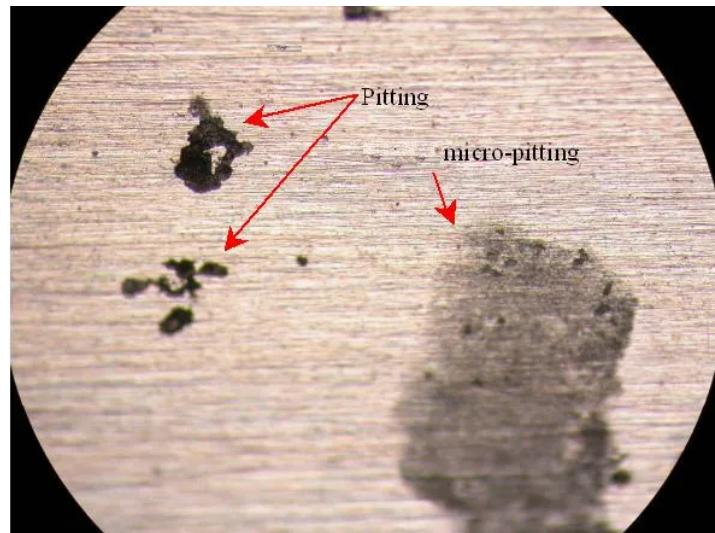
4.3.4 Estágios de falhas em rolamentos

O diagnóstico de falhas em rolamentos desempenha, como visto, um importante papel na manutenção de maquinário rotativo. Como descrito na seção 4.3.1, as frequências características de defeito dos rolamentos podem ser calculadas a partir de suas propriedades geométricas e rotação ao qual estão submetidos.

Quando um rolamento desenvolve falhas, além de apresentar tais frequências, eles geralmente passam por quatro estágios distintos de degradação (GRANEY e STARRY, 2011).

As primeiras indicações de defeito no rolamento aparecem em frequências ultrasônicas, normalmente na região acima dos 20 kHz. Neste primeiro estágio, surgem pequenas trincas que criam ondas elásticas. A energia dessas ondas ainda é baixa e a vida útil nominal esperada é de 10% a 20%. Sendo assim, para que seja possível a detecção através de técnicas como o envelope do sinal, é necessário que o tipo de sensor utilizado tenha grande sensibilidade e seja montado o mais próximo possível da zona de carga do rolamento (GRANEY e STARRY, 2011; CBM Connect, 2021). A Figura 33 mostra um exemplo de falha neste estágio.

Figura 33 – Exemplo de dano no primeiro estágio de falha de um rolamento.



Fonte: CBM Connnect (2021).

A Figura 34 demonstra a localização, no espectro de frequências, do sinal esperado para uma falha no primeiro estágio, com um pico na Zona D que representa as frequências ultrassônicas.

Figura 34 – Primeiro estágio de defeito no rolamento.

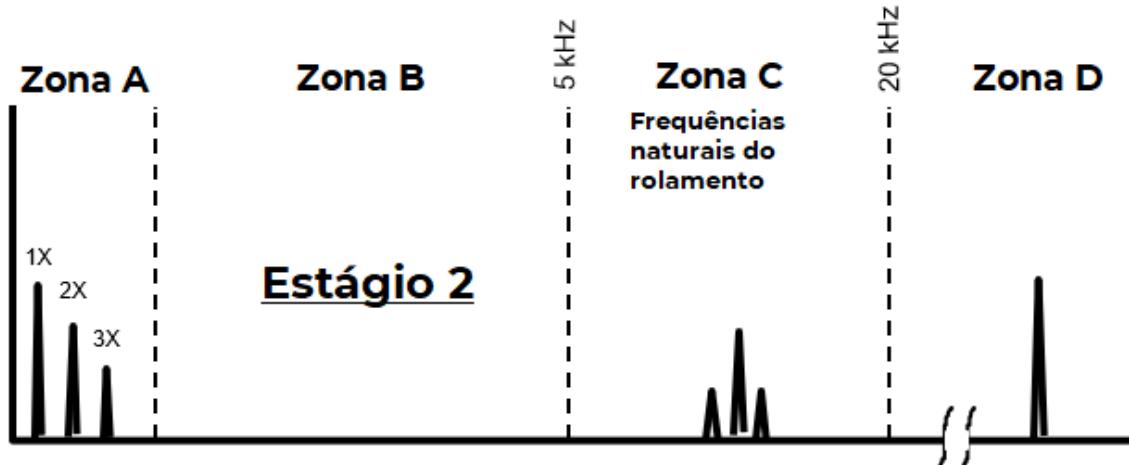


Fonte: ACOEM (2019).

Já no segundo estágio de defeito no rolamento, a deterioração progride e a intensidade de impacto das forças também, de forma que esta se torna suficiente para excitar as frequências naturais dos componentes do rolamento, que se encontram, usualmente, na faixa dos 2 kHz aos 6 kHz (GRANEY e STARRY, 2011; CBM Connect, 2021). Neste estágio a vida útil nominal restante é de 5% a 10% e o reparo em máquinas críticas deve

ser agendado. A Figura 35 mostra o aumento da amplitude na componente ultrassônica e a aparição das excitações nas frequências naturais do rolamento.

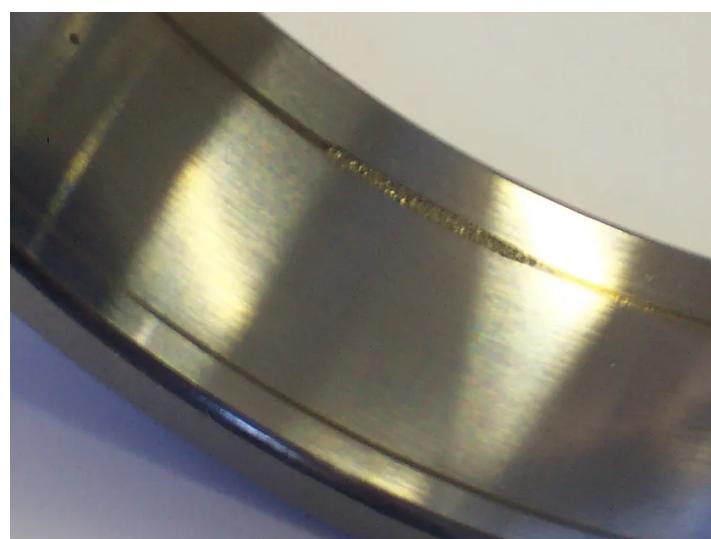
Figura 35 – Segundo estágio de defeito no rolamento.



Fonte: ACOEM (2019).

Já no terceiro estágio os defeitos começam a se mostrar aparentes a olho nu, sendo claramente visíveis. A deterioração progride e, nesta fase, as frequências características de defeito surgirão claramente no espectro. Uma vez que este estágio é detectado, o rolamento possui vida útil nominal restante de 1% a 5%, sendo necessária a parada planejada para substituição na oportunidade mais breve e seu estado monitorado com maior frequência (GRANEY e STARRY, 2011; CBM Connect, 2021). A Figura 36 mostra um exemplo de rolamento com este estágio de falha em sua pista externa.

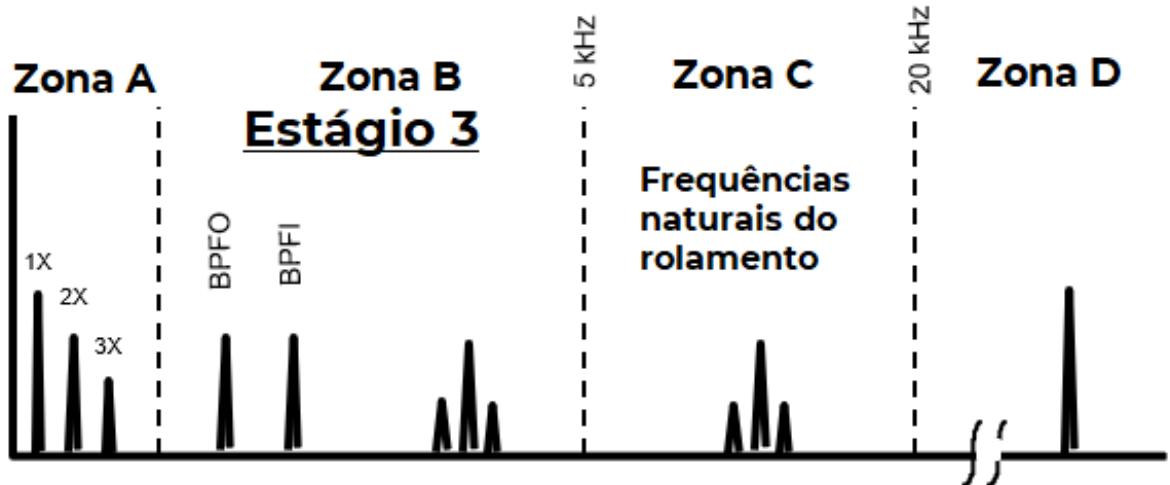
Figura 36 – Pista externa em segundo estágio de defeito no rolamento.



Fonte: ACOEM (2019).

Já a Figura 37 mostra o espectro de frequências no terceiro estágio, com aparição clara das frequências características de defeito na Zona B.

Figura 37 – Terceiro estágio de defeito no rolamento.



Fonte: ACOEM (2019).

Por fim, o quarto estágio representa a última etapa de deterioração antes da falha total. Nesse quarto estágio os métodos de detecção em alta frequência começam a falhar, pois as falhas na pista ou nos elementos rolantes começam a se arredondar e diminuem a força e intensidade dos impactos (GRANEY e STARRY, 2011; CBM Connect, 2021). Em relação às frequências de defeito, surge um ruído de fundo que mascara as frequências características, conforme visto na Figura 38.

Figura 38 – Quarto estágio de defeito no rolamento.



Fonte: ACOEM (2019).

A partir destes quatro estágios, sob uma abordagem prática, o foco nos estágios dois e três deve ser a correta análise a fim de detectar problemas com antecedência e evitar possíveis falhas.

Com a evolução das falhas dar-se-á o aparecimento de frequências características de defeitos, a BPFO, BPFI, BSF e FTF, que possibilitarão a determinação de onde a falha está ocorrendo. Além disso, tendo em vista que os defeitos do rolamento geram impactos, tais frequências serão frequentemente acompanhadas por diversas frequências relacionadas harmonicamente (GRANEY e STARRY, 2011).

De um modo geral, quanto mais frequências harmônicas houver, pior será a condição do rolamento. Para detecção dessas falhas, as técnicas anteriormente mencionadas, tais como a análise por meio de FFT, PSD e o método de Envelope do sinal, são empregadas.

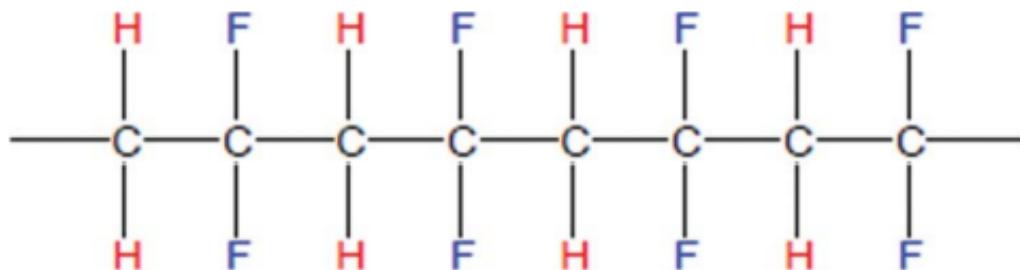
Para isso, entretanto, faz-se necessária a monitoração dos rolamentos com um elemento sensor, tal como filme PVDF.

4.4 Fluroreto de polivinilideno

O fluroreto de polivinilideno, PVDF, é um fluoropolímero termoplástico altamente inerte produzido a partir da polimerização do monômero chamado difluoretino (KABIR et al., 2017). Em 1969 o pesquisador Dr. Heiji Kawai, descobriu altíssimos níveis de atividade piezoelétrica, muito superiores a qualquer polímero natural ou sintético conhecido, no fluroreto de polivinilideno (MARUTAKE, 1995). Desde então, o PVDF vem tendo suas aplicações estudadas. O PVDF é um polímero semicristalino de cadeia longa, proveniente da unidade CH₂-CF₂, caracterizada por possuir um grande momento do dipolo elétrico, de aproximadamente 7,56 x 10⁻³⁰ C.m. Como estas unidades se alinharam de maneira ordenada para uma configuração *head-tail* superior à 90%, o polímero apresenta um momento líquido do dipolo elétrico incomumente alto (CHATIGNY e ROBB, 1987).

A Figura 39 mostra a estrutura molecular do PVDF.

Figura 39 – Estrutura molecular do PVDF.



Fonte: Xin (2016).

Decorrente dessa descoberta o interesse no estudo do PVDF se dá, entre outras características, por suas propriedades piezo e piroelétricas.

Piezoelectricidade é a capacidade de certos materiais, altamente polares, de alterar suas dimensões quando expostos a um campo elétrico, ou, inversamente, gerar sinal elétrico quando mecanicamente deformados (HALVORSEN, 1986). A piezoelectricidade foi descoberta em 1880 pelos irmãos franceses Jacques e Pierre Curie, que a observaram em cristais de Quartzo (MANBACCHI e COBBOLD, 2011). Uma de suas primeiras aplicações tecnológicas foi feita por outro francês, Langevin, que desenvolveu um transmissor e receptor de quartzo para sons submarinos por volta de 1917 - o primeiro sonar (HALVORSEN, 1986). Segundo Loussert et al., 2013, a piezoelectricidade se manifesta pela polarização da

célula unitária com o aspecto de momento dipolar $\mu = q \times d$, onde q é a carga elétrica do dípolo e d é a distância entre os centroides.

As propriedades do PVDF, incluindo a piezoelectricidade, são altamente influenciadas pelo seu grau e tipo de estrutura de cristalina. Chatigny e Robb, 1987, fazem uma revisão relacionada ao processo de fabricação de filmes PVDF para obtenção das características desejadas em cada possível estrutura cristalina deste material. Nesta, afirmam que existem três formas distintas de estrutura cristalina no PVDF. A mais comum é centrossimétrica e não polar, obtida quando o polímero é resfriado a partir de seu ponto de derretimento, chamada de fase alfa. A deformação de grãos tipo alfa, com o *stretching* de filmes obtidos por meio de extrusão em temperaturas abaixo de 80 °C, faz com que as células unitárias se alinhem em planos paralelos, criando uma fase polar chamada de fase beta. Uma terceira configuração possível é a fase gama, que, ainda que polar, é intermediária em termos de centrossimetria entre as configurações de fases alfa e beta (CHATIGNY e ROBB, 1987).

Para obtenção de níveis significativos de atividade piezoelétrica no material, o polímero em fase beta deve ser exposto a um campo elétrico de 500kV/cm a 1000kV/cm em temperaturas de 80 °C a 110 °C. Este processo é chamado de *poling*. O nível de atividade piezo depende do tempo de exposição a este campo elétrico, além da força do campo e da temperatura. Quando conduzido adequadamente, tal processo provê orientação permanente para os dípolos no polímero (CHATIGNY e ROBB, 1987).

Chatigny e Robb, 1987, descrevem um processo típico de preparação de um filme piezo, podendo ser resumido da seguinte forma:

1. Extrusão do PVDF em filmes fase alfa;
2. Orientação, uniaxial ou biaxial, a 80 °C e uma relação de *stretch* de 4:5 para fase beta do filme;
3. Deposição de eletrodos por algum de vários métodos;
4. *Poling* térmico a 600kV/cm a 100 °C, por aproximadamente trinta minutos.

Durante esse processo, os dípolos são alinhados relativos à direção do campo de *poling*. Quando o filme piezo está operando em modo eletromecânico, ele se alonga e contrai quando a polaridade dos campos se alterna. Quando operando de forma mecânicoeletrica, por sua vez, forças externas aplicadas produzem tensões de compressão e tração (CHATIGNY e ROBB, 1987).

Os filmes PVDF são flexíveis e leves, produzidos em uma variedade de espessuras e áreas. Algumas das vantagens dos filmes PVDF incluem elevada resistência química até temperaturas elevadas.

Deve-se considerar o filme piezoelétrico como um material dinâmico que desenvolve uma carga elétrica proporcional à mudança mecânica. O piezo não opera em condições estáticas devido ao rápido decaimento da carga induzida, sendo sua constante de tempo determinada pela constante dielétrica do filme e sua resistência interna (CHATIGNY e ROBB, 1987). Uma possível analogia, fornecida por Chatigny e Robb, 1987, é a de uma esponja despejando e absorvendo um fluído, conforme uma pressão externa é aplicada e então liberada. O filme age como uma esponja liberando uma carga elétrica na frequência onde a deformação tem lugar. Uma vez que a deformação cessa, nenhuma carga é transferida.

O PVDF é um material anisotrópico. Suas propriedades elétricas, mecânicas e eletromecânicas diferem para as excitações elétricas e mecânicas nas diferentes direções. Desta forma, para uma tabulação sistemática das propriedades, são utilizados três eixos identificados por números: 1, correspondente ao comprimento; 2, correspondente a altura; e, por fim, 3, correspondente a espessura (CHATIGNY e ROBB, 1987).

Em relação à polarização do material, podemos dizer que tensões positivas são de tração, enquanto tensões negativas são compressivas. Ação elétrica positiva é causada por um aumento na polarização e vice-versa. Para os filmes piezo, o eixo de polarização é sempre a espessura, uma vez que há alinhamento do campo nesta direção. O estresse mecânico, de qualquer forma, pode ser aplicado nas três direções.

Usualmente utilizam-se algumas constantes para caracterizar as atividades de materiais piezoativos.

A constante de acoplamento K , é a habilidade de trocar energia elétrica por energia mecânica e vice-versa. O quadrado da constante K é igual à energia transformada dividida pela entrada total de energia. Assim, K_{312} é igual à energia elétrica transformada causadora de tensão ao longo do eixo 1, dividida pela energia elétrica total das faces eletrificadas paralelas ao eixo 3.

A constante de tensão piezoelétrica, d , expressa a razão de tensão desenvolvida ao longo de um eixo específico aplicada paralelamente a um eixo específico.

$$d_{31} = \frac{\text{Tensão no eixo 1}}{\text{Campo aplicado no eixo 3}} = \frac{m/m}{V/m} = \frac{m}{v} \quad (15)$$

Além disso:

$$d_{31} = \frac{\text{Carga por área de eletrodo}}{\text{Estresse aplicado no eixo 1}} = \frac{C/m^2}{N/m^2} = \frac{C}{N} \quad (16)$$

Outra constante é a constante de estresse piezoelétrico g , que expressa a razão do campo elétrico ao longo de um eixo específico pelo estresse aplicado ao mesmo ou outro eixo. A constante g também expressa a tensão ao longo de um eixo específico pela carga elétrica por área unitária de eletrodos (CHATIGNY e ROBB, 1987). Assim:

$$g_{33} = \frac{\text{Campo aplicado ao longo do eixo 3}}{\text{Estresse aplicado ao longo, eixo 3}} = \frac{V/m}{N/m^2} = \frac{Vm}{N} \quad (17)$$

Também:

$$g_{33} = \frac{\text{Tensão no eixo 3}}{\text{Carga por área eletrônica}} = \frac{m/m}{C/m^2} = \frac{m^2}{C} \quad (18)$$

Também deve-se considerar a constante hidrostática piezoelétrica, dh , que representa a razão de carga de curto-círcuito por área unitária da superfície dos eletrodos pelo estresse hidrostático aplicado igualmente ao longo dos três eixos.

A constante piroelétrica, p , por sua vez, está ligada a natureza dos transdutores piezoelétricos. Estes absorvem energia térmica, aumentando assim a sua temperatura e induzindo sinais elétricos. Em filmes piezo o sinal de saída é proporcional à taxa de mudança de temperatura em vez de níveis de temperatura. A constante piroelétrica p , assim, relaciona a carga por unidade de área dos eletrodos pela unidade de troca de temperatura. Logo, $p = C/m^2K$.

4.5 Sistemas de aquisição de dados

Para que se possa analisar os dados provenientes de sensores é necessário um sistema de aquisição de dados. França, 1997, define sistema de aquisição de dados como um conjunto de elementos interrelacionados, os quais visam à aquisição, análise e apresentação dos dados relativos ao processo de interesse.

Percebe-se, portanto, que um sistema de aquisição de dados é composto por diversos elementos, cada um deles com suas particularidades. França, 1997, afirma que a estrutura básica de um sistema de aquisição de dados é composta por um transdutor, condicionador, pela aquisição dos dados através de um DAQ, pela análise dos dados e, por fim, por sua apresentação.

4.5.1 Condicionamento de Sinal

Os sinais elétricos dos transdutores, a fim de serem aquisitados, usualmente passam por condicionamento de sinal. Este processo de condicionamento diz respeito a uma série de possíveis tratamentos que podem ser feitos em relação ao sinal elétrico, dentre as quais destacam-se a amplificação, atenuação e filtragem.

A amplificação e atenuação tratam-se do processo de adequação das tensões elétricas obtidas por transdutores, particularmente importante em sistemas de aquisição baseados em conversores análogicos-digitais (FRANÇA, 1997). A tensão obtida pelo filme PVDF, por exemplo, usualmente encontra-se em aplicações as quais precisam ser amplificadas para que se adapte à faixa de conversão dos conversores analógicos-digitais. No mesmo sentido, interferências eletromagnéticas e da rede elétrica precisam ser atenuadas.

A amplificação usualmente se dá por meio de um Amplificador Operacional multi-estágio cujas características permitam se aproximar de um amplificador ideal: impedância de entrada infinita, impedância de saída nula, ganho de tensão infinito, resposta de frequência infinita e insensibilidade à temperatura (WENDLING, 2010).

Já a atenuação se dá por meio de circuitos atenuadores, os quais são usualmente dispositivos passivos que funcionam como redes divisoras de tensão, construídas utilizando-se de resistores, os quais têm por finalidade diminuir a amplitude de um determinado sinal.

Filtragem, por sua vez, diz respeito ao processo de seleção, rejeição ou equalização de uma ou várias faixas do espectro de frequências de um sinal elétrico. Ao se aquisitar o sinal de saída dos transdutores, este pode ser mais amplo que as frequências de interesse. Assim, para que se limite esse sinal ao espectro desejado, utilizam-se filtros. Há diversas configurações de filtros, sendo os mais comuns os filtros passa-alto, passa-baixo, passa-faixa, rejeita-faixa e passa-tudo.

4.5.2 DAQ - Data Acquisition

Em especial quanto ao condicionamento e aquisição de sinais, destacam-se em particular as questões de amplificação e atenuação do sinal, essenciais em sistemas baseados em conversores analógico-digitais, A/D, onde se obtém um sinal analógico - tal qual a tensão elétrica de um sensor de filme PVDF - e este é discretizado para representação digital.

Assim, ao lidar com sistemas baseados os conversores analógico-digitais estes estão costumeiramente disponíveis em DAQs, sigla para *Data Acquisition*, os quais podem tomar formas desde dispositivos específicos para a aquisição de dados até microcontroladores com conversores A/D embarcados. Alguns dos principais aspectos relativos aos DAQs e seus conversores analógicos-digitais são: número de canais, resolução, faixa de conversão e taxa de amostragem.

De acordo com a Omega, 2021, o conversor analógico-digital é um "dispositivo eletrônico que converte sinais analógicos em um formato digital equivalente". Tal dispositivo é central na grande parte dos sistemas de aquisição de dados, uma vez que é o responsável pela representação digital dos sinais analógicos de interesse.

O número de canais de um DAQ é a quantidade de entradas disponíveis para aquisição de dados. As faixas de conversão, de acordo com França, 1997, são os limites de tensão máximo e mínimo que um conversor analógico-digital está apto a quantizar.

Já a resolução, de acordo com a Omega, 2021, é o "menor incremento de sinal que pode ser detectado por um sistema de aquisição de dados", em relação a uma faixa de

conversão estabelecida. A resolução é expressa em bits, porcentagem ou fundo de escala. Para um DAQ com resolução de 12 bits e faixa de conversão de 5 V, temos

$$\frac{5 \text{ V}}{2^{12}} = 1.22 \text{ mV} \quad (19)$$

Percebe-se, portanto, que quanto maior a resolução, menores os intervalos entre incrementos.

Já a velocidade, de acordo com a Omega, 2021, trata-se da ”velocidade na qual um sistema de aquisição de dados coleta os dados. Normalmente, a velocidade é expressa em amostras por segundo”.

Para dispositivos multicanais, a taxa de amostragem é geralmente, mas não sempre, a velocidade do conversor analógico digital dividida pelo número de canais amostrados.

Iazzetta, 2021, afirma ainda que as taxas de amostragem são o número de vezes em que se realiza uma amostragem, por unidade de tempo. A taxa de amostragem geralmente é medida em Hertz.

Em relação à taxa de amostragem, o teorema de Nyquist, também conhecido como teorema de amostragem de Nyquist-Shannon, afirma que é necessário uma taxa de ao menos duas vezes o valor da frequência máxima de interesse para que se possa realizar sua análise. Essa taxa é chamada frequência de Nyquist. Caso a taxa de amostragem seja menor que a frequência de Nyquist, há ocorrência do efeito conhecido como *aliasing*, no qual um sinal é incorretamente reconstruído como um sinal de baixa frequência.

5 Materiais e métodos

Neste capítulo são descritos os materiais empregados e métodos adotados para os experimentos, também descritos nesta seção, a fim de se investigar a viabilidade do sensor filme PVDF para fins de manutenção preditiva em rolamentos.

5.1 Rolamentos autocompensadores de rolos

Para a realização dos experimentos foram utilizados dois rolamentos de rolos autocompensadores da NSK, modelo 21306CD. Este modelo apresenta como principais características uma alta capacidade de carga, gaiola de aço prensado e desalinhamento permitível entre 1° e 2.5° . Esta categoria de rolamento foi escolhida pois possibilita uma maior facilidade para inserção manual de defeitos quando comparado, por exemplo, com rolamentos de esferas blindados. A inserção manual de defeitos é uma etapa necessária para possibilitar, nos experimentos, o emprego dos métodos de análise dos sinais do rolamento defeituoso para detecção das frequências características de defeito com utilização do filme PVDF.

As dimensões do rolamento escolhido são:

- Número de elementos rolantes: 26 (13 por fileira)
- Diâmetro externo: 72 mm
- Diâmetro interno: 30 mm
- Limite de rotação: 4500 RPM lubrificado a graxa, 6000 RPM lubrificado a óleo

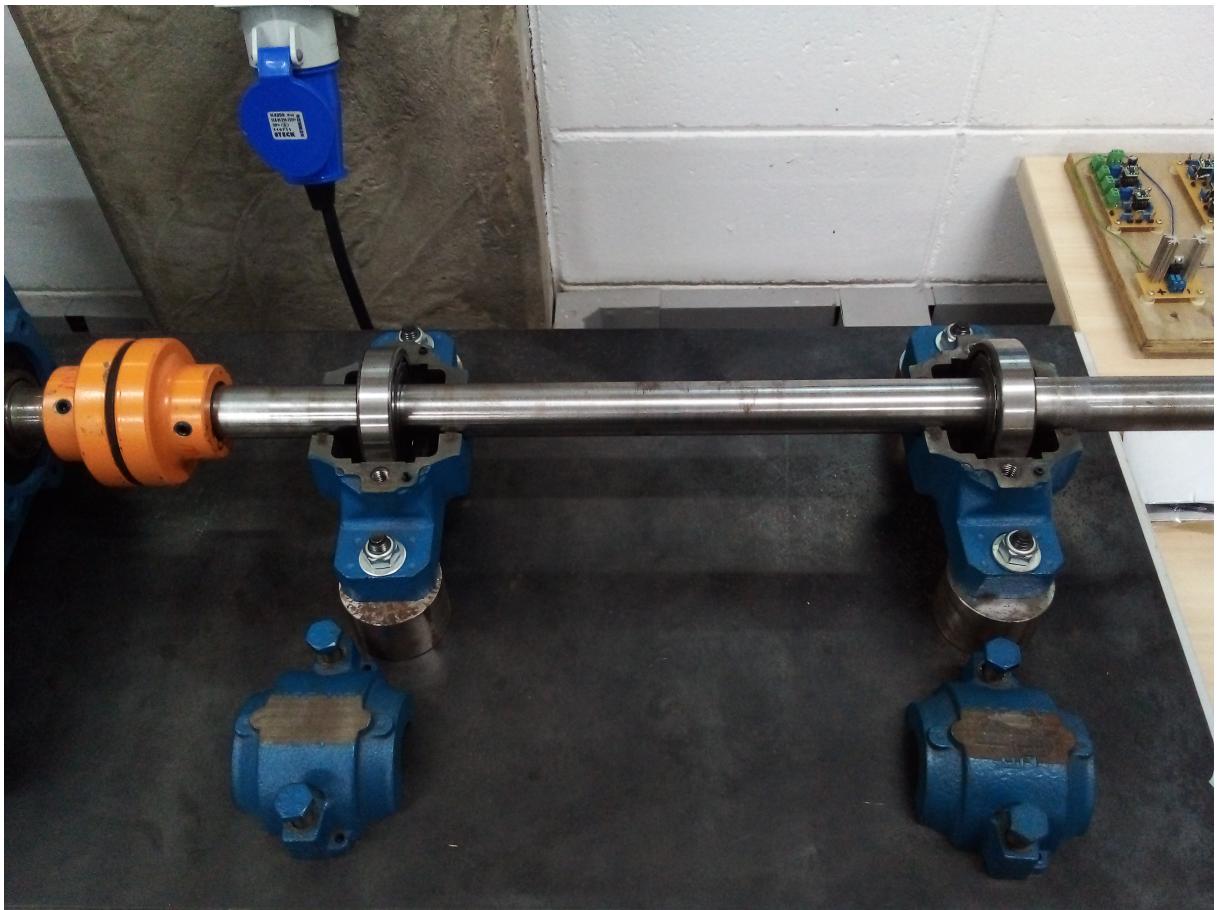
A Figura 40 mostra um modelo de rolamento autocompensador de rolos, tal como utilizado na bancada experimental.

Figura 40 – Rolamento autocompensador de rolos. Retirado de NSK, 2018.



A Figura 41 mostra os rolamentos já acoplado ao eixo motriz na bancada experimental, dentro de suas respectivas caixas.

Figura 41 – Rolamento autocompensador de rolos. Retirado de NSK, 2018.

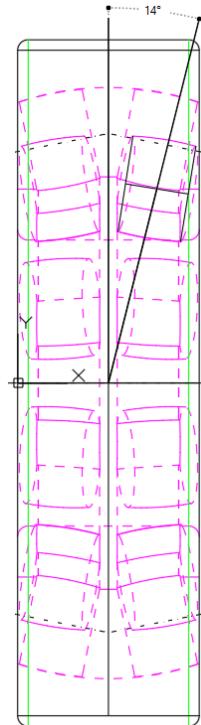


Algumas das medidas do rolamento necessárias para o cálculo das frequências características de defeito, a saber o ângulo de contato e o diâmetro dos elementos rolantes, estão disponíveis no *website* da fabricante NSK em um modelo CAD do mesmo, a partir do qual foram calculados os seguintes valores:

- Diâmetro dos elementos rolantes: aproximadamente 10mm
- Ângulo dos elementos rolantes: aproximadamente 14°

A Figura 42 mostra o CAD do rolamento NSK 21306CD com vista frontal, estando com as marcações para mensuração do ângulo de contato.

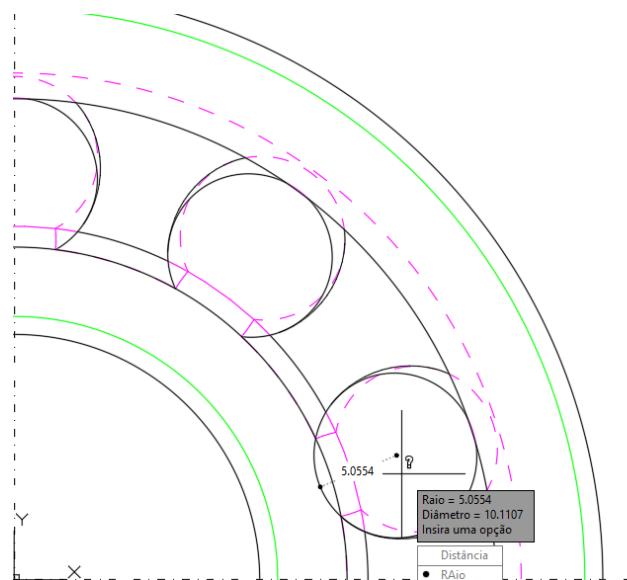
Figura 42 – Ângulo de contato calculado a partir do modelo CAD disponibilizado pela NSK.



Fonte: O autor (2022).

Já a Figura 43 apresenta o diâmetro do elemento rolante, calculado a partir do raio de um dos elementos rolantes visto a partir da face direita do rolamento.

Figura 43 – Diâmetro do elemento rolante calculado a partir do modelo CAD disponibilizado pela NSK.



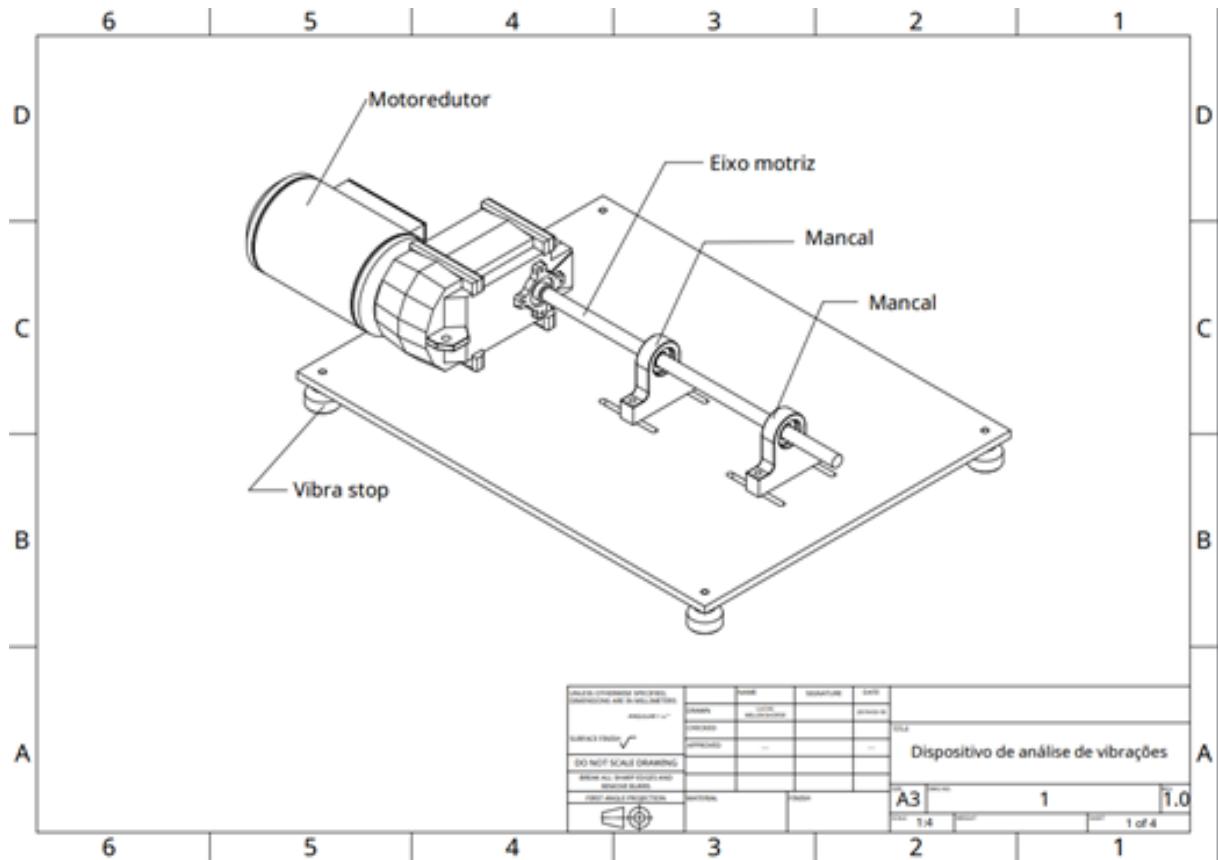
Fonte: O autor (2022).

As amostras do rolamento escolhido são novas e isentas de qualquer tipo de falha e foram montadas em uma bancada experimental, construída para condução dos experimentos, onde foram registradas as suas assinaturas de vibração tanto no domínio da frequência, quanto do tempo para posterior análise.

5.2 Bancada experimental

O aparato experimental é composto por um motorredutor cedido pela empresa parceira WEG/Cestari, com eixo motriz usinado e ligado à mancal de rolamento de empresa parceira NSK. A bancada possui em sua base um isolador de vibrações do tipo vibra-stop. A Figura 44 mostra o projeto da bancada experimental.

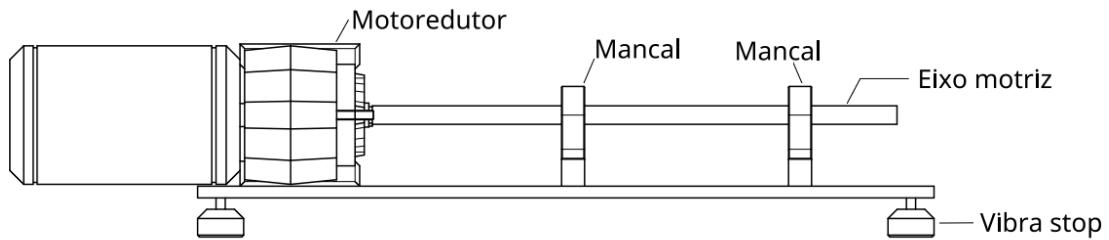
Figura 44 – Projeto da bancada experimental.



Fonte: O autor (2022).

A Figura 45 mostra uma visão lateral do dispositivo que será utilizado. Os sensores com seus respectivos acoplamentos serão afixados nos mancais.

Figura 45 – Projeto da bancada experimental visto lateralmente.



Fonte: O autor (2022).

Em relação à construção da bancada experimental, foi utilizado um torno mecânico do IFSP Câmpus Guarulhos para usinagem do eixo, e uma prensa a fim de realizar o acoplamento dos mancais de rolamentos ao eixo usinado e posteriormente ligado ao motorreductor. A Figura 46 mostra a bancada experimental em sua fase inicial de elaboração.

Figura 46 – Bancada experimental em fase inicial de construção.



Fonte: O autor (2022).

Já a Figura 47 mostra a bancada com construção finalizada.

Figura 47 – Bancada experimental finalizada.



Fonte: O autor (2022).

Ao projeto inicial optou-se incluir duas melhorias: dispositivos isoamortecedores, bem como um acoplamento no eixo.

Os isoamortecedores são capazes de bloquear vibrações externas para a bancada, bem como isolar o ambiente das vibrações geradas pela bancada. A Figura 48 mostra o isoamortecedor da marca Gerb, já instalado. O projeto de instalação e dimensionamento do isoamortecedor é apresentado no Apêndice D.

Figura 48 – Isoamortecedor afixado à bancada.



Fonte: O autor (2022).

O acoplamento adicionado ao eixo, por sua vez, tem por finalidade absorver pequenos choques e desalinhamentos que possam estar presentes durante a operação. A Figura 49 mostra o acoplamento unindo o eixo motriz ao motorredutor.

Figura 49 – Eixo com acoplamento.



Fonte: O autor (2022).

O motor utilizado na bancada de testes possui como características um torque de 400 N m, velocidade de 1800 RPM com taxa de redução de 48,90 vezes, resultante em

velocidade de saída para o eixo de 36,8 RPM. A medição com Tacômetro em partida direta mostrou uma taxa de rotação do eixo de 37 RPM.

Figura 50 – Medição de rotação com partida direta.



Fonte: O autor (2022).

Também foi adicionado um painel de operações para controle da bancada, mostrado na Figura 51.

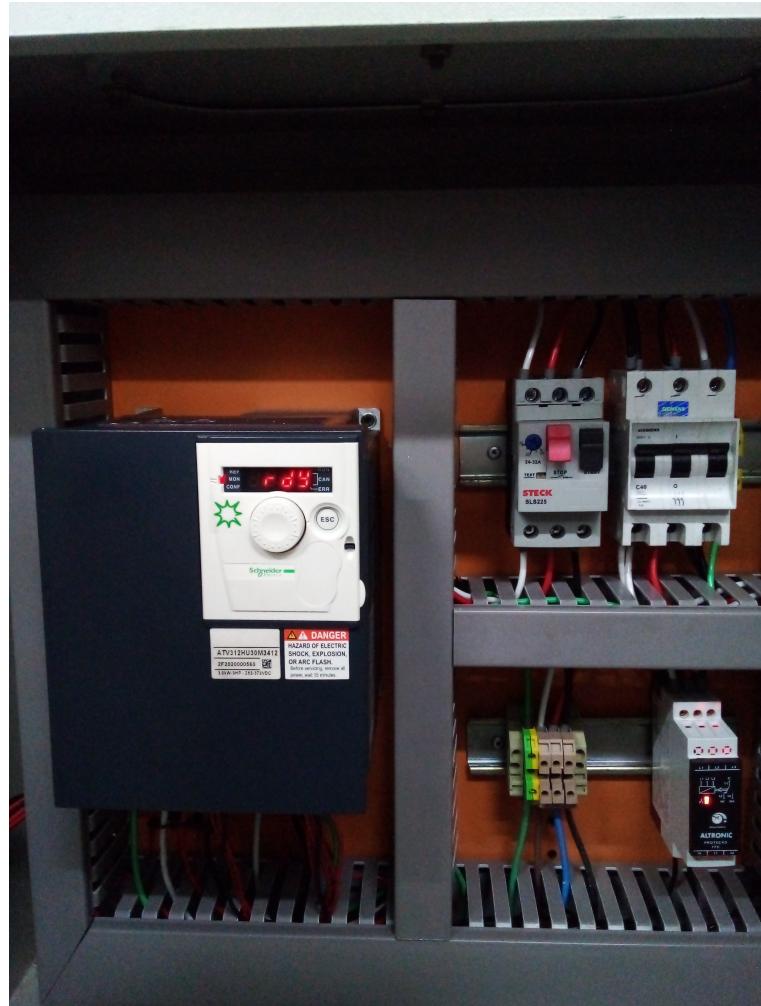
Figura 51 – Painel de controle da bancada experimental.



Fonte: O autor (2022).

O painel é composto por botões indicadores iluminados por led indicando o estado da máquina: energizada ou não-energizada, com motor ligado ou desligado. Além disso há botões de controle para ligar e desligar a máquina, bem como uma chave seletora da direção de rotação. Também há um potênciometro para controle da velocidade da rotação do eixo por meio de um dispositivo inversor de frequências. A Figura 52 mostra a parte interna do painel.

Figura 52 – Inversor de frequências e instalação elétrica do painel da bancada experimental.



Fonte: O autor (2022).

A Figura 53 mostra a bancada experimental visualizada com a porta do painel aberta e o inversor de frequências à mostra, propiciando um panorama geral da bancada construída.

Figura 53 – Versão final da bancada experimental.



Fonte: O autor (2022).

5.3 Cálculo das frequências esperadas

A partir dos dados coletados, pode-se calcular com base nas frequências características de defeitos as frequências esperadas de defeito para o rolamento adotado no estudo. O diâmetro primitivo D se dá por:

$$D = \frac{72 \text{ mm} + 30 \text{ mm}}{2} = 51 \text{ mm} \quad (20)$$

Em relação à frequência de rotação do eixo, os experimentos serão propostos em duas rotações distintas. Uma com 36,8 RPM, velocidade da partida direta, e outra a 61,3 RPM, velocidade de rotação com utilização do inversor de frequências e motor a 3000 RPM. Realizando a conversão para Hz a frequência de rotação do eixo em 36,8 RPM é

$$Fr = \frac{36,8 \text{ RPM}}{60 \text{ s}} = 0.61 \text{ Hz} \quad (21)$$

Já para a rotação em 61,3 RPM temos:

$$Fr = \frac{61,3 \text{ RPM}}{60 \text{ s}} = 1.03 \text{ Hz} \quad (22)$$

Assim, no caso da rotação fixada em 61,3 RPM, para a *Fundamental Train Frequency* a frequência esperada é, aproximadamente:

$$FTF = \frac{1,03}{2} \left(1 - \frac{10,1}{51} \cos 14^\circ \right) = 0.417 \text{ Hz} \quad (23)$$

Já com a rotação fixada em 36,8 RPM, para a *Fundamental Train Frequency* espera-se, aproximadamente:

$$FTF = \frac{0,61}{2} \left(1 - \frac{10,1}{51} \cos 14^\circ \right) = 0.247 \text{ Hz} \quad (24)$$

Já para a *Ball Pass Frequency of The Inner Race* com eixo a 61,3 RPM temos, aproximadamente:

$$BPII = \frac{13}{2} 1,03 \left(1 + \frac{10,1}{51} \cos 14^\circ \right) = 7.96 \text{ Hz} \quad (25)$$

Para a *Ball Pass Frequency of The Inner Race* com rolamento a 36,8 RPM temos, aproximadamente:

$$BPII = \frac{13}{2} 0,61 \left(1 + \frac{10,1}{51} \cos 14^\circ \right) = 4.71 \text{ Hz} \quad (26)$$

Para a *Ball Pass Frequency of The Outer Race* com eixo a 61,3 RPM temos, aproximadamente:

$$BPFO = \frac{13}{2} 1,03 \left(1 - \frac{10,1}{51} \cos 14^\circ \right) = 5.42 \text{ Hz} \quad (27)$$

Para a *Ball Pass Frequency of The Outer Race* com eixo a 36,8 RPM temos, aproximadamente:

$$BPFO = \frac{13}{2} 0,61 \left(1 - \frac{10,1}{51} \cos 14^\circ \right) = 3.21 \text{ Hz} \quad (28)$$

Para a *Ball Spin Frequency* a frequência esperada para rotação do eixo em 61,3 RPM é, aproximadamente:

$$BSF = \frac{51}{2 * 10,1} 1,03 \left[1 - \left(\frac{10,1}{51} \cos 14^\circ \right)^2 \right] = 2.5 \text{ Hz} \quad (29)$$

E por fim, para a *Ball Spin Frequency* com eixo em 36,8 RPM temos, aproximadamente:

$$BSF = \frac{51}{2 * 10,1} 0,61 \left[1 - \left(\frac{10,1}{51} \cos 14^\circ \right)^2 \right] = 1.48 \text{ Hz} \quad (30)$$

O conhecimento prévio destas frequências é de grande importância na etapa de análise, uma vez que elas apontam as regiões do espectro onde as falhas devem se mostrar presentes.

5.4 Filme PVDF e circuitos condicionadores de sinal

A partir destas frequências é possível estimar as regiões do espectro de frequência para análise do sinal aquisitado. Para que isto seja possível, entretanto, é necessário o emprego de circuitos que realizem o tratamento e filtragem do sinal resultante do sensor a fim de eliminação de interferências eletromagnéticas, percebidas em testes preliminares e constatadas na literatura.

Utilizou-se como sensor o filme PVDF modelo LDT1-028k da Measurement Specialties. A Figura 54 mostra o sensor de vibração.

Figura 54 – Sensor de vibração piezoelétrico.



Fonte: Measurement Specialties (2021).

Esse se trata de um filme PVDF com espessura de 28 μm , laminado em folha de poliéster e com dois terminais crimpados, que permitem a medição de sua tensão quando sujeito a um esforço mecânico e tem como principais características:

- Impedância mínima: $1\text{ M}\Omega$
- Impedância preferida: $10\text{ M}\Omega$ e superior
- Tensão de saída: 10 mV-100 V dependendo da força e impedância do circuito
- Temperatura de armazenamento: -40°C a +70°C
- Temperatura de operação: 0°C a +70°C

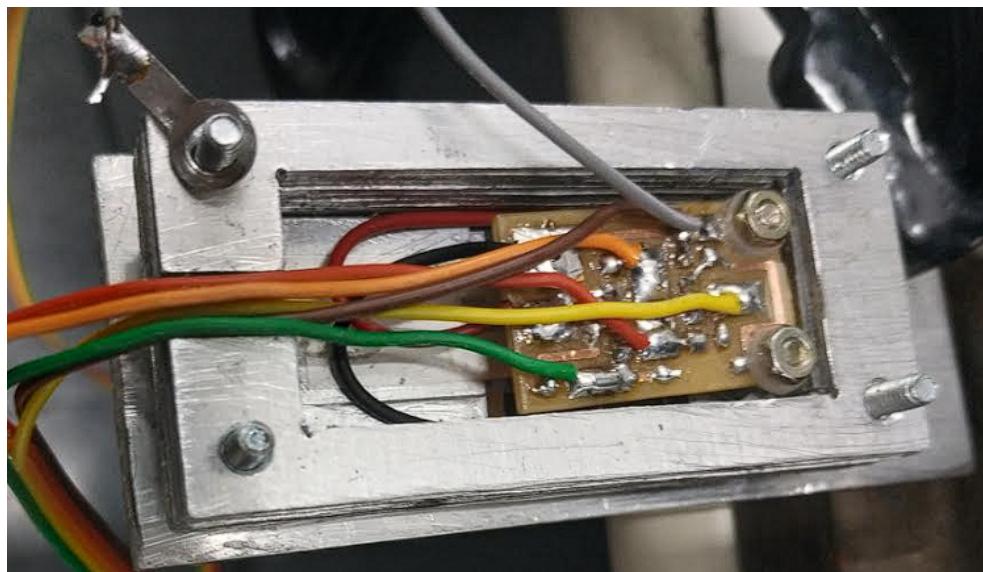
Tendo em vista se tratarem de sensores de alta impedância, faz-se necessário isolamento elétrico, a fim de mitigar as interferências da fase da rede elétrica e de outros sinais de alta frequência incidentes sobre o local de testes, bem como amplificação da tensão resultante do esforço mecânico sofrido pelo sensor, por meio de amplificador operacional.

Tal como mencionado na revisão bibliográfica realizada, baseando-se em Li et. al, 2011, os autores explicitam a necessidade de condicionamento eletrônico do sinal para trabalho com o sensor PVDF. Os autores mostram a importância de um filtro rejeita-faixa na frequência da rede elétrica e de amplificação operacional, também apontando que dada a alta impedância, esse se torna facilmente sujeito aos ruídos ambientais.

A partir de testes iniciais verificou-se que o sensor, conforme verificado por meio da revisão bibliográfica, de fato apresentava altos níveis de ruído. Assim, foram projetados e construídos circuitos condicionadores de sinal para o trabalho com o sensor PVDF, a fim de mitigar esse problema. A montagem dos sensores se deu em um encapsulamento de alumínio para diminuição dos ruídos, sendo os sensores acoplados com cola acrílica, a fim de que não ocorresse amortecimento da vibração devido ao elemento colante.

A Figura 55, por sua vez, apresenta a montagem do sensor em seu encapsulamento.

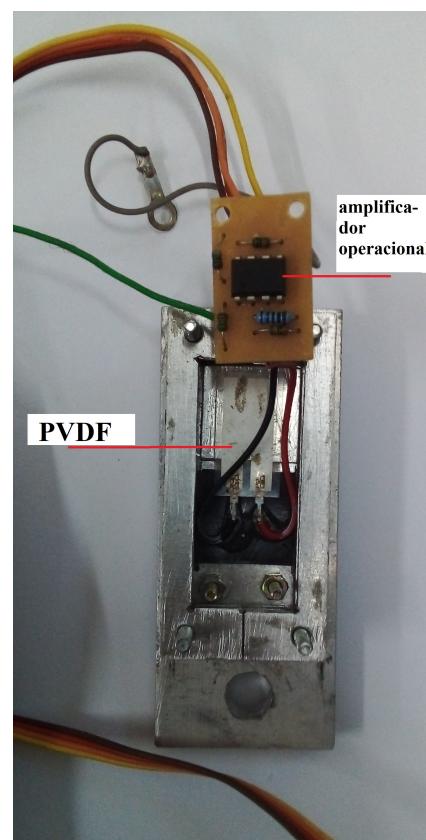
Figura 55 – Encapsulamento de alumínio com amplificador operacional e sensor filme PVDF.



Fonte: O autor (2022).

A Figura 56 mostra o sensor e o circuito amplificador operacional, montados no encapsulamento de alumínio, onde se acomoda o filme PVDF, além de amplificador operacional LM2904.

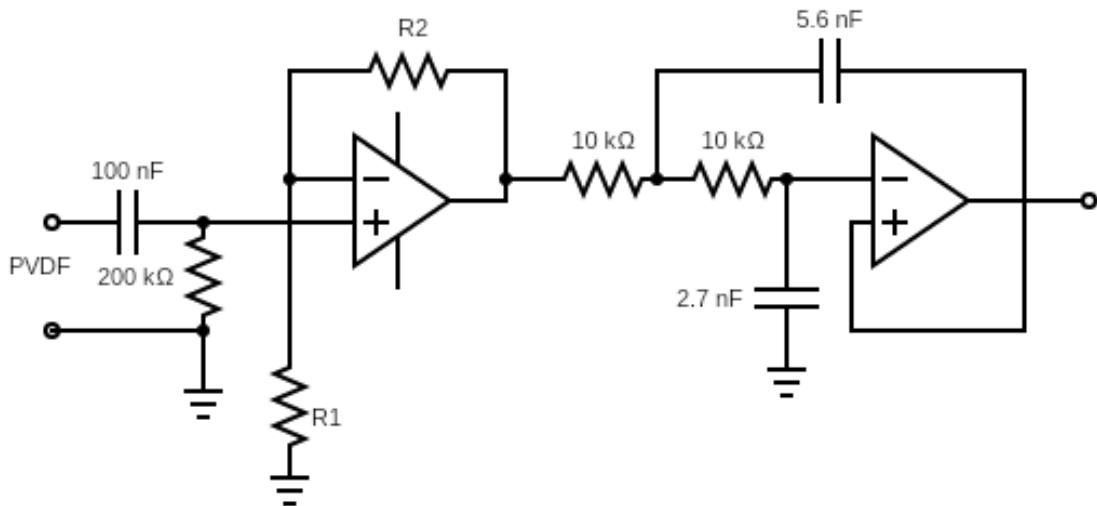
Figura 56 – Sensor de vibração piezoelétrico no encapsulamento de alumínio.



Fonte: O autor (2022).

Além destes, conforme mencionado, também foram desenvolvidos filtro passa-baixa e filtro rejeita-faixa com regulagem de frequências específicas para os problemas encontrados. A Figura ?? mostra o desenho esquemático do circuito de condicionamento do sinal do sensor piezoelétrico. Nele buscou-se a amplificação do sinal, tendo se optado pelo amplificador operacional de propósito geral LM2904, uma vez que este possui dois canais e larga banda de 1.1 MHz (ST MICROELECTRONICS, 2021). O ganho do circuito é dado por $\frac{R_1}{R_2} + 1$. Além disso o mesmo implementa um filtro passa-baixa Butterworth de 2º ordem, a fim de eliminar os ruídos de alta frequência induzidos no sensor.

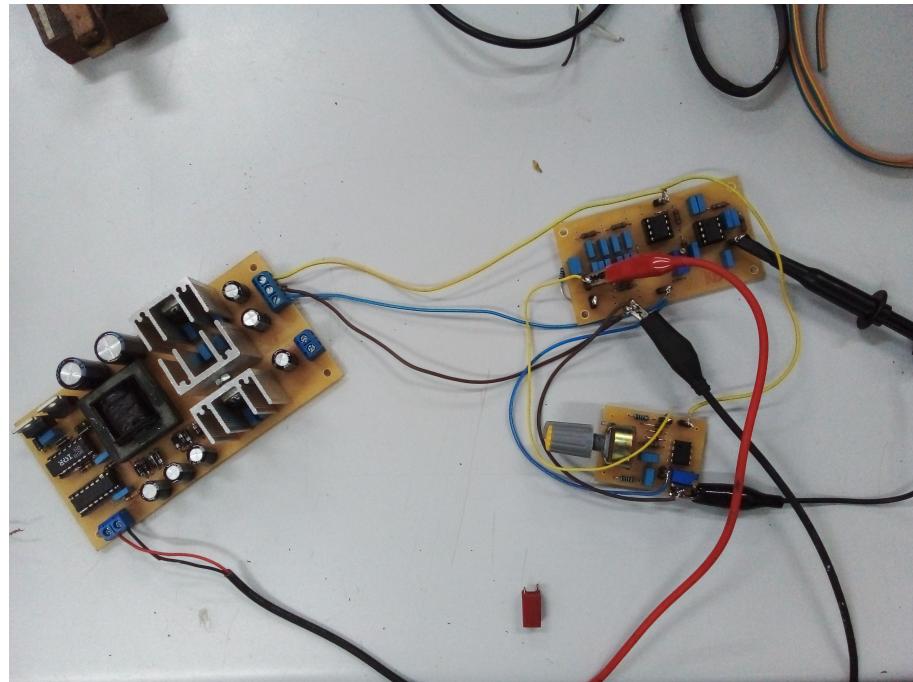
Figura 57 – Circuito amplificador operacional do sensor piezoelétrico.



Fonte: O autor (2022).

A Figura 58 mostra o circuito rejeita-faixa construído, ligado à fonte de alimentação.

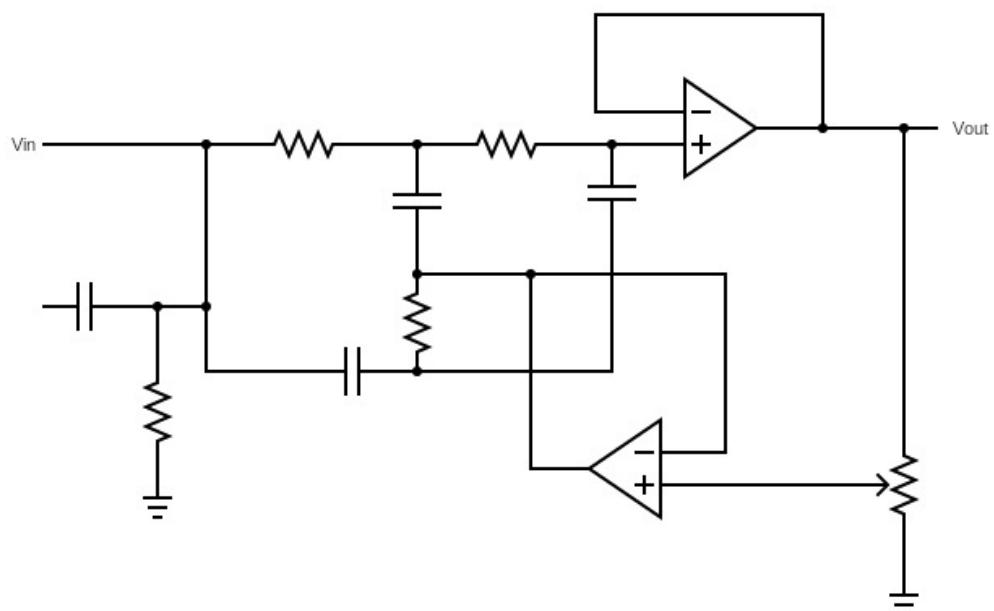
Figura 58 – Processo de teste do circuito rejeita-faixa para filtragem dos 60 Hz da rede. O circuito rejeita-faixa é indicado pela seta vermelha.



Fonte: O autor (2022).

Os capacitores foram medidos com diferença inferior a 0.5% entre si, de modo a fornecer melhor resultado no processo de filtragem. A Figura 59 apresenta o desenho esquemático do circuito rejeita-faixa.

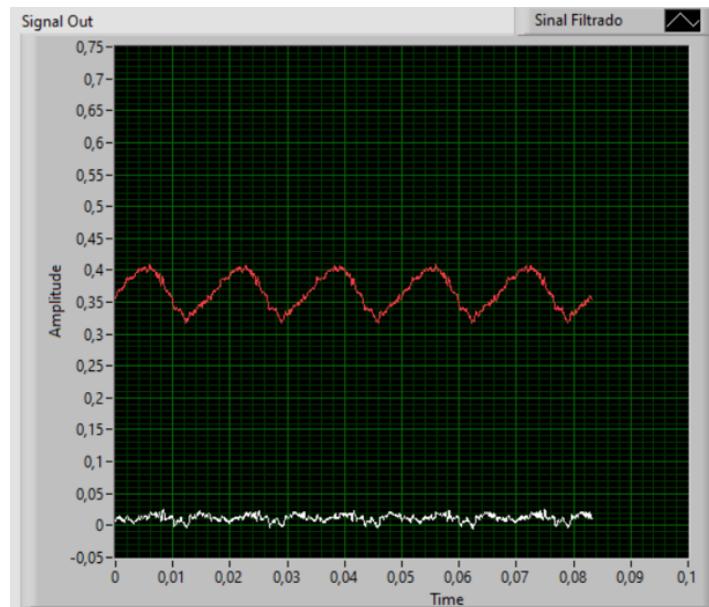
Figura 59 – Circuito rejeita-faixa para filtragem dos 60 Hz da rede.



Fonte: O autor (2022).

A Figura 60 compara os sinais pré-filtragem e pós-filtragem do sensor: em vermelho, o sinal saído diretamente do amplificador operacional sem filtragem; em branco, o sinal filtrado pelo filtro rejeita-faixa, com amplitude visivelmente menor.

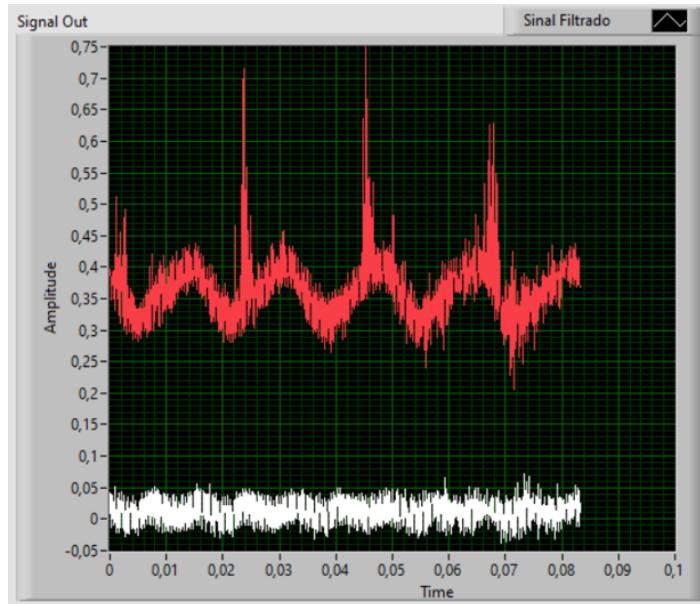
Figura 60 – Comparação do sinal filtrado com o sinal não-filtrado, com a bancada desligada.



Fonte: O autor (2022).

Já a Figura 61 denota ambos os sinais quando da bancada experimental energizada, mas com motorredutor desligado. Percebe-se um incremento nos níveis totais dos sinais de ruído elétrico, mas, ainda assim, os mesmos continuam em níveis significativamente menores do que os sinais não-filtrados.

Figura 61 – Comparação do sinal do sensor filtrado com o sinal não-filtrado, com bancada conectada à energia elétrica.



Fonte: O autor (2022).

Para verificação do sensor PVDF em relação a um sensor comercial de uso industrial, os sinais obtidos com sensor filme PVDF foram comparados a um sensor acelerômetro de um eixo com sensibilidade de 100 mV/G, obtidos com equipamento de captura de dados da marca Adash e utilização do *software* de análise Virtual Unit, também produzido pela Adash.

A Figura 62 mostra o aparato descrito.

Figura 62 – Sensor acelerômetro conectado ao equipamento de captura dos dados.



Fonte: O autor (2022).

Uma vez montados os sensores, os sinais decorrentes da vibração foram aquisitados para posterior comparação com os sinais característicos dos rolamentos sem defeitos a fim de que se determine a severidade da falha. Para tanto, foram desenvolvidos sistemas de aquisição de dados.

5.5 Aquisição dos dados

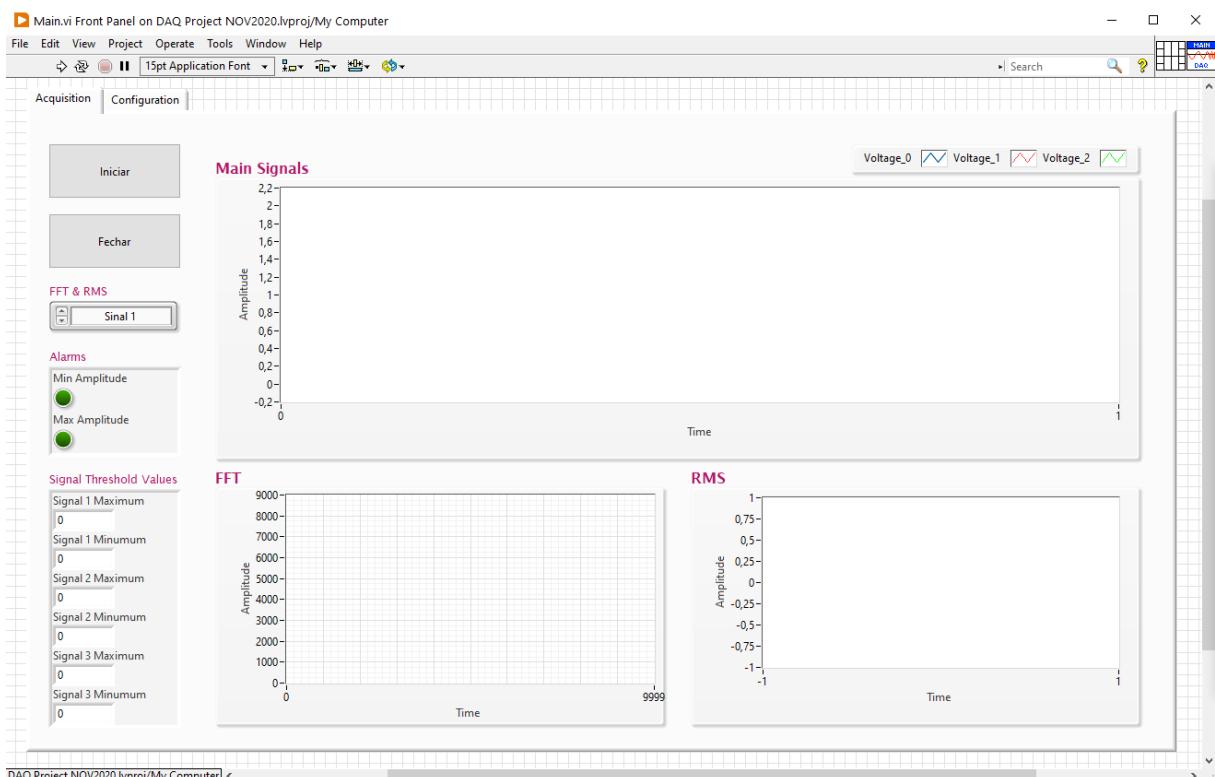
Para a aquisição de dados, foi construído software de aquisição com utilização do DAQ USB-6212 da National Instruments, com 16 entradas analógicas de 16 bits e até 400 kS/s. A Figura 63 apresenta o dispositivo utilizado.

Figura 63 – DAQ USB 6212. Retirado de National Instruments, 2021.



Em conjunto com a interface USB6212 foi utilizada a plataforma LabVIEW para construção de um Software de Aquisição, capaz de aquisitar os dados advindos do sensor PVDF e registrá-los em arquivos para posterior processamento. A Figura 64 mostra a tela de aquisição de dados do sistema desenvolvido.

Figura 64 – Sistema de aquisição desenvolvido com LabView.



Fonte: O autor (2022).

O software desenvolvido na plataforma LabVIEW encontra-se disponível no Apêndice A. Também foi desenvolvido um sistema baseado em STM32, de forma a que se possam

conduzir experimentos em trabalhos futuros para que se verifique a possibilidade de um sistema completo de baixo custo com finalidades de manutenção preditiva, incluindo-se, aí, a aquisição e processamento dos dados. Este encontra-se disponível no Apêndice B.

5.6 Métodos de análise dos dados

Para análise dos dados obtidos foram desenvolvidos programas na plataforma MatLab e Python. Foram adotados os métodos descritos durante a Revisão Bibliográfica, em particular a densidade espectral de potência, nível RMS, FFT, e Análise de Envelope com utilização de pré-processamento dos dados com modelo de autoregressão e seleção de banda por meio de Curtose Espectral. O código para análise de Envelope baseou-se no disponibilizado por Kim et al., 2020. Os códigos para esses programas de análise dos dados podem ser encontrados no apêndice C.

Para construção desses códigos foi utilizada a plataforma Anaconda e o Jupyter Notebook de Python, bem como a plataforma Octave, alternativa livre ao sistema Matlab, sendo possível verificar o funcionamento dos métodos de análise em ferramentas de software livre, com licenças do tipo BSD.

5.7 Definição dos experimentos

A definição dos experimentos se deu a partir de diferentes cenários de caracterização dos sinais em função da necessidade de avaliação do sinal gerado pelo sensor, acoplado à caixa de rolamento, enquanto sujeito a diferentes níveis de interferências eletromagnéticas, pois, como descrito na seção 5.4 há possibilidade de interferências eletromagnéticas no sensor por sua natureza de alta impedância.

Para condução da aquisição destes distintos cenários as taxas de aquisição foram baseadas nos modelos encontrados em outros artigos, tais como Kim et al., 2020, as quais respeitam o critério de Nyquist para representação do espectro de frequências de interesse. Optou-se pela captura, nas taxas de aquisição descritas na Tabela 1, por dois minutos ininterruptos em cada caso – tempo suficiente para captura de um conjunto de rotações do eixo e, portanto, das frequências características dos danos nos rolamentos.

Inicialmente as análises foram feitas com os sinais obtidos com utilização do filtro analógico e sem qualquer filtragem, apenas com amplificação proveniente do amplificador operacional. Contudo, após análise preliminar, as amostras obtidas apenas com amplificação e sem filtragem mostraram-se demasiadamente ruidosa. Assim, os experimentos prosseguiram a partir da aquisição dos sinais filtrados.

Desta forma, os parâmetros de aquisição dos dados analisados até o momento foram definidos e encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Cenários de caracterização dos sinais.

Identificação	Condições	Taxa de aquisição
Caso 1	Bancada não-energizada	25.6khz
Caso 1	Bancada energizada	25.6khz
Caso 2	Caracterização do motorredutor, eixo a 37 RPM de velocidade	25.6khz
Caso 3	Rolamento em bom estado, eixo a 37 RPM	25.6khz
Caso 4	Rolamento com dano no elemento rolante, eixo a 37 RPM	25.6khz
Caso 5	Rolamento com dano na pista externa, eixo a 37 RPM	25.6khz
Caso 6	Rolamento com dano na pista externa e rolamento com dano no elemento rolante, com utilização de sensor acelerômetro e eixo a 37 RPM	25.6khz
Caso 6	Rolamento com dano na pista externa e rolamento com dano no elemento rolante, com utilização de sensor acelerômetro e eixo a 61,3 RPM	25.6khz

Fonte: O autor (2022).

Os danos nos rolamentos foram inseridos manualmente. A Figura 65 mostra o dano introduzido no elemento rolante, onde é possível verificar o desbaste de um dos rolos, com utilização de uma retífica de elétrica.

Figura 65 – Dano introduzido no elemento rolante. A seta vermelha aponta para o elemento rolante onde o dano foi inserido.



Fonte: O autor (2022).

Já a Figura 66 mostra o processo de inserção de dano na pista externa, realizado por meio de processo de eletroerosão.

Figura 66 – Processo de inserção do dano na pista externa.



Fonte: O autor (2022).

A Figura 67 apresenta o rolamento com dano inserido na pista externa. A seta vermelha aponta o furo realizado. O furo imediatamente ao lado é característico do rolamento, não representando um defeito - os elementos rolantes não têm contato com ele, cuja finalidade é a vazão de possível excesso de graxa, caso esta seja utilizada como lubrificante.

Figura 67 – Pista externa com dano inserido. A seta vermelha aponta o furo realizado na pista externa.



Fonte: O autor (2022).

6 Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados dos experimentos realizados com o sensor filme PVDF, com as análises discutidas à luz da revisão bibliográfica.

6.1 Caso 1 - caracterização dos sinais de falha com utilização de sensor acelerômetro

Com uso do sensor acelerômetro de uso comercial a caracterização dos sinais do rolamento em bom estado e do motorredutor foi realizada, a fim de que se conhecessem os padrões de vibração dos conjuntos experimentais e que se pudesse, assim, determinar com precisão as falhas nos rolamentos. Após a determinação das frequências dominantes presentes nestes componentes, a análise dos rolamentos com falha no elemento rolante e na pista externa foi feita com uso das técnicas de análise temporal, espectral e demodulação do espectro de frequências, conforme descrito na literatura.

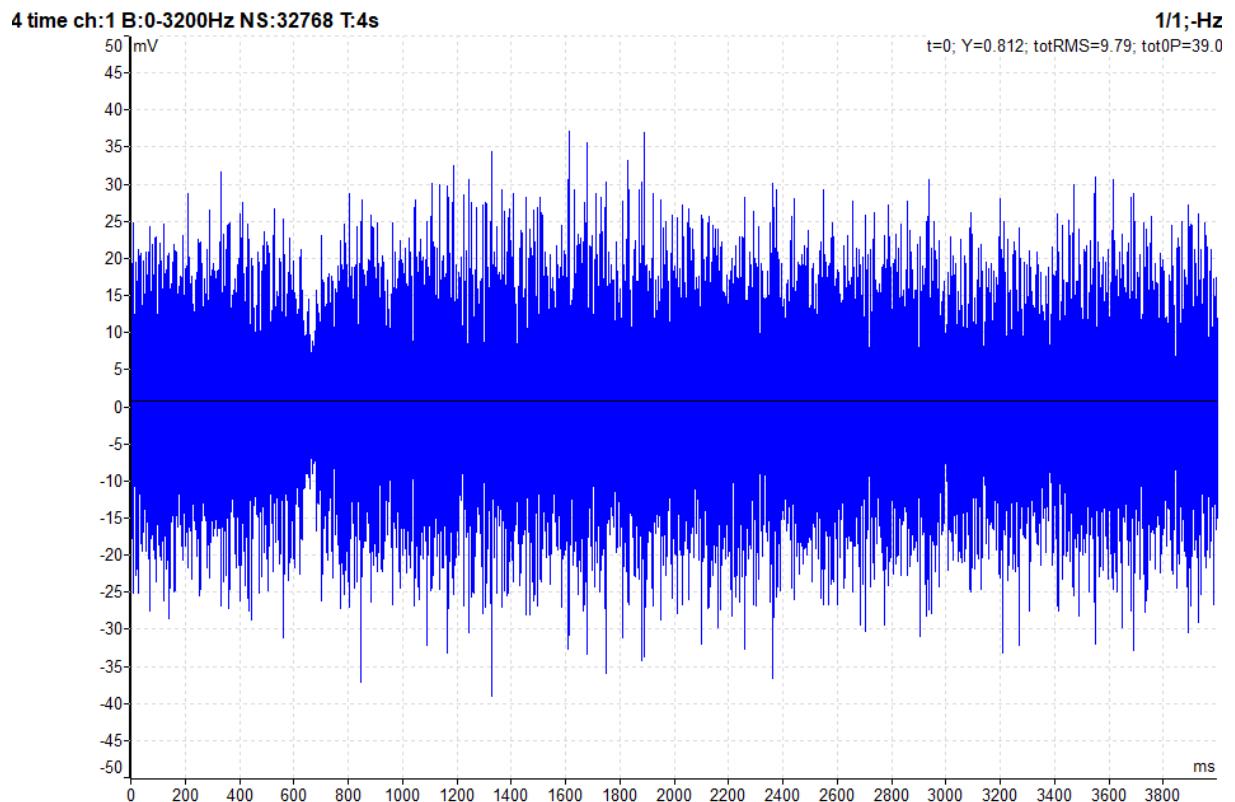
A partir dos experimentos, obtiveram-se resultados apresentados a seguir.

6.1.1 Motorredutor

O primeiro passo adotado para possibilitar a identificação das falhas dos rolamentos foi a caracterização do sinal do motorredutor. Para tanto, o sensor acelerômetro foi posicionado próximo à saída da caixa de redução, local em que há maior possibilidade de transmissão das vibrações provenientes da caixa de redução para o eixo motriz.

O sinal temporal do motorredutor pode ser visto na Figura 68.

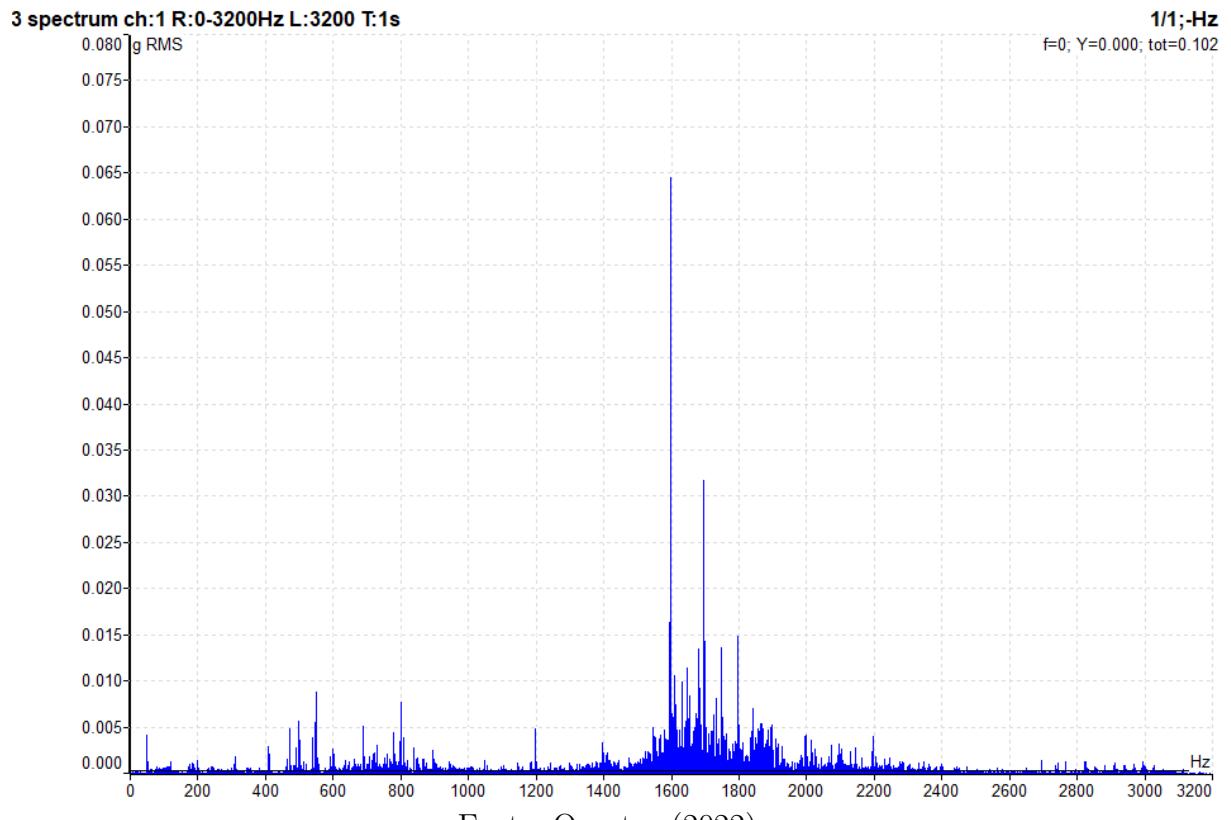
Figura 68 – Sinal temporal do motorredutor sob rotação de 61,3 RPM.



Fonte: O autor (2022).

A Figura 69 mostra o espectro de frequências do motorredutor, com grande pico e concentração na região dos 1600 Hz, bem como picos menores em 50 Hz, frequência de rotação do motor, e nos 500 Hz, 550 Hz, 600 Hz e 800 Hz, provenientes da caixa de redução.

Figura 69 – Espectro de frequências do motorredutor sob rotação de 61,3 RPM.

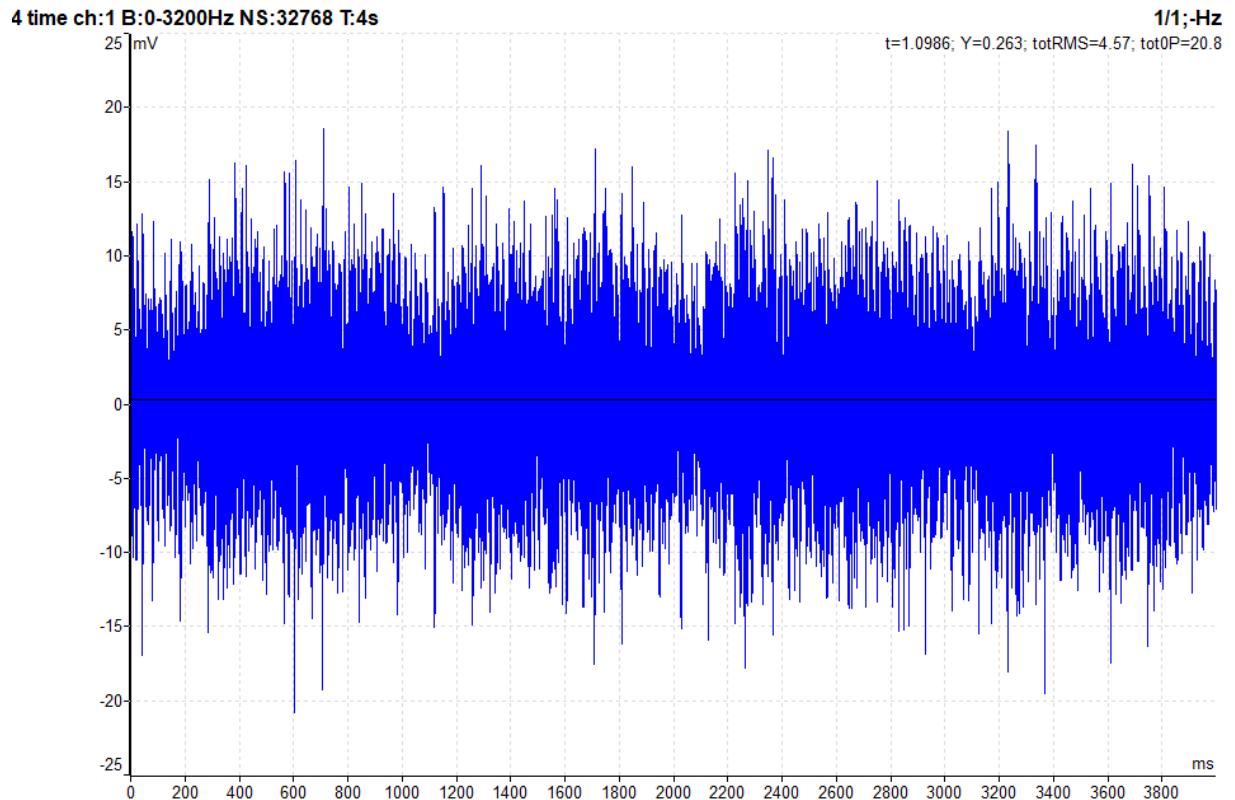


Fonte: O autor (2022).

6.1.2 Rolamento em bom estado

Para o sinal do rolamento em bom estado, foram adotados os mesmos métodos do conjunto motorredutor. Primeiro o sinal do rolamento foi analisado no domínio do tempo, apresentado na Figura 70.

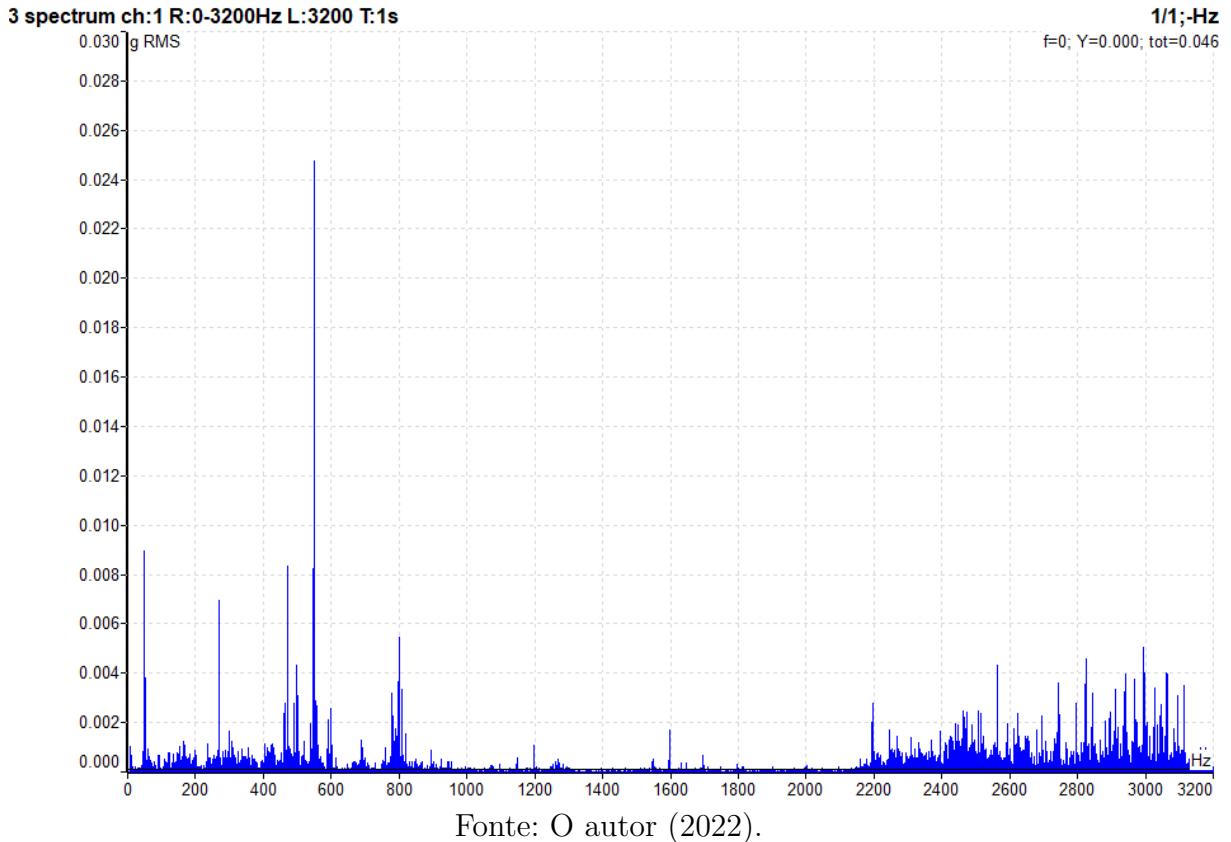
Figura 70 – Sinal temporal do rolamento em bom estado sob rotação de 61,3 RPM.



Fonte: O autor (2022).

A partir da representação temporal, é possível verificar que a amplitude pico a pico do sinal do rolamento em bom estado é menor que a amplitude de saída do motorredutor. A Figura 71 mostra o sinal do espectro do rolamento.

Figura 71 – Espectro de frequências do rolamento em bom estado sob rotação de 61,3 RPM.



Aparecem neste espectro as frequências de 1 Hz, velocidade de rotação do eixo, 50 Hz, velocidade de rotação do motor ainda cuja frequência ainda aparece sendo transmitida pelo eixo, bem como, e principalmente, as frequências de picos presentes na saída do motorredutor: 500 Hz, 550 Hz, 600 Hz e 800 Hz. O pico mais elevado, neste caso, está nos 550 Hz. É importante notar, entretanto, que apesar do pico estar mais destacado aqui, há menor amplitude destas frequências em relação ao sinal medido na saída do motorredutor. Percebe-se, portanto, a transmissão, pelo eixo motriz, das frequências do motorredutor. Esta informação é relevante para a adequada análise dos sinais das falhas dos rolamentos.

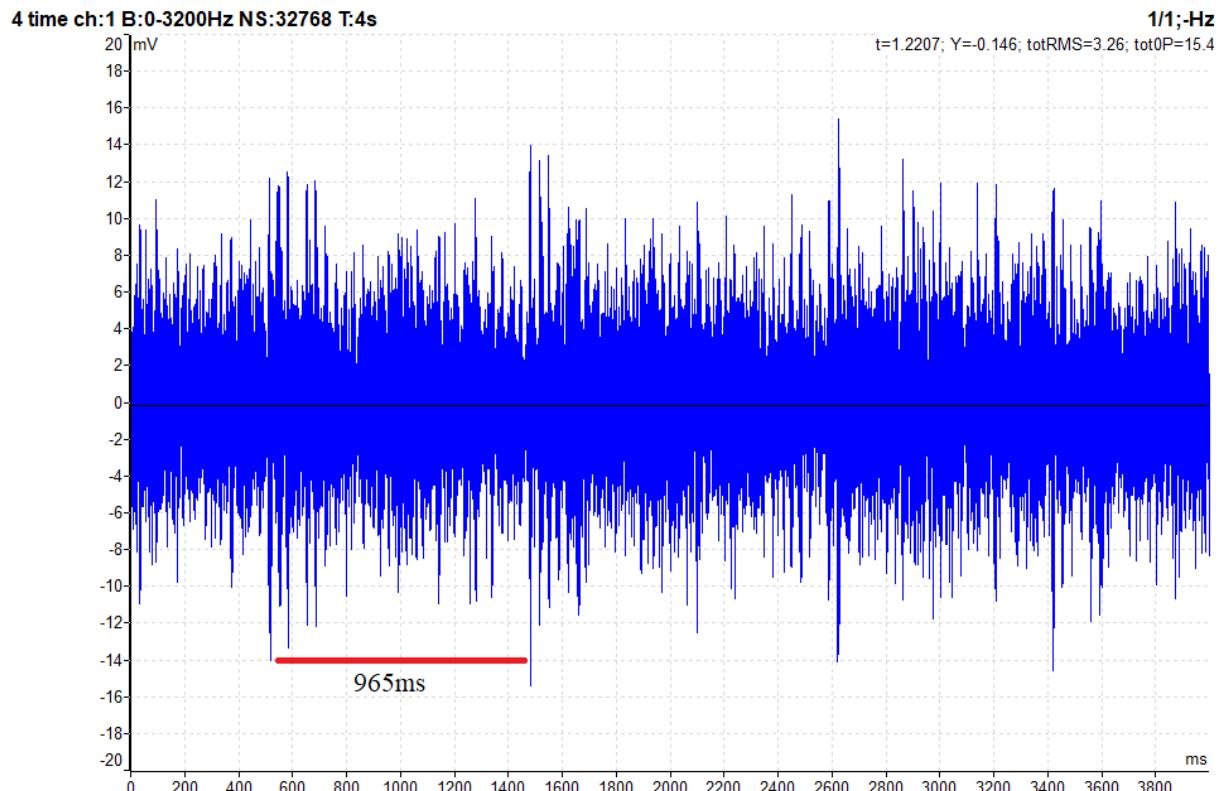
6.1.3 Falha no elemento rolante

Com a velocidade do eixo em 61,3 RPM, calculou-se a frequência de defeito no elemento rolante foi calculada em 2.5 Hz. Sabe-se que os sinais aparecem em duas vezes esta frequência - dado que o dano no elemento rolante atinge as pistas externa e interna a

cada revolução. Assim, procurou-se os danos em duas vezes a BSF, sabendo-se, também, que estes apresentam bandas laterais na *fundamental train frequency* do rolamento.

A partir da análise dos sinais obtidos nos eixos vertical e horizontal, verificou-se que o eixo vertical permitiu uma identificação mais clara do dano no elemento rolante. Os resultados são, portanto, apresentados com base neste eixo. A Figura 72 mostra o sinal temporal do rolamento com dano no elemento rolante.

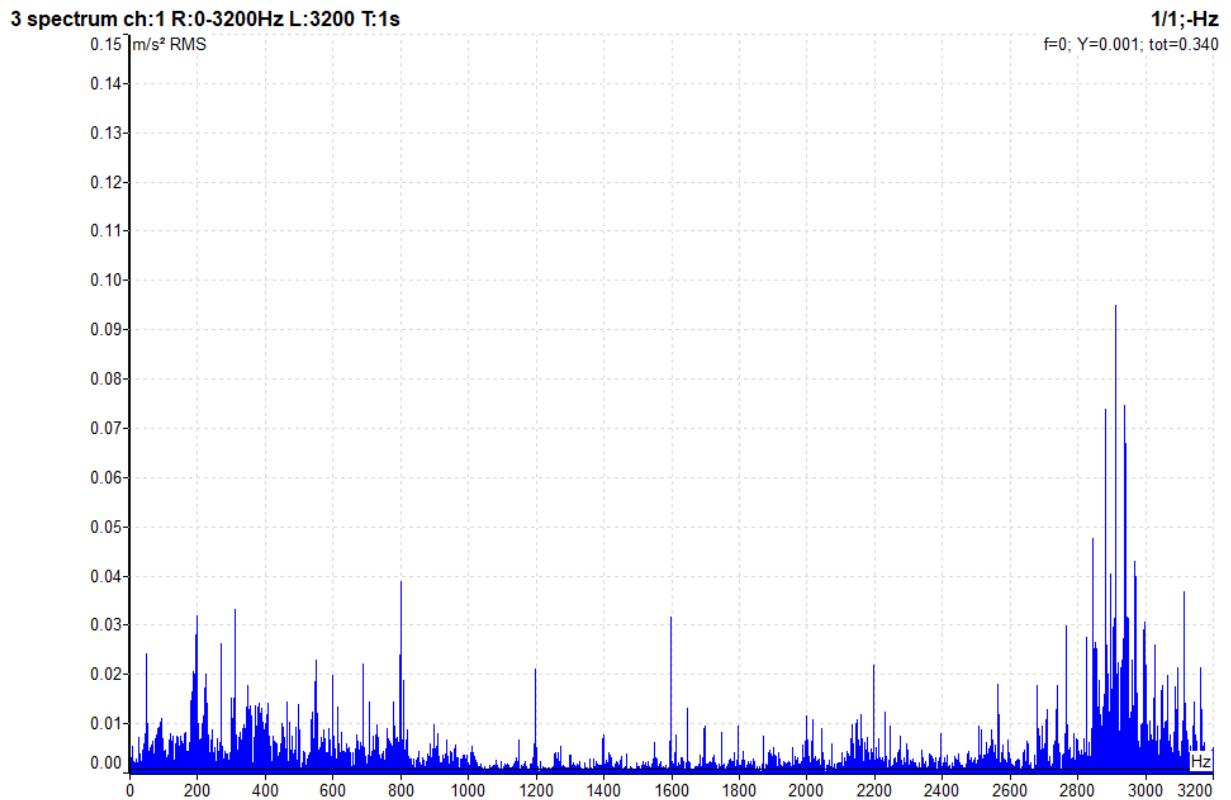
Figura 72 – Sinal temporal do rolamento com dano no elemento rolante sob rotação de 61,3 RPM.



Fonte: O autor (2022).

Tendo-se em vista a velocidade de rotação, temos uma frequência do eixo de aproximadamente 1.03 Hz, equivalente a um intervalo de 970ms por revolução. É possível verificar uma sequência de picos com intervalo aproximado deste tempo, identificando a revolução do eixo. O dano no elemento rolante, entretanto, é de difícil identificação através da análise no domínio do tempo. Para que este fosse mais facilmente identificado, aplicou-se a análise espectral, verificando a amplitude em cada uma de suas frequências. A Figura ?? mostra o espectro do sinal.

Figura 73 – Sinal espectral do rolamento com dano no elemento rolante sob rotação de 61,3 RPM.

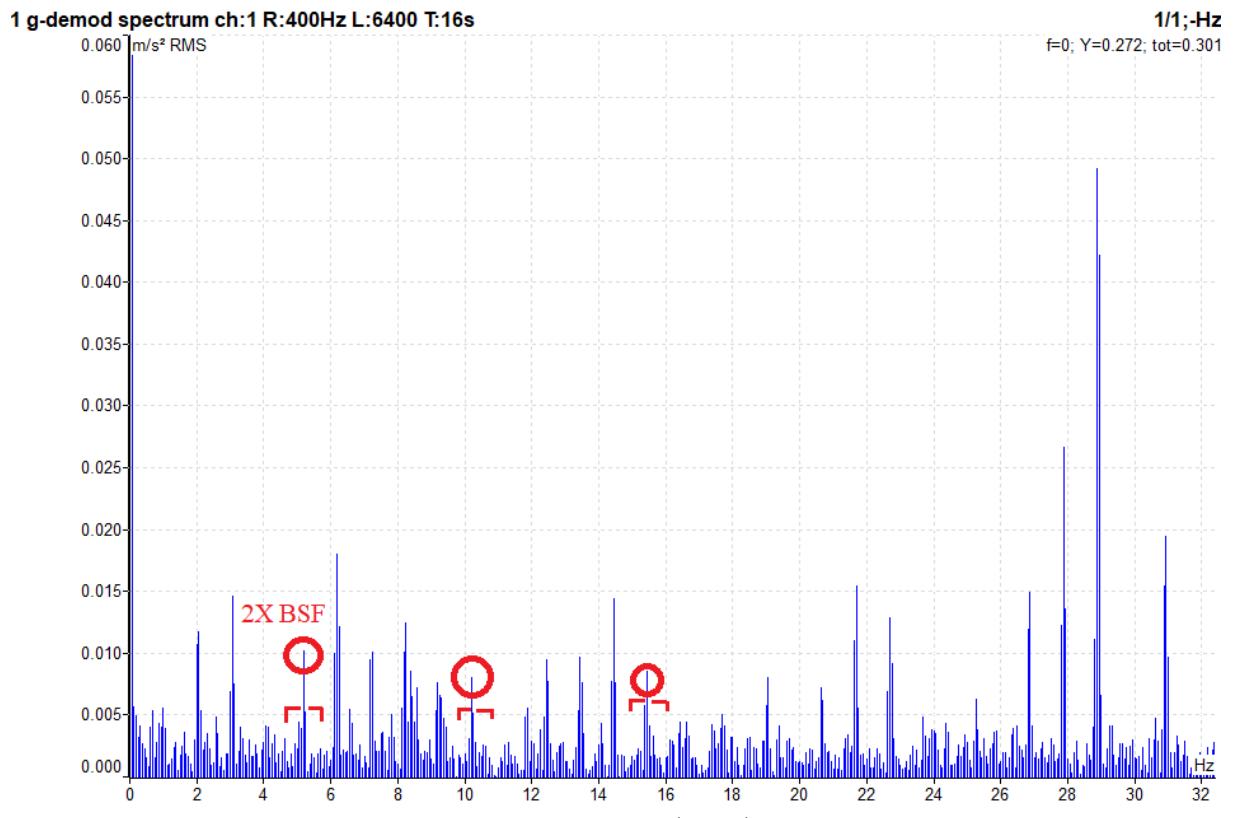


Fonte: O autor (2022).

O sinal do espectro apresenta um nível elevado de energia espalhado pelo espectro, com algumas frequências marcantes em relação.

Percebe-se uma grande quantidade de energia concentrada na região de frequências mais elevadas, em particular na que compreende, aproximadamente, dos 2850 Hz aos 3050 Hz. Demodulando-se o sinal do rolamento a partir desta faixa de frequências, obtém-se o espectro da Figura 74.

Figura 74 – Sinal espectral demodulado do rolamento com dano no elemento rolante.



Fonte: O autor (2022).

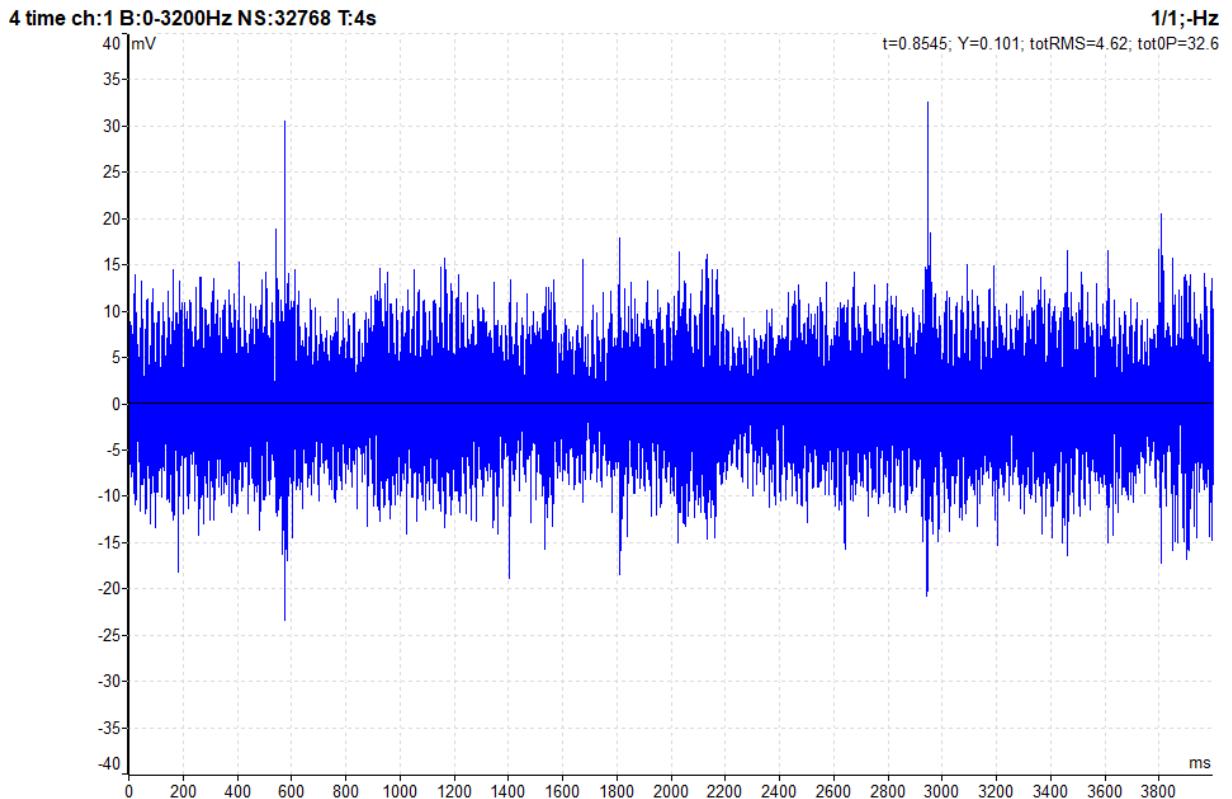
Nele pode-se verificar mais marcadamente os picos de baixas frequências, em particular picos bastante próximos pela frequência calculada para duas vezes BSF. É possível verificar a existência de um pico em aproximadamente 5.1 Hz, bem como a existência de bandas laterais neste pico, de aproximadamente 0.4 Hz, compatível com o esperado para a FTF. Verifica-se também a existência de frequências harmônicas de amplitude ligeiramente menor que a frequência base da falha, apontadas nos círculos vermelhos, que apresentam o mesmo padrão e confirmam a identificação da falha no elemento rolante.

6.1.4 Falha na pista externa

Para identificação na falha da pista externa, seguiram-se os mesmos procedimentos adotados na identificação da falha da pista interna. Entretanto, no caso do dano na pista externa, o eixo horizontal apresentou uma identificação mais clara do dano. Isto se deve à colocação do rolamento no eixo, com o dano na pista externa posicionado próximo à

lateral da caixa. A Figura ?? apresenta o sinal temporal obtido com o sensor acelerômetro no eixo horizontal.

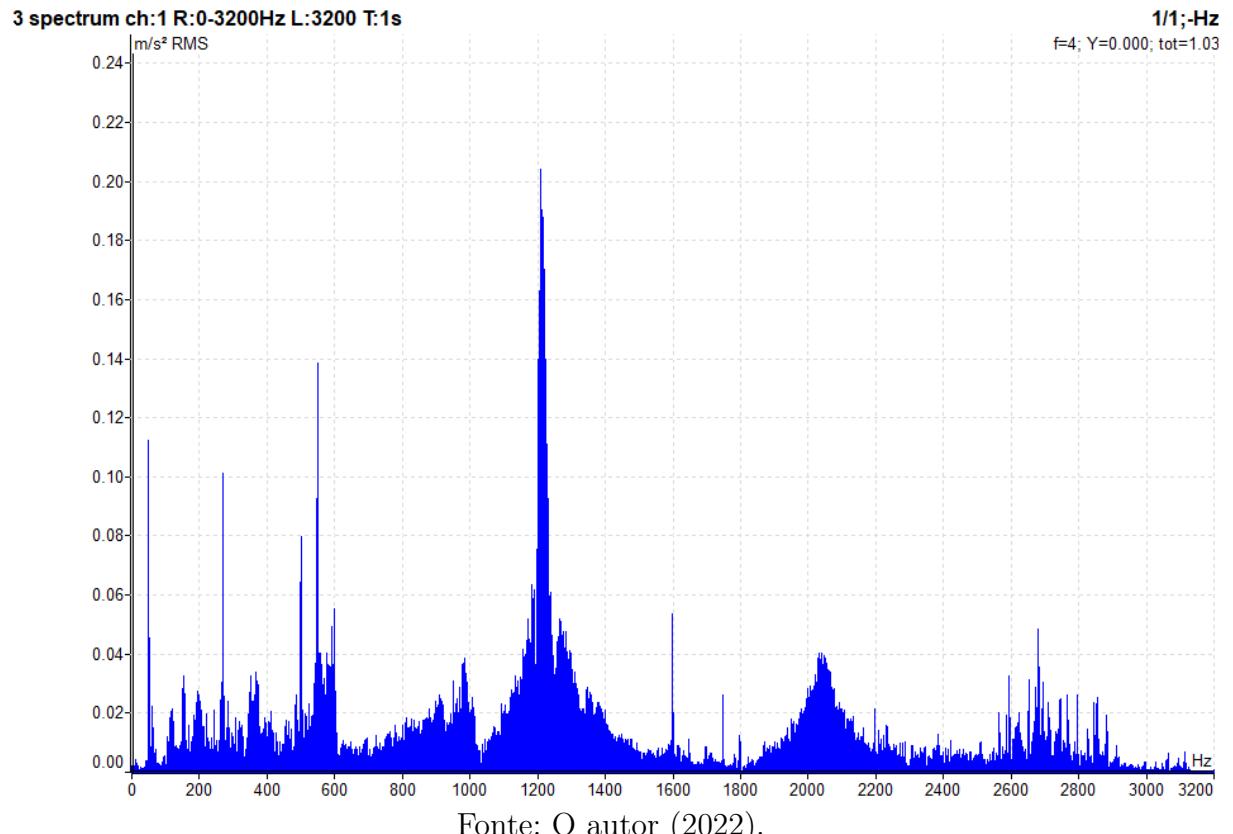
Figura 75 – Sinal temporal do rolamento com dano na pista externa.



Fonte: O autor (2022).

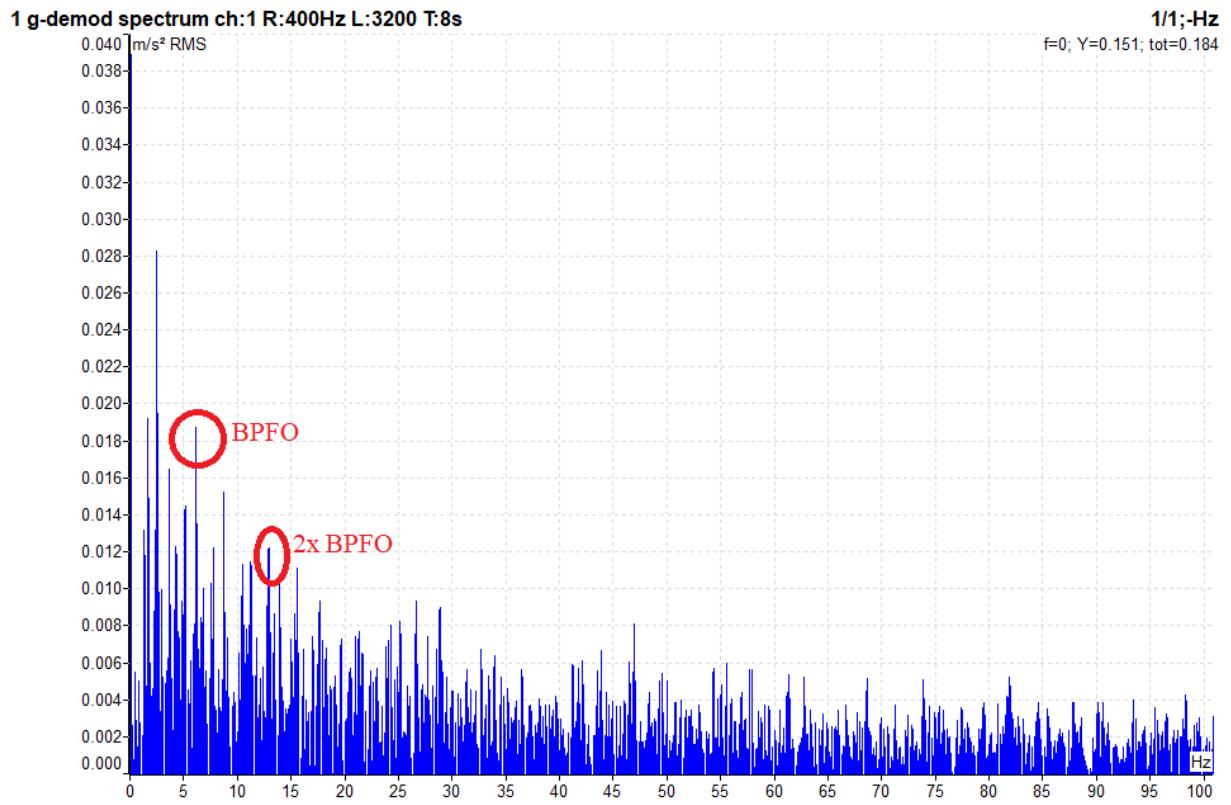
A Figura 76 mostra o espectro do sinal da pista externa, onde são perceptíveis picos na região, principalmente, dos 1200 Hz.

Figura 76 – Sinal espectral demodulado do rolamento com dano na pista externa.



Demodulando-se o sinal, obtém-se o resultado apresentado na Figura 77.

Figura 77 – Indicações das harmônicas no sinal espectral demodulado do rolamento com dano na pista externa.



Fonte: O autor (2022).

A frequência de BPFO calculada para a BPFO nesta rotação de eixo foi de 5.41 Hz, com o pico medido se dando próximo aos 6 Hz o que sugere, portanto, a ocorrência do BPFO. A harmônica de duas vezes o BPFO também aparece no espectro, precisamente no dobro da frequência medida para a falha. Sua amplitude é menor que a BPFO, o que aponta se tratar de uma harmônica desta, tal como verificado na literatura.

6.2 Caso 1 - caracterização do sinal do sensor PVDF

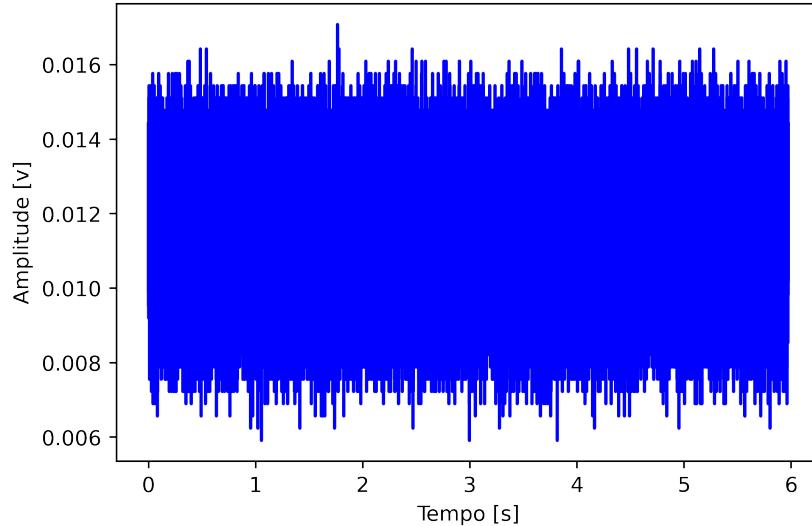
Para caracterização do sinal inerente ao sensor, submetido ao circuito de condicionamento e filtragem do sinal, foram feitos os seguintes experimentos descritos na Tabela 1: 1) aquisição do sinal do sensor com o maquinário desligado e desconectado da energia elétrica; 2) aquisição com o maquinário desligado, mas conectado à energia elétrica; 3) maquinário energizado, mas com motor parado. A finalidade destes experimentos foi de, inicialmente, verificar o nível de ruído do sinal em termos de interferências eletromagnéticas no ambiente.

Para que se conduzissem os experimentos deste cenário o sensor foi posicionado no rolamento e seu sinal aquisitado a uma taxa igual à taxa de aquisição dos ensaios.

Os três cenários distintos propostos visaram à verificação da amplitude de ruídos elétricos que ainda fossem capazes de interferências no sinal.

A Figura 78 mostra o sinal temporal da bancada de ensaios desconectado da energia elétrica.

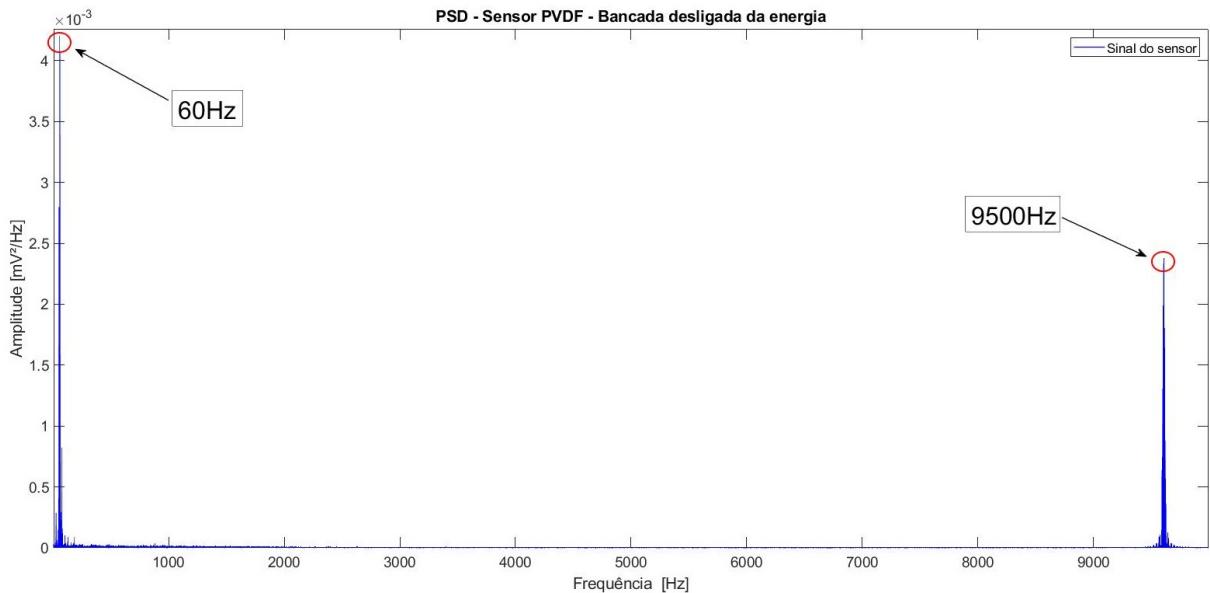
Figura 78 – Sinal temporal da bancada desconectada da energia elétrica.



Fonte: O autor (2022).

O sinal temporal aponta a presença de um ruído, com amplitude pico a pico de aproximadamente 10 mV. Calculando-se o FFT e o PSD do sinal, foi obtido o resultado mostrado na Figura 79.

Figura 79 – Espectro do sinal da bancada desconectada da energia elétrica.

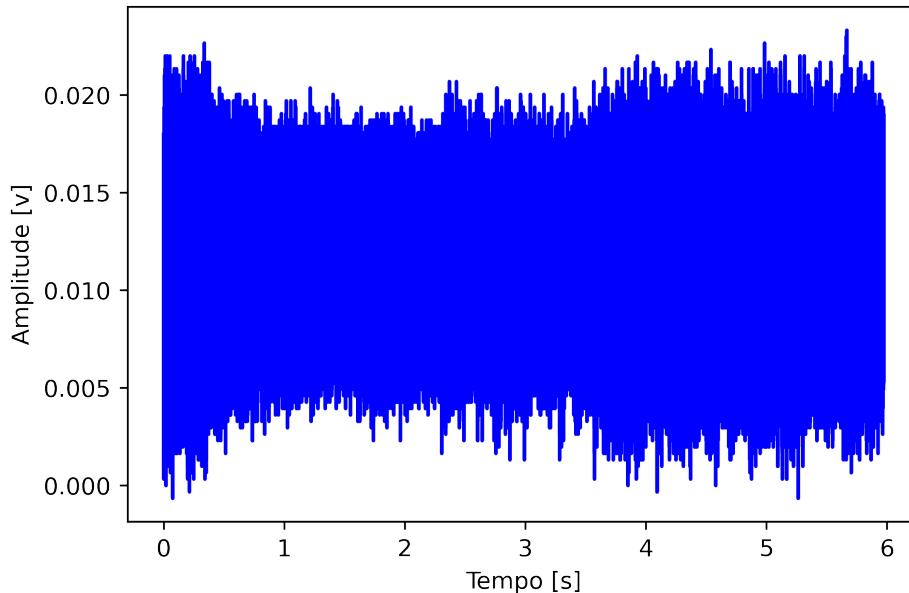


Fonte: O autor (2022).

É possível verificar que o espectro possui um elevado pico na região dos 60 Hz e dos 9500 Hz, sem a presença de energia significativa nas demais faixas de frequência. Considerando-se que apenas o conjunto de circuitos de condicionamento do sinal estava ligado à energia neste momento, conclui-se que o referido ruído foi induzido pela própria fonte de alimentação do mesmo, por interferência do ambiente ou por ruído inerente ao próprio circuito. Ou seja, ainda que os circuitos condicionadores tenham sido capazes de atenuar as componentes de interferência elétrica, componentes de ruído elétrico ainda se mostraram presentes ainda que em pequena amplitude.

A partir dessa constatação e para que se verificasse o quanto estes sinais seriam presentes nas componentes de frequência durante o processo de aquisição dos dados, foi assim proposto o experimento de aquisição dos dados com a bancada ligada à tomada, mas não energizada. A Figura 80 mostra o sinal temporal da bancada quando conectada à energia elétrica.

Figura 80 – Sinal temporal da bancada conectada à energia elétrica.

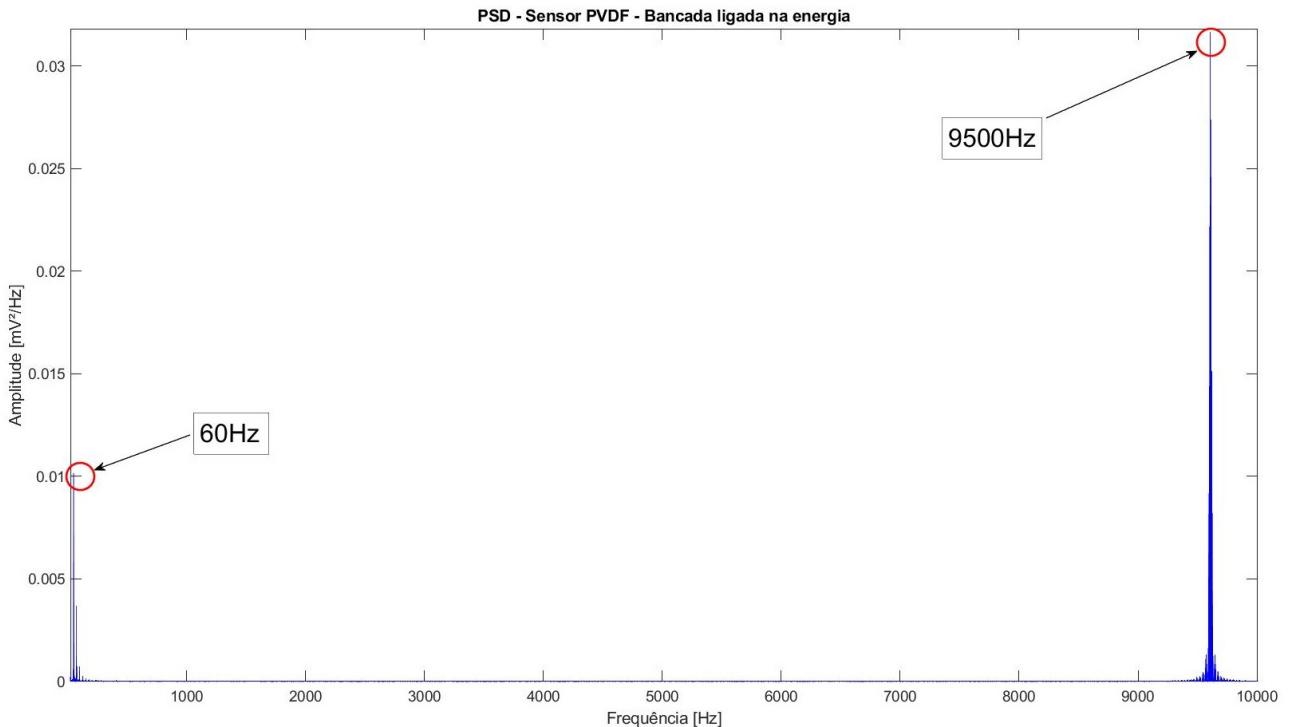


Fonte: O autor (2022).

A partir do sinal temporal desse experimento foi possível verificar o incremento na amplitude do sinal, bem como novos componentes de frequência induzidos. A amplitude de tensão pico a pico cresceu para aproximadamente 20 mV, o dobro em relação ao experimento anterior. Em ensaios preliminares, com as versões anteriores do conjunto eletrônico de condicionamento e encapsulamento, o sinal de ruído chegava aos 215 mV.

A Figura 81 mostra as componentes deste sinal, compostas tanto pelos 60 Hz anteriormente identificados quanto pela componente de alta frequência, centrada na faixa dos 9500 Hz, cuja origem não pode ser identificada.

Figura 81 – Espectro de densidade de potência da bancada conectada à energia elétrica.

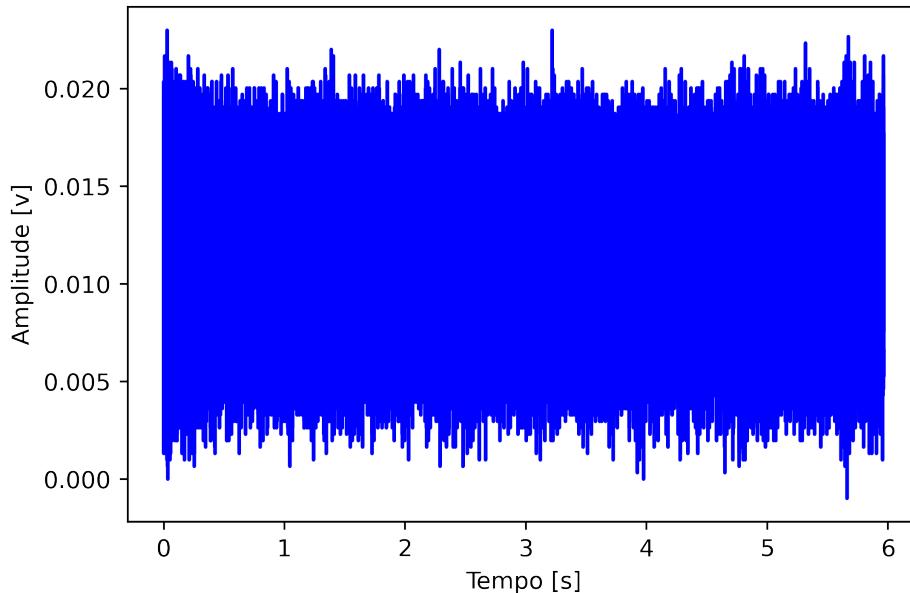


Fonte: O autor (2022).

Estas interferências, presume-se, devem-se à natureza de alta impedância do sensor filme PVDF bem como à ruídos de alta frequência do ambiente ou do próprio circuito.

Assim, verificando-se o aumento dos sinais de interferência elétrica ao ligar a bancada na energia elétrica, foi proposto o experimento de aquisição dos dados com a bancada energizada, mas não em funcionamento. A Figura 82 mostra o sinal temporal desse caso.

Figura 82 – Sinal temporal da bancada conectada à energia elétrica e energizada.

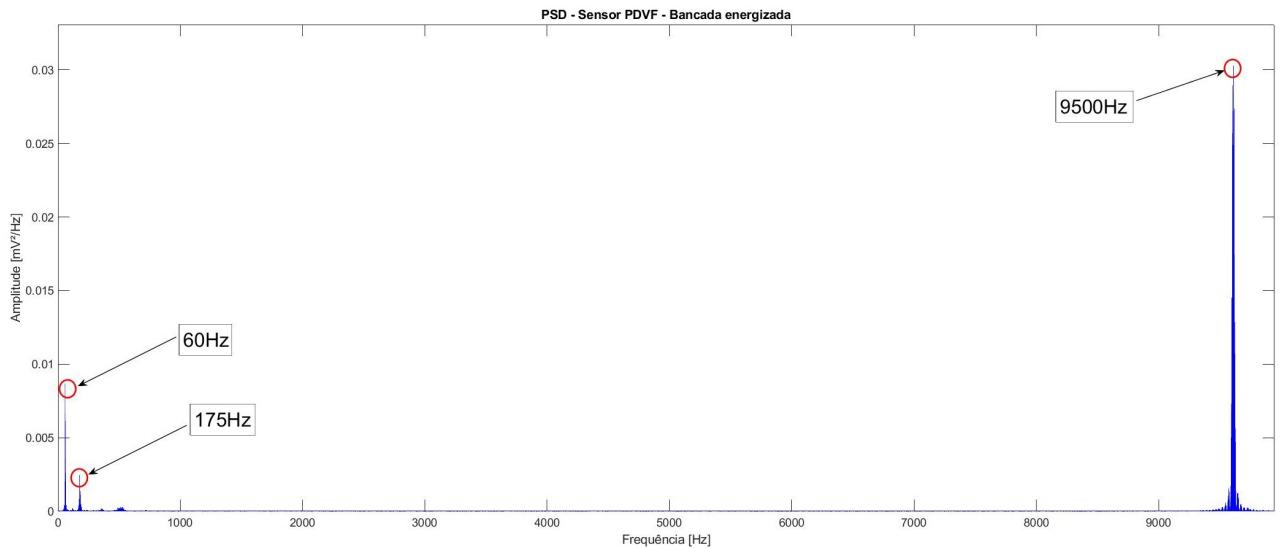


Fonte: O autor (2022).

É possível verificar, nesse caso, que a amplitude pico a pico dos sinais manteve-se em aproximadamente 20 mV. Em ensaios preliminares, nesse caso, o a amplitude pico a pico dos sinais mostrava-se superior a 250 mV.

Já em relação ao sinal espectral, como é possível visualizar na Figura 83, o mesmo aponta picos na região dos 60 Hz e dos 9500 Hz. Há também o aparecimento de uma frequência nos 175 Hz. Isso ocorre pela indução causada pelos elementos da bancada de testes, agora energizados, tal como o próprio motorredutor e o inversor de frequências.

Figura 83 – Espectro de densidade de potência da bancada conectada à energia elétrica e energizada.



Os resultados desta caracterização de ruídos encontram-se sumarizados na Tabela 2

Tabela 2 – Caracterização do ruído elétrico capturado pelo sistema

Caracterização do ruído do sensor	Valor pico a pico	Frequências dominantes
Bancada desligada da energia elétrica	Aproximadamente 10mv	Espectro com picos nos 60Hz e 9500Hz
Bancada ligada na energia elétrica	Aproximadamente 20mv	Espectro demonstrando uma concentração de ruído nos 60Hz e pico por volta dos 9500Hz
Bancada ligada na energia elétrica e energizada	Aproxidamente 20mv	Espectro demonstrando pico nos 9500Hz e ruído nos 60Hz e 175Hz

Fonte: O autor (2022).

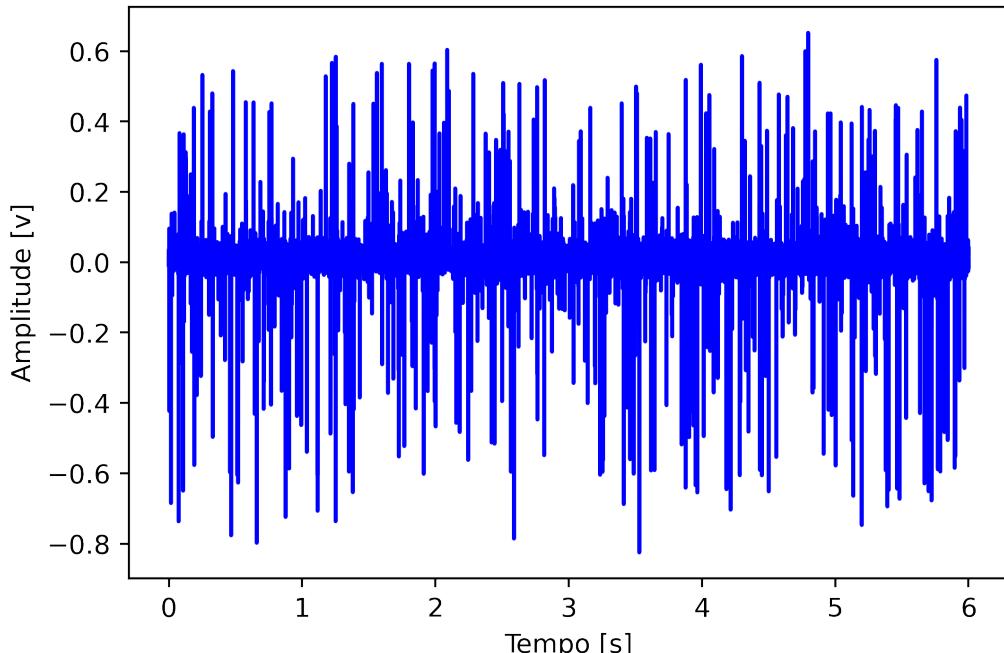
Nota-se que a amplitude dos sinais aumenta consideravelmente quando a bancada está conectada à rede elétrica, demonstrando, por um lado, que há baixa indução de ruídos causada pela própria fonte de alimentação do circuito condicionador de sinal. Por outro lado, há uma quantidade de ruído advinda do próprio ambiente. Conforme apontado por Brisebois, 2006, sensores de alta impedância podem sofrer ruídos por uma série de fatores, tais como ruído externo, resíduos de fluxo de solda, correntes de polarização, dentre outros. Contudo, uma vez caracterizados tais ruídos, eles podem ser considerados ao se analisar os resultados para verificação da viabilidade do filme PVDF na aplicação proposta.

6.3 Caso 2.1 - caracterização do sinal do motorredutor com sensor PVDF

Após a caracterização das interferências elétricas que seriam inerentes ao sensor, o padrão de vibrações do motorredutor foi caracterizado com o sensor PVDF, a fim de que fossem verificadas suas frequências. Isso foi necessário pois as frequências geradas pelo conjunto motorredutor não eram, à priori, conhecidas. Assim, para que se evitassem possíveis confusões ao se caracterizarem os sinais de rolamentos, caso, por coincidência, alguma das frequências de defeito esperadas fossem iguais às do motorredutor, tal caracterização foi proposta.

Para tanto o sinal foi aquisitado durante dois minutos ininterruptos, tendo sido processados e aqui apresentados, para manutenção da consistência com os demais comparativos realizados, os primeiros seis segundos do sinal. A Figura 84 mostra o referido sinal no domínio do tempo.

Figura 84 – Sinal temporal do motorredutor.



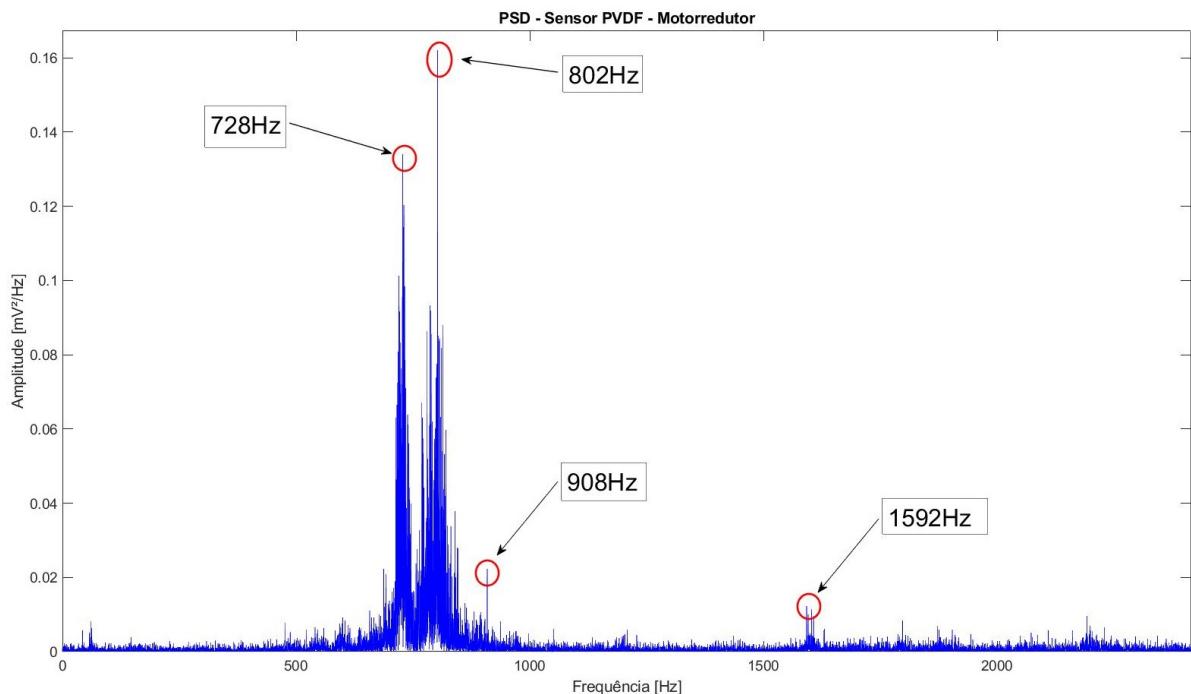
Fonte: O autor (2022).

Percebe-se um incremento significativo nos valores de tensão quando comparado às caracterizações do ruído captado pelo sensor, atingindo por volta de 1.4 V pico a pico. Isto

mostra, inicialmente, uma evidência de que a tensão gerada pela deformação mecânica do sensor é bastante superior às tensões de ruído elétrico.

Contudo, analisando-se o caso no domínio das frequências é possível notar, ao se analisar o PSD do experimento, que as frequências dominantes ainda se mantém centradas nos ruídos anteriormente detectados. A Figura 85 mostra os picos de energia contidos no sinal, com os respectivos destaques nas frequências proeminentes.

Figura 85 – Espectro de densidade de potência do motorredutor.



Fonte: O autor (2022).

A partir desta filtragem verifica-se uma predominância de frequências na região dos 728 Hz e dos 802 Hz. Também é possível verificar picos isolados por volta dos 908 Hz e dos 1592 Hz.

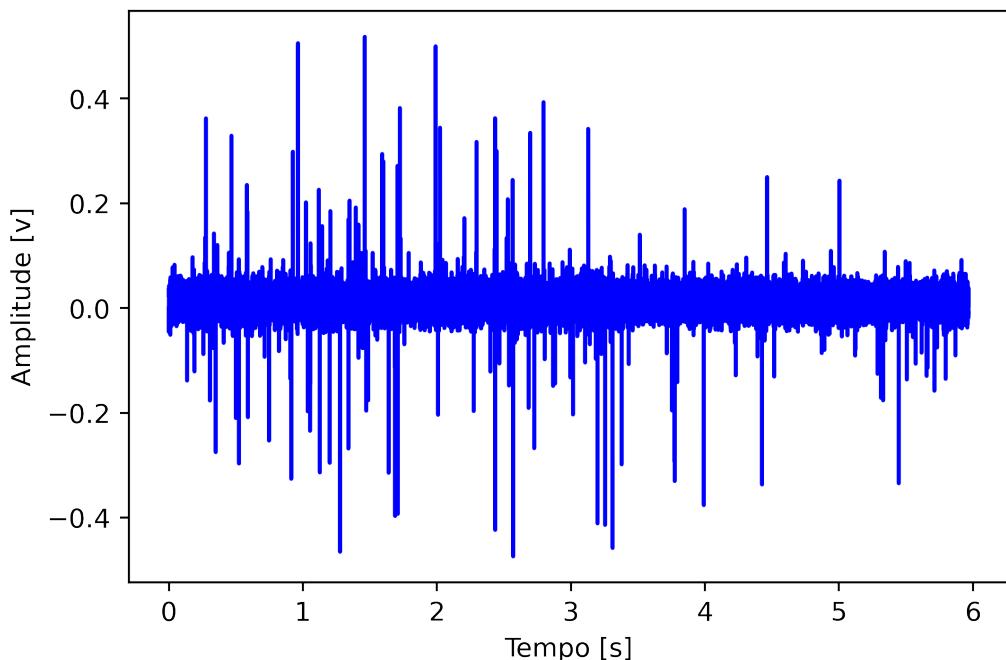
Ao comparar este resultado com o obtido pelo sensor acelerômetro, percebe-se que este apresentou picos bastante próximos, ainda que com amplitudes distintas. No sensor acelerômetro o pico dos 1597Hz foi o de maior amplitude, enquanto no sensor PVDF aparece um pico nos 1592Hz - ainda que de menor amplitude se comparado às frequências de 728Hz e 802Hz, que dominaram o espectro. Uma explicação para tanto encontra-se no posicionamento dos sensores, visto que as dimensões do encapsulamento do sensor PVDF não permite, enquanto obtendo as frequências do motorredutor, um ajuste em sua posição tão preciso quanto o acelerômetro.

6.4 Caso 3 - caracterização do sinal do rolamento em bom estado

O próximo experimento, após caracterização do sinal do motorredutor, foi a caracterização do sinal do rolamento autocompensador de rolos em bom estado, sem nenhum tipo de dano introduzido.

A Figura 86 mostra o sinal temporal do rolamento em bom estado.

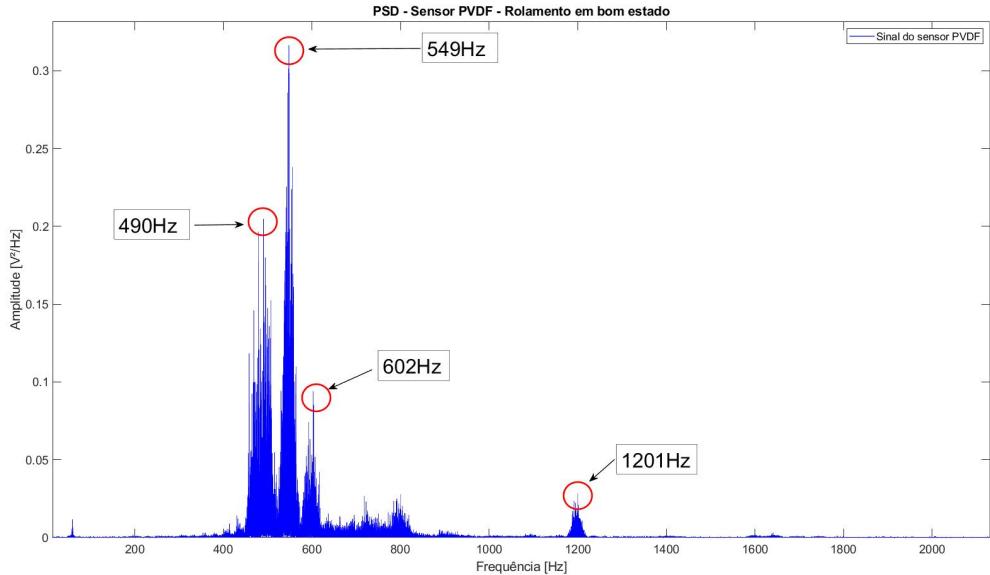
Figura 86 – Sinal temporal do rolamento em bom estado.



Fonte: O autor (2022).

A Figura 87 apresenta o PSD do rolamento em bom estado.

Figura 87 – Espectro de densidade de potência do rolamento em bom estado.



Fonte: O autor (2022).

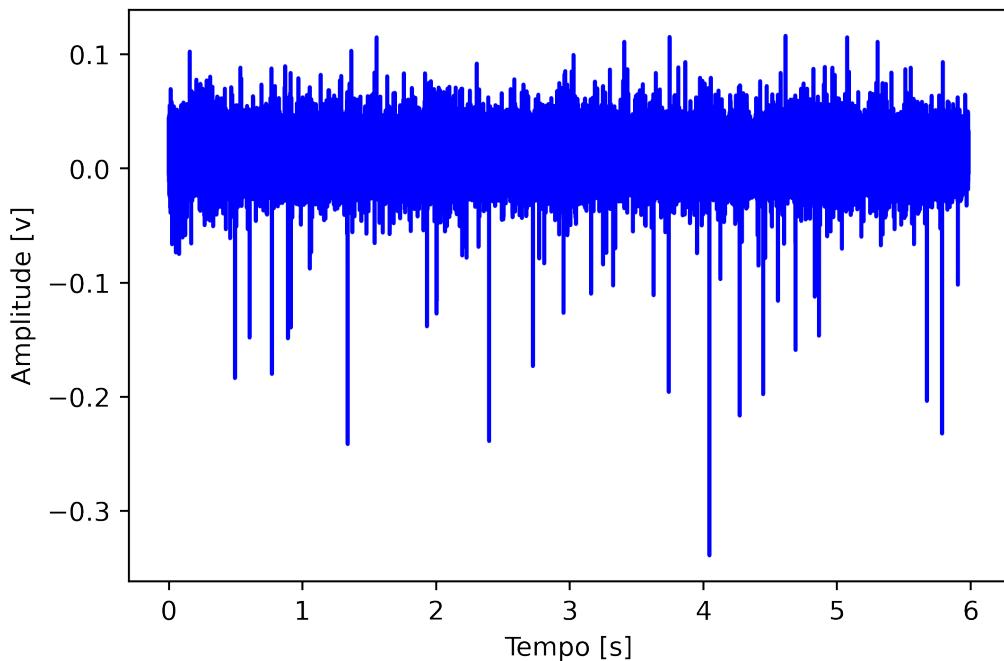
Nele podemos verificar uma concentração de frequências por volta dos 549 Hz, bem como picos na região dos 490 Hz, 602 Hz e 1201 Hz. Neste caso o pico obtido pelo sensor PVDF coincide com o pico obtido pelo sensor acelerômetro, nos 549 Hz. Verifica-se que há menor definição no pico, sendo que este tem início e fim por uma região de frequências maior que às do acelerômetro, mas, ainda assim, foi ambos sensores mostraram a mesma frequência dominante no espectro.

6.5 Caso 4 - caracterização do sinal e identificação da frequência característica de defeitos no rolamento com dano no elemento rolante

A partir das caracterizações das frequências de ruído, do motorreductor e do rolamento em bom estado, é dado prosseguimento nos experimentos a fim de identificação de danos no rolamento. Nesse experimento foi introduzido dano no elemento rolante, conforme mostrado na seção 5. O dano no rolamento simulou uma situação de elevado desgaste e possível esmagamento em um dos elementos rolantes.

A Figura 88 mostra o sinal temporal do rolamento com dano no elemento rolante.

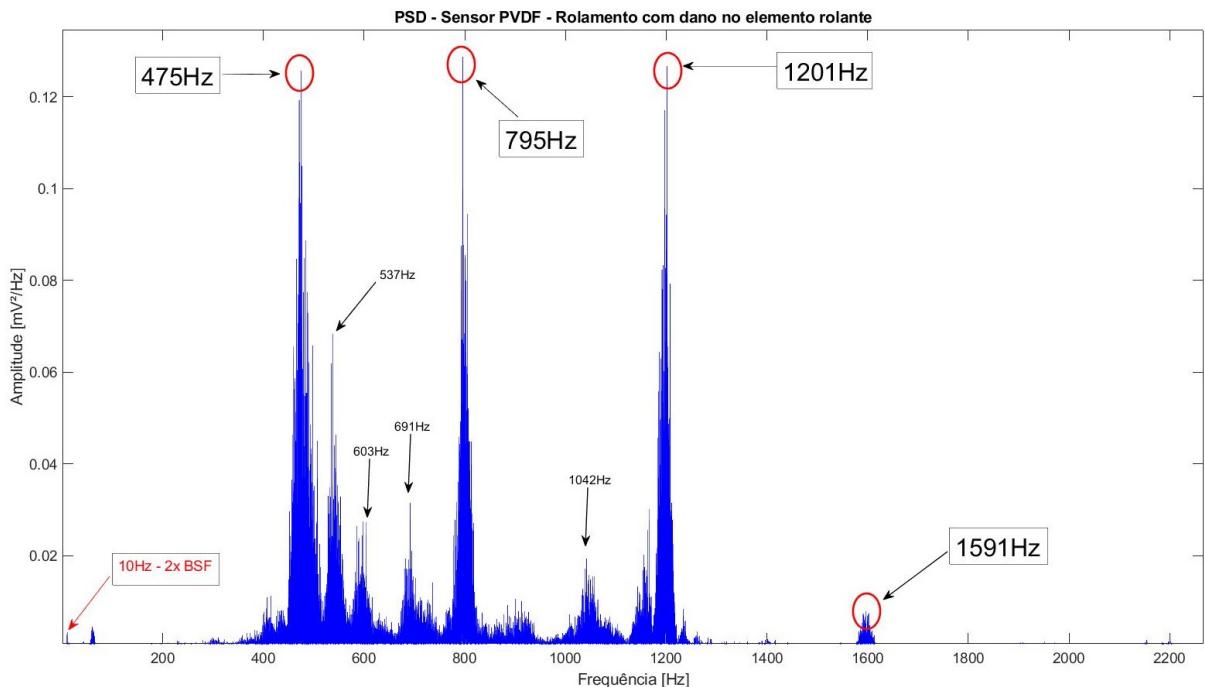
Figura 88 – Sinal temporal do rolamento com dano no elemento rolante.



Fonte: O autor (2022).

É possível verificar por meio do sinal temporal uma tensão pico a pico de aproximadamente 450 mV. Observando-se a densidade espectral de potência, é possível verificar a existência de concentrações nos 475 Hz, 795 Hz e 1201 Hz, aproximadamente. Também há uma concentração, de menor amplitude, entre por volta dos 1591 Hz e os 408 Hz, conforme mostra a Figura 89.

Figura 89 – Espectro de densidade de potência do rolamento com dano no elemento rolante

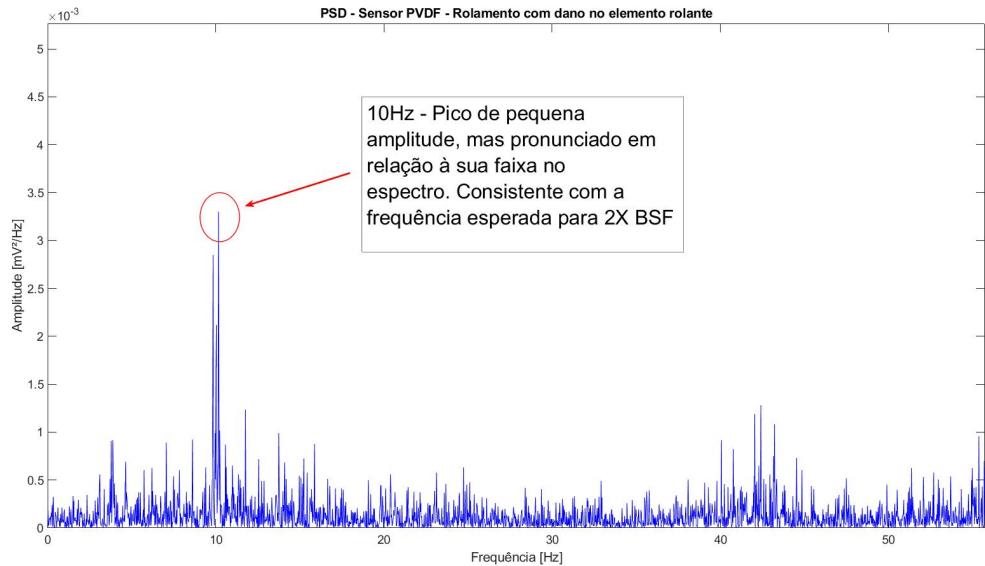


Fonte: O autor (2022)

Tais frequências podem ser provenientes de vibrações de engrenamentos e demais componentes que geram alta energia e são transmitidos, por meio do eixo, do motorredutor até os rolamentos. Tal hipótese é consistente com a diminuição da amplitude dos sinais conforme há maior distanciamento do motorredutor.

Nota-se, entretanto, que era esperada uma frequência, para duas vezes BSF, de aproximadamente 10.6 Hz e foi detectado um pequeno pico nos 10 Hz. Ampliando-se o espectro de baixas frequências, é possível verificar que esse pico, ainda que de baixa amplitude quando comparado ao espectro total de frequências, mostrou-se pronunciado quando visto em comparação com a região de baixas frequências. A Figura ?? mostra o espectro ampliado na região das baixas frequências.

Figura 90 – Espectro de densidade de potência do rolamento com dano no elemento rolante. Vista ampliada da região de baixas frequências, onde o pico em 10Hz mostra-se presente.

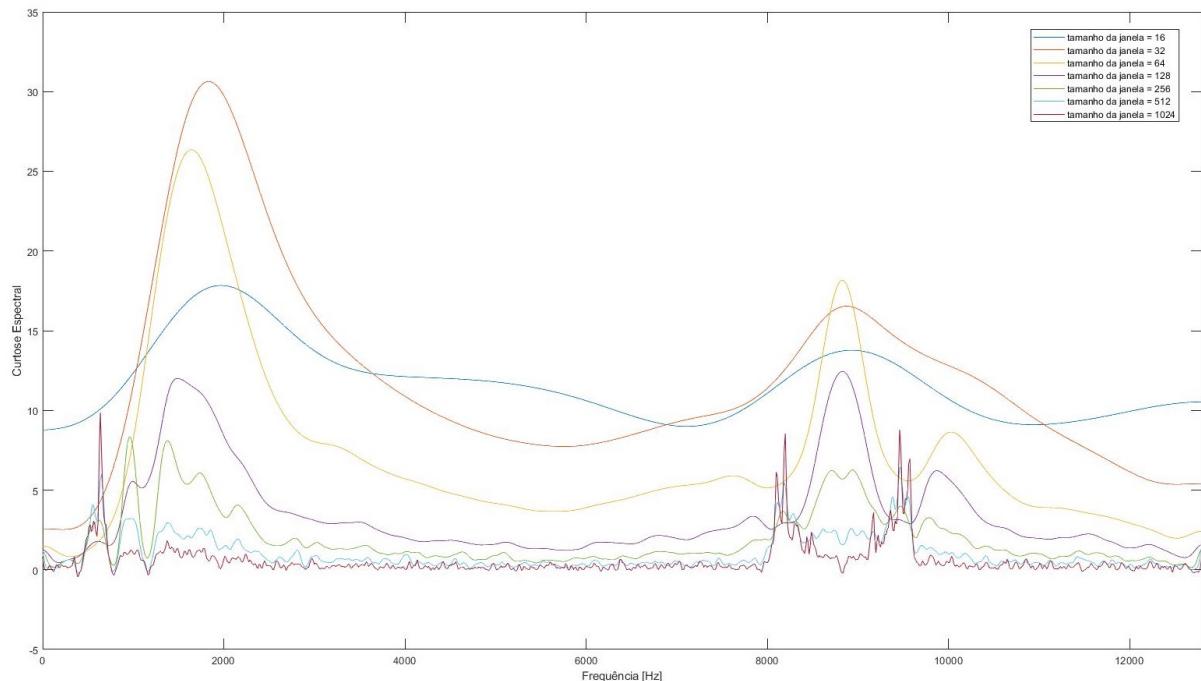


Fonte: O autor (2022)

Dadas essas questões, para caracterização do rolamento com dano introduzido no elemento rolante, também foi adotado o método de análise do envelope do sinal a fim de que fosse possível verificar se haveria a ocorrência das frequências esperadas para o dano no elemento rolante através de impulsos verificados no espectro.

Para que o processamento deste envelope fosse realizado, a banda de seleção do filtro passa-faixa foi realizada manualmente com base na observação dos valores de curtose recorrendo-se ao método da curtose espectral, conforme verificado na Figura 90.

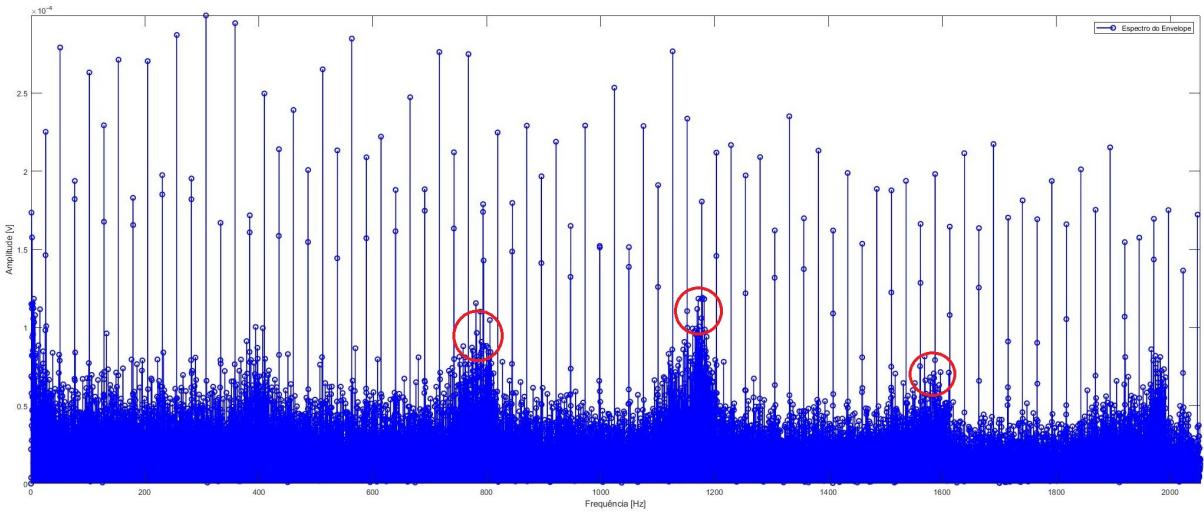
Figura 91 – Curtose espectral para diferentes janelas no rolamento com dano no elemento rolante.



Fonte: O autor (2022)

O envelope do sinal mostra concentrações de baixa amplitude em regiões próximas dos múltiplos do valor base para o dano no elemento rolante. Admite-se a possibilidade de que estes sinais, portanto, possam constituir harmônicas do sinal esperado, com concentrações de sinais e picos aparecendo, respectivamente, em 788 Hz, ou $8,2 \times$ a frequência base, 1170 Hz, ou $12,3 \times$ a frequência esperada e 1569 Hz, ou $16,5 \times$ a frequência esperada, indicados na Figura 91 pelos círculos vermelhos. A concentração nas frequências mais baixas mostra-se de difícil separação, dada à grande quantidade de componentes que podem ter suas frequências nesta região, por meio desta análise. Ao final do espectro próximo aos 2000 Hz, entretanto, também é possível verificar a existência de uma região de concentração de picos, porém mais espalhados e menos claramente definidos.

Figura 92 – Envelope do sinal do rolamento com dano no elemento rolante



Fonte: O autor (2022)

Já os picos de maior amplitude que podem ser visualizados permeando todo o espectro, com espaçamento perceptivelmente equidistante entre si, ocorrem periodicamente em múltiplos de 25 Hz. A hipótese é de que, durante o processo de janelamento de frequências advindo do STFT, tenha ocorrido um fenômeno conhecido por espalhamento espectral. Trataria-se, portanto, de uma limitação do processo de análise adotado, não de frequências presentes originalmente no espectro.

O dano verificado, conclui-se, foi coerente com o esperado pela literatura e demonstrou elevado nível de espalhamento de frequências, compatível com um rolamento em seu quarto estágio de dano.

6.6 Caso 5 – caracterização do sinal e identificação da frequência característica de defeitos no rolamento com dano na pista externa

6.7 Comparação dos resultados obtidos pelo sensor PVDF e pelo sensor acelerômetro

7 Comparação dos custos dos sistemas

8 Conclusões

Neste trabalho foram mostradas evidências da viabilidade da utilização do sensor filme PVDF para detecção de danos em rolamentos autocompensadores de rolos, sob as condições de rotação impostas durante os experimentos. Os ruídos mostraram-se presentes dada à natureza de alta impedância do sensor PVDF. Como parte deste trabalho, e para mitigar este problema, um conjunto de circuitos condicionadores de sinais foi elaborado e um encapsulamento de alumínio, para acomodação do sensor, foi construído.

Também foi elaborado um sistema de aquisição de dados na plataforma LabView, bem como um sistema de aquisição baseado no microcontrolador STM32 foi desenvolvido, ambos apresentados em apêndice.

Além disso, foi construída uma bancada experimental para condução dos experimentos. Também foi desenvolvido um conjunto de programas para análise dos sinais do rolamento, tanto no domínio do tempo, quanto no domínio frequência e, também, com utilização de ferramentas do domínio tempo-frequência, com os mesmos disponibilizados em apêndice. Tais métodos apoiam-se na literatura específica do tema, apresentada durante a revisão bibliográfica realizada.

A aplicação dos métodos de detecção de danos em rolamentos requer o conhecimento prévio de suas frequências esperadas, não sendo imediatamente óbvia a localização destes no espectro de frequências. Além disso, conforme verificado na própria literatura, a localização das frequências características de defeito aproxima-se do estimado, mas usualmente não coincide com precisão. Dadas as vibrações de outros elementos de máquinas, percebe-se que isto representa um desafio na detecção destas frequências. Ademais, o próprio estágio de degradação do rolamento pode impôr um elevado nível de ruído no espectro de frequências.

Neste sentido, ao se trabalhar com aplicações de diagnósticos com falhas introduzidas manualmente, há, ainda, que se tomar cuidado ao se introduzir as falhas.

Trabalhos futuros incluem, mas não se limitam a:

- Investigação de métodos para melhoria da relação sinal-ruído gerado pelo sensor, através de melhorias mecânicas no arranjo do sensor em relação ao encapsulamento; por exemplo, com a construção de um arranjo em balanço que proporcione maior deflexão na ponta do sensor e, portanto, gere maiores tensões de saída conforme ocorre maior deformação mecânica.

- Desenvolvimentos posteriores no estudos dos circuitos condicionadores e amplificadores do sinal do sensor PVDF, tal como a construção de encapsulamentos blindados para o sensor e para os filtros de tratamento do sinal, mitigando ao máximo possível a questão de ruídos inerentes à natureza do sensor.
- Investigação de métodos de detecção automática de falhas baseado em inteligência artificial, com classificação automática de falhas por meio da utilização das ferramentas de análise espectral do sinal.

Referências¹

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenabilidade.** Rio de Janeiro, 1994, 37p.

ACOEM USA. **The 4 Stages of Bearing Failure.** Estados Unidos, 2019. Disponível em: <https://acoem.us/blog/condition-monitoring/do-you-know-the-4-stages-of-bearing-failure/>. Acesso em: 05/01/2022.

BAR-COHEN, Y. **Electroactive Polymers as Artificial Muscles: a review.** Journal of Spacecraft and Rockets, 39 (8), pg. 322-328, 2002.

BARILLI, Rodrigo J. de C. **Análise de Falhas em Mancais de Rolamento Utilizando a Técnica do Envelope.** Dissertação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

CBM Connect. **Modern Vibration Analysis Technology Applied to the Four Stages of Bearing Failure.** Estados Unidos, 2021. Disponível em: <https://www.cbmconnect.com/modern-vibration-analysis-technology-applied-to-the-four-stages-of-bearing-failure/>. Acesso em: 05/01/2022.

CNI, Confederação Nacional das Indústrias. **Perfil da Indústria Brasileira.** Brasil, 2019. Disponível em: <https://industriabrasileira.portaldaindustria.com.br/grafico/total/producao/industria-total>. Acesso em: 07/06/2021.

CHATIGNY, J. V.; ROBB, L. E. **Sensors: making the most of piezo film.** Sensor Review, Vol. 7, Issue: 1, p.15-20. Reino Unido, 1987.

FRANÇA, J. A. de. **Sistemas de Aquisição de Dados Baseados em Microcontrolador.** Dissertação. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 1997.

FUKADA E. **History and recent progress in piezoelectric polymers.** IEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, vol. 47, 2000.

¹ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

GRANEY, B. P.; STARRY, K. **Rolling Element Bearing Analysis.** Materials Evaluation, vol. 70, p. 78-85. Estados Unidos, 2012.

HALVORSEN, D. L. **Properties and applications of piezo film transducers.** Electronics & power, vol. 32, issue 10, p. 744-746. Reino Unido, 1986.

HARRIS, T. A. **Rolling Bearing Analysis.** 3^aed. New York, John Wiley & Sons, EEUU, 1991.

HOLANDA, Sandra M. S. **Aplicação da manutenção preditiva por análise de vibrações em equipamentos de trens urbanos com plano de manutenção proposto.** Dissertação. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2016.

JEE, D. K.; KIM, H. S.; WEI, R.; IM, J. **A study for the development of PVDF vibration sensor and establishment of noise removal algorithm for snoring detection pillow.** International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI). China, 2011.

JUVINALL, R.C., MARSHEK, K.M. **Fundamentals of Machine Component Design.** 2^a ed. New York, John Wiley & Sons, EEUU, 1991.

KABIR, E.; KHATUN, M.; NASRIN, L.; RAIHAN, M. J.; RAHMAN, M. **Pure [β]-phase formation in polyvinylidene fluoride (PVDF)-carbon nanotube composites.** Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 50, n. 16. Reino Unido, 2017.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: Função Estratégica.** 3.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobras, 2009.

KIM, G. B.; HONG, C. U.; KWON, T. K. **Vibration Characteristics of Piezoelectric Lead Zirconate Titanate by Fluid Flow in Intravascular Oxygenator.** Japanese Journal of Applied Physics, vol. 45. Japão, 2006.

KURATA, M.; LI, X.; FUJITA, K.; HE, L.; YAMAGUCHI, M. **PVDF Piezo Film as Dynamic Strain Sensor for Local Damage Detection of Steel Frame Buildings.** Conference on Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, vol. 8692. Estados Unidos, 2013.

- LANG S. B.; MUENSIT S. **Review of some lesser-known applications of piezoelectric and pyroelectric polymers.** Journal of applied physics. v. 85, p.125-134, 2006.
- W. K. Lee, G. S. Chung, H. J. Baek and K. S. Park **Heart sounds measurement using PVDF film sensor and their comparison with RR intervals of ECG signals.** Proceedings of 2012 IEEE-EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics. China, 2012.
- MARUTAKE, M. **The days when piezoelectric PVDF was discovered.** Ferroelectrics, v. 171, p.5-6. Reino Unido, 1995.
- MEOLA, Tatiana. **Monitoramento em tempo real da qualidade de sinais de vibrações, utilizando inteligência artificial.** Dissertação. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2005.
- MESQUITA, Alexandre L. A.; SANTIAGO, Darley F. A.; BEZERRA, Roberto A.; MIRANDA, Ubatan A.; DIAS JR, Milton; PEDERIVA, Robson. **Detecção de falhas em rolamentos usando transformadas tempo-frequência - comparação com análise de envelope.** Mecânica Computacional, v. XXI, p.1938 - 1954. Argentina, 2006.
- NEPOMUCENO, Lauro Xavier. **Técnicas de Manutenção Preditiva.** Editora Edgard.1 ed. São Paulo: Blücher, 1989. 1 v.
- NSK BRASIL. **NSK Bearing Doctor, Diagnóstico Rápido de Ocorrências em Rolamentos.** São Paulo, 2014. 36p.
- NSK. **NSK New Bearing Doctor. Diagnosis of bearing problems. Objective: Smooth & reliable operation.** Japão, 2018. 23p.
- OMEGA. **Aquisição de Dados.** Brasil, 2021. Disponível em: <https://br.omega.com/prodinfo/aquisicao-de-dados.html>. Acesso em: 07/06/2021.
- RAO, Singiresu S. **Mechanical Vibrations.** 4.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- SANTOS, Ana P. A. dos; BATISTA, Fabiana R. R.; PINTO, Juliana de O.; BENINI, Lucas. **Processos de Fabricação: rolamentos rígidos de esferas.** The Journal of Engineering and Exact Sciences, "Eu, a Indústria e o Mundo", vol. 03. Brasil, 2017.

SILVA, Aline Bruna da. **Processamento, caracterização e determinação do perfil de polarização do Poli(fluoreto de vinilideno)**. São Carlos: UFSCar, 2009.

SLACK, Nigel. **Administração da Produção**. 2.ed. São Paulo: Atlas, 2008.

SKF. **Vida nominal do rolamento**. Brasil, 2021. Disponível em <https://www.skf.com.br/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/bearing-selection-process/bearing-size/size-selection-based-on-rating-life/bearing-rating-life>. Acesso em: 07/06/2021.

WANG, D. H.; HUANG, S. L. **Health Monitoring and Diagnosis for Flexible Structures with PVDF Piezoelectric Film Sensor Array**. Journal of intelligent material systems and structures, v. 11, p. 482–491. Reino Unido, 2000.

WISNIEWSKI, C; FERREIRA, G. F. L.; FARIA, R. M.; GIACOMETTI, J. A. **Stable and metastable ferroelectric polarization analysed by the ramp voltage technique**. Proceedings of 11th International Symposium on Electrets. Melbourne: Piscatway, p.215 – 218, 2002.

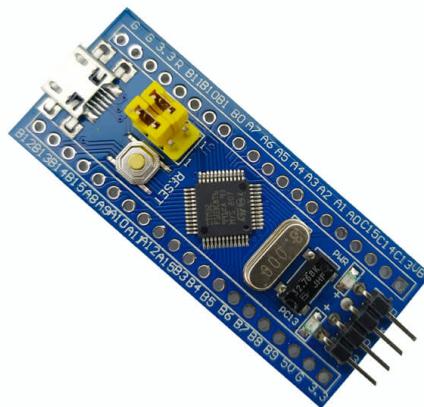
XIN, Y.; SUN, H.; TIAN, H.; GUO, C.; LI, X.; WANG, S.; WANG, C. **The use of polyvinylidene fluoride (PVDF) films as sensors for vibration measurement: A brief review**. Ferroelectrics, vol. 502, p. 28-42. Reino Unido, 2016.

Apêndice A – Programa para aquisição de dados na plataforma LabView

Apêndice B – Programa para aquisição de dados com microcontrolador STM32

Foi construído um sistema de aquisição baseado no microcontrolador STM32, modelo stm32f103, também conhecido como *bluepill*, utilizado por se tratar de um microcontrolador largamente disponível no mercado, de baixo custo, com 72 MHz de velocidade de CPU e 20KB de memória RAM, também possuindo conversor analógico digital com resolução de 12 bits.

Figura 93 – Microcontrolador STM32F103. Retirado de ST, 2021.



O software foi desenvolvido em linguagem C, com utilização do sistema operacional FreeRTOS, manipulação dos registradores do microcontrolador e testado com dispositivo gerador de função. A construção desse software justificou-se como um experimento a fim de se verificar a viabilidade conjunta de um sistema de aquisição de baixo custo com o sensor de baixo custo.

Os códigos são apresentados abaixo.

Foi desenvolvido também um sistema de registro dos dados obtidos através de comunicação serial em Python, capaz de registrar os dados aquisitados e gravá-los em arquivos. Ambos softwares encontram-se também no Apêndice B.

Apêndice C – Programas para análise dos sinais dos rolamentos

```

1 %===== PROGRAMA PARA CÁLCULO DO PSD =====
2 %===== SETUP DE CONFORMAÇÃO DADOS =====
3 clear
4 clc
5 disp("Escreva o diretorio do arquivo que deseja abrir: ")
6 Diretorio = input (" ", "s");
7 disp("\nEscreva o Nome do arquivo que deseja abrir: ");
8 Nomedoarquivo = input (" ", "s");
9
10 Arquivo = load([Diretorio, '\', Nomedoarquivo]);
11
12 x = Arquivo;           % Arquivo agora em X
13 rawData = x;           % Data load
14 sampRate = 25.6e3; % Taxa de aquisição (Hz)
15
16 %===== REMOÇÃO DA COMPONENTE DC =====
17 n = length(x);
18 fhat = fft(x,n);
19 fhat(1) = 0;
20 x_ac = real(ifft(fhat));
21
22 %===== CALCULO DO PSD =====
23 fhat = fft(x_ac,n);
24 algum_fft = fft(x_ac);
25 PSD = fhat.*conj(fhat)/n;
26 freq=1 /( (1/sampRate) * n) * (0:n);
27 L = 1:floor(n/2);
28
29 %===== FILTRAGEM VIA PSD =====
30 %indices = PSD < 0.2;      % Parâmetro de filtragem
31 %PSDClean = PSD.*indices;
32 %fhat = indices.*fhat;
33 %ffilt = real(ifft(fhat));
34
35 %===== CALCULO DO PSD FILTRADO =====
36 %n = length(ffilt);
37 %fhat = fft(ffilt,n);
38 %PSD = fhat.*conj(fhat)/n;
39 %freq2 =1 /( (1/sampRate) * n) * (0:n);
40 %L2 = 1:floor(n/2);

```

```
40
41 %===== PLOTAGEM DO PSD =====
42 plot(freq(L),PSD(L),'b','LineWidth',1), hold on
43 set(gca,'FontSize',14)
44
45 %===== PLOTAGEM DO PSD FILTRADO =====
46 %plot(freq(L),algum_fft(L),'b','LineWidth',1), hold on
47 %plot(freq2(L2),PSD(L2),'b','LineWidth',1), hold on
48 %set(gca,'FontSize',14)
```

```

1 %===== PROGRAMA PARA CÁLCULO DO ENVELOPE DO SINAL =====
2 %===== SETUP DE CONFORMAÇÃO DADOS =====
3 clear
4 clc
5 disp("Escreva o diretório do arquivo que deseja abrir: ")
6 Diretório = input (" ", "s");
7 disp("\nEscreva o Nome do arquivo que deseja abrir: ");
8 Nome do arquivo = input (" ", "s");
9
10 Arquivo = load([Diretório,'\', Nome do arquivo]);%, '.csv']);
11
12 x = Arquivo;                                % Arquivo agora em X
13
14 %===== DEFINIÇÃO DO PROBLEMA =====
15
16 rawData = x;
17
18 % Taxa de aquisição (Hz)
19 sampRate = 25.6e3;
20
21 % Velocidade de rotação do eixo
22 rpm = 30;
23
24 % Cálculo das frequências base
25 bearFreq = [2.656 3.844 0.4038 2.600] * rpm;
26
27 % Ordem do modelo de Autoregressão
28 maxP = 1000;
29
30 % Tamanho da janela da STFT
31 windLeng = [2^4 2^5 2^6 2^7 2^8 2^9 2^10];
32
33
34 %===== SEPARAÇÃO DE SINAIS DISCRETOS (Modelo Autoregressão) =====
35 x=rawData(:); N=length(x);
36
37 rmsValue = rms(x);
38 curtoseDominioTempo = kurtosis(x);
39
40 for p = 1 : maxP
41     if rem(p,50)==0; disp(['p=' num2str(p)]); end
42     a = aryule(x,p); % aryule retorna o parâmetro a(k) do modelo de autoregressão
43     X = zeros(N,p);
44     for i = 1 : p; X(i+1:end,i) = x(1:N-i); end
45     xp = -X*a(2:end)';
46     e = x-xp;
47     tempKurt(p,1) = kurtosis(e(p+1:end));
48 end
49
50 optP = find(tempKurt==max(tempKurt)); % Solução ótima do modelo de autoregressão
51 optA = aryule(x,optP);
52 xp = filter([0 -optA(2:end)],1,x);
53
54 e = x(optP+1:end) - xp(optP+1:end);    % Sinal residual

```

```

57 %===== SELEÇÃO DA BANDA DE DEMODULAÇÃO (STFT & CURTOSE ESPECTRAL) =====
58 Ne = length(e);
59 numFreq = max(windLeng)+1;
60 for i = 1 : length(windLeng)
61     windFunc = hann(windLeng(i)); %== Short Time Fourier Transform
62     numOverlap = fix(windLeng(i)/2);
63     numWind = fix((Ne-numOverlap)/(windLeng(i)-numOverlap));
64     n = 1:windLeng(i);
65     STFT=zeros(numWind,numFreq);
66     for t = 1 : numWind
67         stft = fft(e(n).*windFunc, 2*(numFreq-1));
68         stft = abs(stft(1:numFreq))/windLeng(i)/sqrt(mean(windFunc.^2))^2;
69         STFT(t,:) = stft';
70         n = n + (windLeng(i)-numOverlap);
71     end
72     for j = 1 : numFreq %== Spectral Kurtosis
73         specKurt(i,j) = mean(abs(STFT(:,j)).^4)./mean(abs(STFT(:,j)).^2).^2-2;
74     end
75     lgd{i} = ['tamanho da janela = ',num2str(windLeng(i))];
76 end
77
78 %===== CURTOSE ESPECTRAL E SELEÇÃO DE FILTRO PASSA-FAIXA =====
79 figure(1)
80 freq = (0:numFreq-1)/(2*(numFreq-1))*sampRate;
81 plot(freq,specKurt); legend(lgd,'location','best')
82 xlabel('Frequência [Hz]'); ylabel('Curtose Espectral'); xlim([0 sampRate/2]);
83 [freqRang] = input('Range of bandpass filtering, [freq1,freq2] = ');
84 [b,a] = butter(2,[freqRang(1) freqRang(2)]/(sampRate/2),'bandpass');
85 X = filter(b,a,e); % sinal com filtro passa-faixa
86
87
88 %===== Análise de Envelope =====
89 aX = hilbert(X); % hilbert(x) returns an analytic signal of x
90 envel = abs(aX);
91 envel=envel-mean(envel); % sinal do envelope
92 fftEnvel = abs(fft(envel))/Ne^2;
93 fftEnvel = fftEnvel(1:ceil(N/2));
94 figure(2) %== plot dos resultados
95 freq = (0:Ne-1)/Ne*sampRate;
96 freq = freq(1:ceil(N/2));
97 stem(freq,fftEnvel,'b','LineWidth',1.5); hold on;
98 [xx,yy]=meshgrid(bearFreq,ylim);
99 legend('Espectro do Envelope');
100 xlabel('Frequência [Hz]'); ylabel('Amplitude [v]'); xlim([0 max(bearFreq)*1.8])
101
102 curtoseSinalResidual = kurtosis(e);
103
104 %===== Análise de Envelope com sinal residual =====
105 aX = hilbert(e);
106 envel = abs(aX);
107 envel = envel-mean(envel);
108 fftEnvel = abs(fft(envel))/Ne^2;
109 fftEnvel = fftEnvel(1:ceil(N/2));
110 figure(4)
111 stem(freq,fftEnvel,'b','LineWidth',1.5); hold on;
112 [xx,yy] = meshgrid(bearFreq,ylim);
113 legend('Espectro do Envelope');
114 xlabel('Frequência [Hz]'); ylabel('Amplitude [v]'); xlim([0 max(bearFreq)*1.8])

```


Apêndice D – Cálculo do isoamortecedor

À
 IFSP – Campus São Paulo
 Rua Pedro Vicente, 625 - Canindé
 01109-010 – São Paulo - SP



At.: Sr. Lucas Willenshofer
 Professor

São Paulo, 12 de Julho de 2.021
 N. Ref.: P 12431/21-A Fu

Proposta Orçamentária P 12431/21-A				
Ref.: Assentamento elástico para Isolamento de vibrações de 01 bancada de testes, Peso total 0,568 kN (57,98 kgf), Rotação 1.735 rpm.				

Pos.	Quant.	Descrição	Preço Unitário	Preço Total
01	02	Isoamortecedores de vibração GERB tipo S1B-11 à base de mola helicoidal de aço, incl. placas resilientes autocolantes para fixação.	R\$ 71,83	R\$ 143,66
02	01	Isoamortecedores de vibração GERB tipo S1B-13 , idem pos. 1.	R\$ 77,66	R\$ 77,66
03	01	Isoamortecedores de vibração GERB tipo S1B-14 , idem pos. 1.	R\$ 83,38	R\$ 83,38
Valor Total:				R\$ 304,70

Preço: Incluso todos os impostos (IPI:10%, ICMS:18%, PIS:1,65%, COFINS:7,6%), Classificação fiscal: 8487.90.00, inclusivo Embalagem, posto nossa fábrica (EXW) Gerb São Paulo

Condição de Pagamento: 28 ddl do faturamento

Prazo de Fabricação: Máx. 2 semanas a partir do pedido formal

Validade da Proposta: 04.08.2021

Garantia: 3 anos para integridade e eficácia da solução proposta

OBS.: Em caso de pedido, favor mencionar esta Proposta nº **P 12431/21-A**

Atenciosamente,

GERB do Brasil
Controle de Vibrações

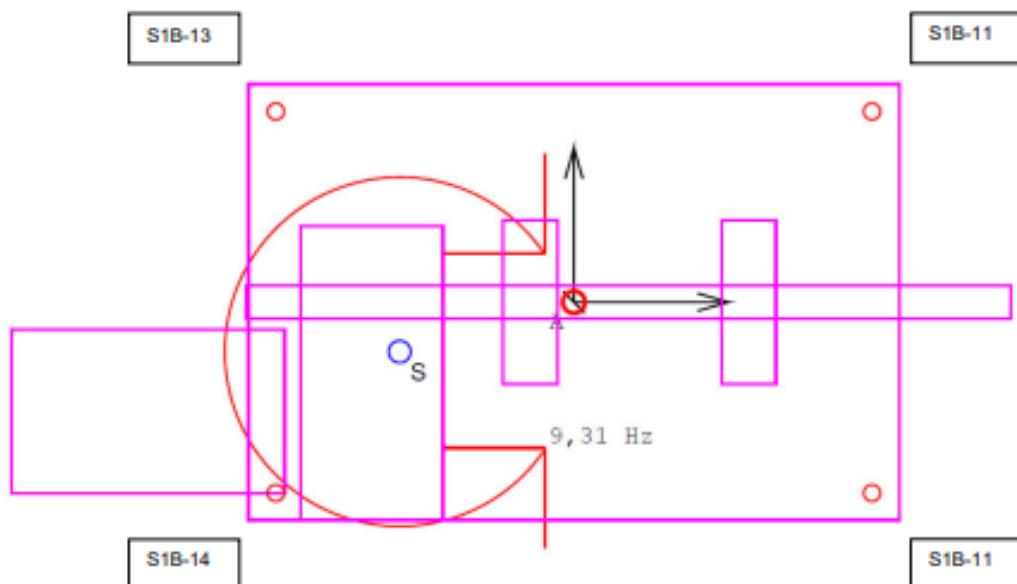
Alessandro M. Furuguem
 Depto. Técnico Comercial
 Tel.: +55 11 5185-0027
 Direto. : +55 11 5185-0023
 Cel.: +55 11 99608-6387
alessandro.furuquem@gerb.com.br

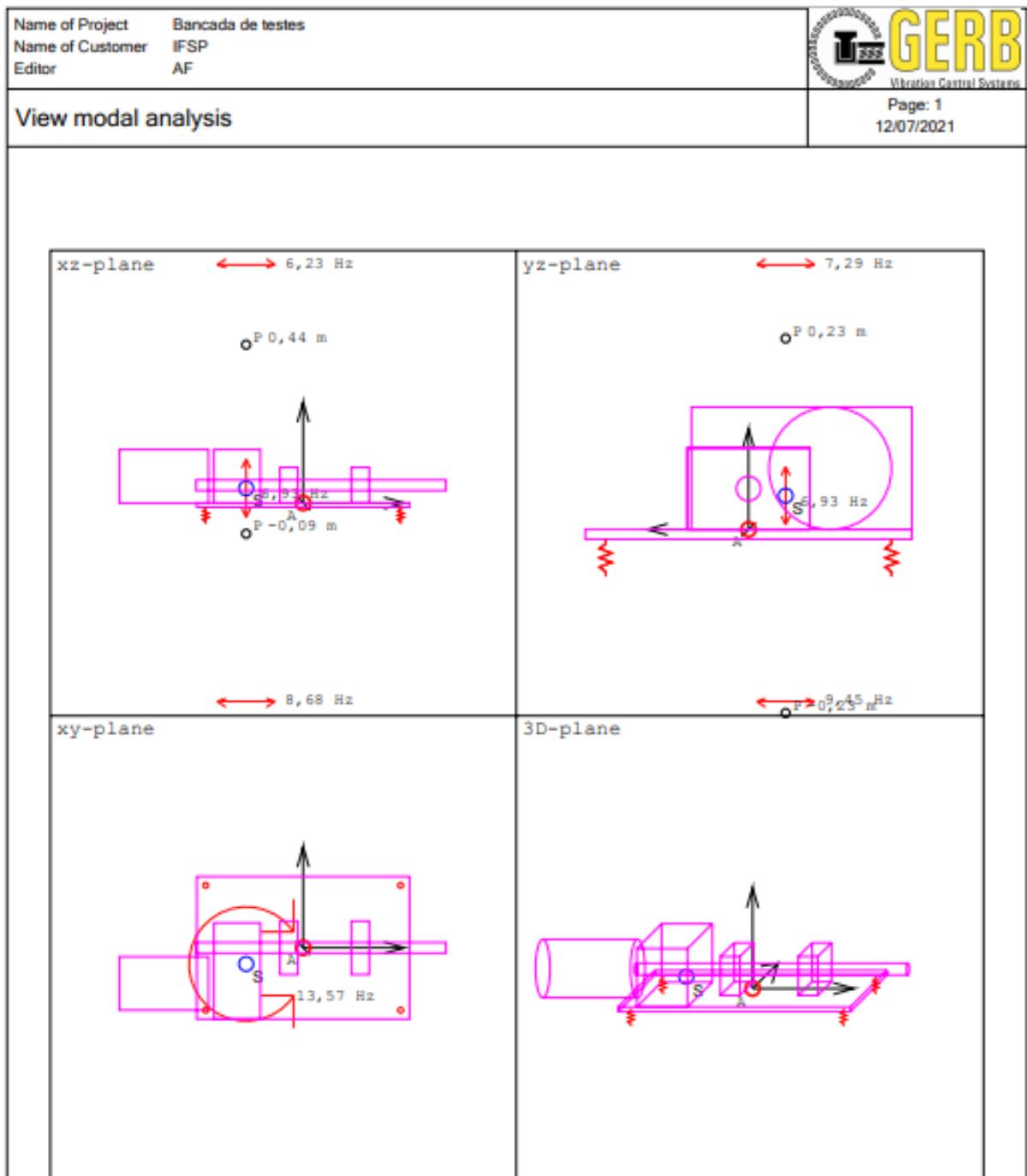


Escrítorio: Rua da Paz, 1741
 Fábrica: Rua Belisário Campanha, 183
 CNPJ: 38.813.200/0001-36 (escritório)

– Chác. Sto. Antônio – CEP: 04713-002 – fone: 11 5185-0027
 – Casa Verde – CEP: 02521-000 – fone: 11 3966-6906
 – e-mail: gerb@gerb.com.br www.gerb.com.br

Posição dos isoamortecedores de vibração:





Picture 1: View modal analysis

GERB Schwingungssiedlungen GmbH & Co.KG Roedemallee 174-176 13407 Berlin, Deutschland Postfach 51 02 30,13362 Berlin Tel.+49-30-4191-0, Fax -199 info@gerb.de	USt-IdNr. DE 118873256 Kommanditgesellschaft: HR Berlin-Charlottenburg Nr. A 33006 B Komplementär: GERB Beteiligungs GmbH, Berlin HR Berlin-Charlottenburg Nr. B 151206 B	www.gerb.com Geschäftsführer: Kai-Askan Bünte Dr. Peter Nawrotzki Christoph von Waldow Ehrenfried von Waldow
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

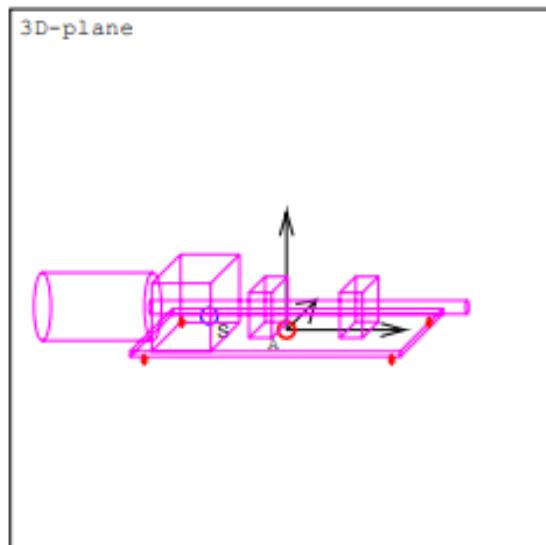
Name of Project	Bancada de testes	 GERB Vibration Control Systems
Name of Customer	IFSP	
Editor	AF	

Static loads	Page: 1 12/07/2021
--------------	-----------------------

Inclination about x-axis:	-1,695 mm/m
Inclination about y-axis:	0,684 mm/m
Rotation about z-axis:	0,000 mm/m
Maximum difference in deflection:	0,967 mm
Minimum spring force:	-0,311 kN
Maximum spring force:	-0,058 kN

Influence of static loads

No.	Location of Spring Units			vertical Force [kN]	vertical Deflection [mm]
	x [m]	y [m]	z [m]		
1	-0,273	0,175	-0,012	0,153	5,456
2	-0,273	-0,175	-0,012	0,311	4,863
3	0,273	0,175	-0,012	0,064	5,830
4	0,273	-0,175	-0,012	0,058	5,237



GERB Schwingungsdämpfungen GmbH & Co.KG Roedemallee 174-176 13407 Berlin, Deutschland Postfach 51 02 30,13362 Berlin Tel.+49-30-4191-0, Fax -199 info@gerb.de	USI-IdNr. DE 118873256 Kommanditgesellschaft: HR Berlin-Charlottenburg Nr. A 33006 B Komplementär: GERB Beteiligungs GmbH, Berlin HR Berlin-Charlottenburg Nr. B 151206 B	www.gerb.com Geschäftsführer: Kai-Askan Bünte Dr. Peter Nawrotzki Christoph von Waldow Ehrenfried von Waldow
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------