

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

2021

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

2021

Agradecimentos

obrigado

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. Retirado de Mesquita et al. 2002	23
Figura 2 – a) Processo de fabricação dos anéis internos e externos. Retirado de SANTOS et al., 2017.	25
Figura 3 – Anéis internos de rolamentos apresentando escamamento. Retirado de NSK, 2014.	28
Figura 4 – Pista de rolamento com descascamento. Retirado de NSK, 2014.	29
Figura 5 – Rolamentos com amassados e arranhaduras. Retirado de NSK, 2014.	29
Figura 6 – Aneís interno e externo com danos por escorregamento. Retirado de NSK, 2014.	30
Figura 7 – Anéis internos e anel externo com fraturas. Retirado de NSK, 2014.	30
Figura 8 – Rolamento com lasca e trincas. Retirado de NSK, 2014.	31
Figura 9 – Gaiolas danificadas. Retirado de NSK, 2014.	31
Figura 10 – Anel interno e rolos com impressões. Retirado de NSK, 2014.	32
Figura 11 – Anel interno e esfera com <i>pitting</i> . Retirado de NSK, 2014.	32
Figura 12 – Anel interno e externo com desgaste. Retirado de NSK, 2014.	33
Figura 13 – Rolamentos com corrosão por contato. Retirado de NSK, 2014.	33
Figura 14 – Pistas com esmagamento. Retirado de NSK, 2014.	34
Figura 15 – Deformação de deslizamento. NSK, 2014.	34
Figura 16 – Dano causado superaquecimento. Retirado de NSK, 2014.	35
Figura 17 – Corrosão eletrolítica em rolamentos. Retirado de NSK, 2014.	35
Figura 18 – Rolamentos com oxidações e corrosões. Retirado de NSK, 2014.	36
Figura 19 – Rolamentos com falhas de instalação. Retirado de NSK, 2014.	36
Figura 20 – Manchas e descoloração em rolamentos. Retirado de NSK, 2014.	37
Figura 21 – Causas de defeitos em rolamentos. Retirado de NSK, 2014.	37
Figura 22 – Representação dos níveis de um sinal harmônico. Retirado de Meola, 2005.	43
Figura 23 – Relação entre os valores de Pico e RMS com o desgaste progressivo de rolamentos. Retirado de Meola, 2005.	44
Figura 24 – Fator de Crista no tempo. Retirado de Meola, 2005.	44

Figura 25 – Comparação de espectros de vibração de um rolamento em bom estado e de um rolamento defeituoso. O sinal acima representa o rolamento em bom estado e o sinal abaixo, o rolamento defeituoso. A faixa destacada mostra a região de dano, explicitando as diferenças entre ambos.	46
Retirado de Barreiro, 2010.	46
Figura 26 – Sinal temporal do rolamento com dano introduzido. Retirado de Barreiro, 2010.	47
Figura 27 – Envelope do sinal temporal do rolamento com dano introduzido. Retirado de Barreiro, 2010.	47
Figura 28 – Espectro do envelope do sinal temporal do rolamento com dano introduzido. Retirado de Barreiro, 2010.	48
Figura 29 – Análise de Envelope com etapas de pré-processamento do sinal. Retirado de Kim, 2020.	49
Figura 30 – Estágio 1	50
Figura 31 – Primeiro estágio de defeito no rolamento. Adaptado de ACOEM, 2019. .	50
Figura 32 – Segundo estágio de defeito no rolamento. Adaptado de ACOEM, 2019. .	51
Figura 33 – Pista externa em segundo estágio de defeito no rolamento. Adaptado de ACOEM, 2019.	52
Figura 34 – Terceiro estágio de defeito no rolamento. Adaptado de ACOEM, 2019. .	52
Figura 35 – Quarto estágio de defeito no rolamento. Adaptado de ACOEM, 2019. .	53
Figura 36 – Estrutura molecular do PVDF. Retirado de Xin, 2016.	54
Figura 37 – Rolamento autocompensador de rolos. Retirado de NSK, 2018.	61
Figura 38 – Rolamento autocompensador de rolos. Retirado de NSK, 2018.	62
Figura 39 – Ângulo de contato calculado a partir do modelo CAD disponibilizado pela NSK.	63
Figura 40 – Diâmetro do elemento rolante calculado a partir do modelo CAD disponibilizado pela NSK.	63
Figura 41 – Projeto da bancada experimental.	64
Figura 42 – Projeto da bancada experimental visto lateralmente.	65
Figura 43 – Bancada experimental em fase inicial de construção.	65
Figura 44 – Bancada experimental finalizada.	66
Figura 45 – Isoamortecedor Gerb.	67
Figura 46 – Medição de rotação com partida direta.	67

Figura 47 – Painel de controle da bancada experimental.	68
Figura 48 – Inversor de frequências e instalação elétrica do painel da bancada experimental.	69
Figura 49 – Inversor de frequências e instalação elétrica do painel da bancada experimental	70
Figura 50 – Versão final da bancada experimental.	70
Figura 51 – Sensor de vibração piezoelétrico. Retirado de Measurement Specialties, 2021.	72
Figura 52 – Encapsulamento de alumínio com amplificador operacional e sensor filme PVDF.	73
Figura 53 – Sensor de vibração piezoelétrico no encapsulamento de alumínio.	73
Figura 54 – Circuito amplificador operacional do sensor piezoelétrico.	74
Figura 55 – Circuito rejeita-faixa para filtragem dos 60 Hz da rede.	75
Figura 56 – Circuito rejeita-faixa para filtragem dos 60 Hz da rede.	75
Figura 57 – Comparaçao do sinal filtrado com o sinal não-filtrado, com a bancada desligada.	76
Figura 58 – Comparaçao do sinal do sensor filtrado com o sinal não-filtrado, com bancada conectada à energia elétrica.	77
Figura 59 – DAQ USB 6212. Retirado de National Instruments, 2021.	78
Figura 60 – Sistema de aquisição desenvolvido com LabView.	78
Figura 61 – Microcontrolador STM32F103. Retirado de ST, 2021.	79
Figura 62 – Dano introduzido no elemento rolante.	81
Figura 63 – Sinal temporal da bancada desconectada da energia elétrica.	82
Figura 64 – Espectro do sinal da bancada desconectada da energia elétrica.	83
Figura 65 – Sinal temporal da bancada conectada à energia elétrica.	84
Figura 66 – Espectro de densidade de potênciia da bancada conectada à energia elétrica.	85
Figura 67 – Sinal temporal da bancada conectada à energia elétrica e energizada. .	86
Figura 68 – Espectro de densidade de potênciia da bancada conectada à energia elétrica e energizada.	87
Figura 69 – Sinal temporal do motorredutor.	88
Figura 70 – Espectro de densidade de potênciia do motorredutor.	89
Figura 71 – Espectro de densidade de potênciia do motorredutor com picos filtrados.	90

Figura 72 – Sinal temporal do rolamento em bom estado.	91
Figura 73 – Espectro de densidade de potência do rolamento em bom estado.	91
Figura 74 – Sinal temporal do rolamento com dano no elemento rolante.	92
Figura 75 – Espectro de densidade de potência do rolamento com dano no elemento rolante	93
Figura 76 – Curtose espectral para diferentes janelas no rolamento com dano no elemento rolante.	94
Figura 77 – Envelope do sinal do rolamento com dano no elemento rolante	95

Lista de tabelas

Tabela 1 – Cenários de caracterização dos sinais.	81
Tabela 2 – Caracterização do ruído elétrico capturado pelo sistema	87

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	14
2	Objetivos	17
2.1	Geral	17
2.2	Específicos	17
3	Estado da arte	18
3.1	Aplicações do Fluroreto de Polivinilideno como sensor de vibração	18
4	Revisão Bibliográfica	20
4.1	Manutenção	20
4.1.1	Manutenção preditiva	21
4.2	Fundamentos e aplicações de rolamentos	23
4.2.1	Tipos de rolamentos	24
4.2.2	Processos de fabricação de rolamentos	24
4.2.3	Carga e vida útil de rolamentos	26
4.2.4	Falhas em rolamentos	28
4.2.5	Principais causas de defeitos em rolamentos	37
4.3	Análise de vibrações	39
4.3.1	Frequências características de defeitos e detecção de falhas em rolamentos	41
4.3.2	Detecção de falhas em rolamentos por análise de vibração	42
4.3.3	Análise de envelope do sinal	46
4.3.4	Detecção de Falhas em Mancais de Rolamentos	49
4.4	Fluroreto de polivinilideno	54
4.5	Sistemas de aquisição de dados	58
4.5.1	Condicionamento de Sinal	58
4.5.2	DAQ - Data Acquisition	59
5	Materiais e métodos	61
5.1	Rolamentos autocompensadores de rolos	61

5.2	Bancada experimental	64
5.3	Cálculo das frequências esperadas	71
5.4	Filme PVDF e circuitos condicionadores de sinal	71
5.5	Aquisição dos dados	77
5.6	Métodos de análise dos dados	79
5.7	Definição dos experimentos	80
6	Resultados	82
6.1	Caso 1 - caracterização do sinal do sensor	82
6.2	Caso 2 - caracterização do sinal do motorredutor	88
6.3	Caso 3 - caracterização do sinal do rolamento em bom estado	90
6.4	Caso 4 - caracterização do sinal e identificação da frequência característica de defeitos no rolamento com dano no ele- mento rolante	92
6.5	Caso 5 – caracterização do sinal e identificação da frequência característica de defeitos no rolamento com dano na pista externa	95
6.6	Caso 6 – caracterização do sinal e identificação das frequências característica de defeitos nos rolamentos, com utilização de sensor acelerômetro	95
6.7	Comparação dos resultados obtidos pelo sensor PVDF e pelo sensor acelerômetro	95
7	Comparação dos custos dos sistemas	96
8	Conclusões	97
	Referências¹	99
	Apêndice A – Programa para aquisição de dados na plataforma LabView	102
	Apêndice B – Programa para aquisição de dados com micro- controlador STM32	103

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

Apêndice D – Cálculo do isoamortecedor 109

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).

Neste 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, tem 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, 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 isto, utilizado uma vasta gama de sensores com diferentes propósitos e especificidades a fim de aferir os mais distintos parâmetros destes elementos.

Dentre os diversos elementos de máquina um dos mais comuns são os rolamentos, com utilização em virtualmente todas as áreas da indústria. Esta 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, estes polímeros apresentam alteração em seu tamanho e/ou forma

quando são sujeitos a um campo elétrico. Alguns materiais dentro desta família apresentam também outro efeito: geram um sinal elétrico quando sujeitos a uma força. Devido a estas 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 deste 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, 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 este sensor possui baixo custo e, desta forma, mostra-se como possível alternativa aos acelerômetros cerâmicos costumeiramente utilizados para esta finalidade. O componente econômico, portanto, se faz basilar neste trabalho.

Dadas estas características do material, o filme PVDF foi utilizado como sensor de vibração. Uma vez que a tensão de saída é proporcional a 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.

Esta tensão então, a partir de sua aquisição e conversão por um conversor analógico-digital, pode ser transmitida e estes dados armazenados através de um software de aquisição de dados, para que se realize posterior análise. Uma vez que o filme PVDF 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 deste sinal com um 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 da 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 e os métodos de análise de falhas em rolamento foram construídos.

Buscou-se, assim, a partir dos experimentos e análise dos dados, uma resposta inicial quanto a 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, a 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 disto espera-se 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 este 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

Neste capítulo, apresenta-se o estado da arte quanto a utilização de sensores PVDF em aplicações de monitoramento 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. Nesta, apresentam suas aplicações para dispositivos médicos portáteis, monitoramento de saúde estrutural, monitoramento de maquinário, dentre outras diversas.

Em particular no que tange PVDF como sensor aplicado a dispositivos médicos portáteis, citam:

- utilização em dispositivos VIVLAD, *vibrating intravascular lung assist device*, a fim de auxiliar pacientes com problemas respiratórios crônicos
- monitoramento de sinais cardíacos
- monitoramento de ronco

Estas utilizações se dão pois a respiração e os batimentos cardíacos, de humanos e muitos outros animais, geram vibrações das superfícies corporais. Estas vibrações, em diversos casos, refletem as condições de saúde de humanos e animais, podendo ser medidas através de sensores colocados na pele. Neste sentido os sensores PVDF têm como vantagem característica sua flexibilidade, baixo custo e leveza. Isto o torna bom candidato para a aplicação nesta área da saúde e muitos pesquisadores têm feito esforços em relação ao seu estudo e desenvolvimento.

Em relação ao PVDF como sensor aplicado a monitoramento de integridade estrutural, citam:

- aplicações em 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

O PZT, titanato zirconato de chumbo, é o material mais comum para monitoramento de integridade de estruturas. Contudo, este material é rígido e não pode ser aplicado em superfícies curvas. Disto decorrem os desenvolvimentos do PVDF como material alternativo, uma vez que este pode ser uma resposta para aplicações específicas dada sua flexibilidade.

Já no PVDF como sensor aplicado a medição de vibrações em maquinário, cita-se em particular o trabalho de Jeon et al., 2011, onde estes 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.

Kern et al., 2016, publicaram o artigo "Development of a Solid-Borne Sound Sensor to Detect Bearing Faults Based on a MEMS Sensor and a PVDF Foil Sensor". Neste os autores compararam 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 a conclusão 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, publicaram o artigo "Classification and simulation method for piezoelectric PVDF sensors". Neste os autores 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 também chegam em conclusões de 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.

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.

Estes 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 precisa de meios que permitam a produção. Estes meios podem variar desde instrumentos simples, como tesouras, agulhas e novelos de lã, até maquinário industrial de alta complexidade. Em qualquer destes 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 a prática correspondente a 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, este 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 este 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 destas informações de determinado componente, pode-se ter subsídios para que sejam tomadas tais medidas.

Neste sentido, segundo Slack, 2008, a manutenção preditiva visa 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 esta, 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 esta questão percebe-se que a manutenção preditiva apresenta vantagens que a tornam economicamente viável. Dentre outras, cita-se:

- Reparos se tornam 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 permite 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 destes 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, através 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 a operação do equipamento através da análise de viscosidade, acidez, teor da água dentre outros;
- ultrassom, técnica que permite a detecção de descontinuidades internas através 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 estes 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)

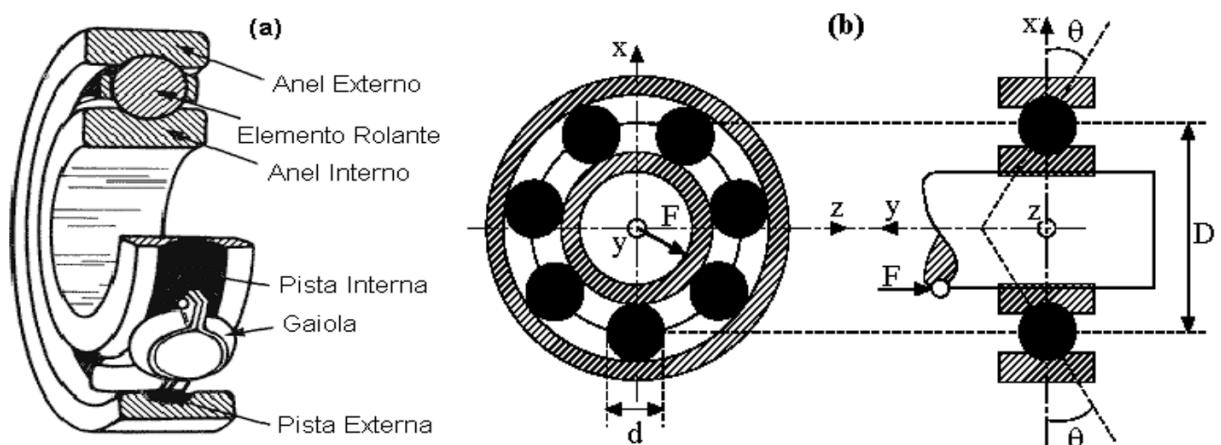
Assim, a manutenção preditiva baseada em análise de vibrações, aplicada à mancais de rolamentos, será abordada em maiores detalhes por se tratar da técnica escolhida dadas as características dos rolamentos, bem como do sensor objeto de estudo deste trabalho.

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 seus propósitos específicos (NSK, 2018).

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

Figura 1 – a) Componentes de um rolamento. (b) Dimensões do rolamento. Retirado de 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. Estes 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; dentre 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 cita-se:

- Rolamentos de rolos cilíndricos, constituídos por uma carreira de rolos em uma gaiola
- Rolamentos de rolos cônicos, contritudos 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, dentre outros.

4.2.2 Processos de fabricação de rolamentos

Nos rolamentos usualmente segraga-se 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).

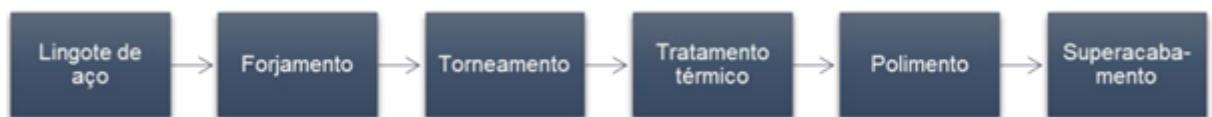
As esferas, ou rolos, são feitas a partir de barras de aço cortadas em comprimentos específicos. Um processo de forjamento destes fragmentos de barra confere às peças o formato desejado, mas ainda com rebarbas. É realizado, então, o desbaste destas rebarbas.

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, através 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 tempera, onde estes 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 onde 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. Retirado de SANTOS et al., 2017.



As gaiolas, por sua vez, são produzidas com lâminas de aço que recebem a forma de anéis planos através 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 estes. O tamanho dos elementos rolantes se dá por cálculo a partir do diâmetro da ranhura do anel interno. Estes 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 é dada na norma ISO 281:2007, que também especifica os métodos de cálculo de classificação de carga dinâmica básica. Em relação a 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, L₁₀, de um milhão de revoluções (SKF , 2019). O valor de C é usualmente encontrado nos catálogos 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 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 esta 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). Esta carga hipotética teria influência na vida do rolamento igual às cargas reais que 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 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 calculado 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 esta condição específica. Neste 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

Quando há o correto manuseio dos rolamentos, usualmente estes podem ser utilizados por longos períodos de tempo antes de surgirem sinais de fadiga. Entretanto, devido a 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, estas 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.

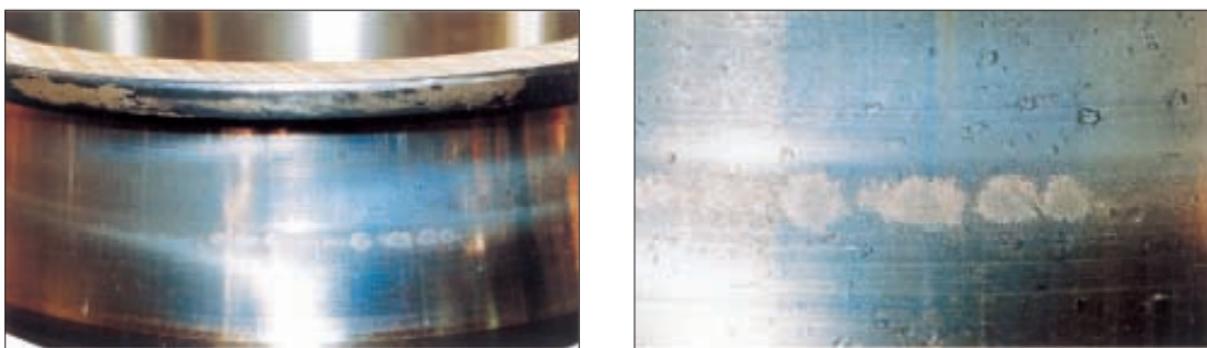
Escamamento é o processo em que regiões com textura áspera e grosseira são formadas por separação de pequenas partes de material dos rolamentos devido a fadiga do mesmo. Dentre as possíveis causas estão: carga excessiva, falha na instalação, carga de momento elevada, contaminação por partículas ou por 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. Retirado de NSK, 2014.



Descascamento, por sua vez, é o processo em que a superfície da pista começa a descascar, logo sem seguida sendo percebidas ondulações. Dentre as possíveis causas para esta 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 temperaturas altas anormais (NSK, 2014). A Figura 4 mostra uma pista com descascamento.

Figura 4 – Pista de rolamento com descascamento. Retirado de NSK, 2014.



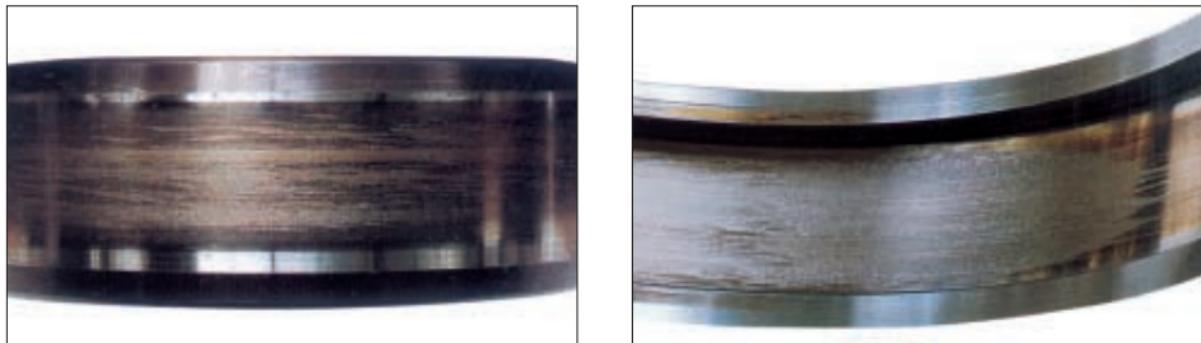
Arranhaduras trata-se de riscos que podem ocorrer durante a montagem, arranhões em razão de objetos estranhos e duros, além de amassados superficiais devido a impactos. As causas são presença de objetos estranhos, penetração por impacto no lado descascado, quedas e choques devido manejo inadequado além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

Figura 5 – Rolamentos com amassados e arranhaduras. Retirado de 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 repentinhas, 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. Retirado de NSK, 2014.



Fraturas, por sua vez, referem-se à 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. Retirado de NSK, 2014.



O aparecimento de trinca e lascamento se dá quando ocorre um descascamento localizado, nisto surgem pequenas trincas ou lascamentos, dentre as possíveis causas para esta 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. Retirado de NSK, 2014.



Em relação a gaiola danificada, esta falha acontece quando há fratura do pilar da gaiola. Isto resulta na quebra da gaiola. As possíveis causas para esta falha são falha de instalação, 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. Retirado de 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. Retirado de NSK, 2014.



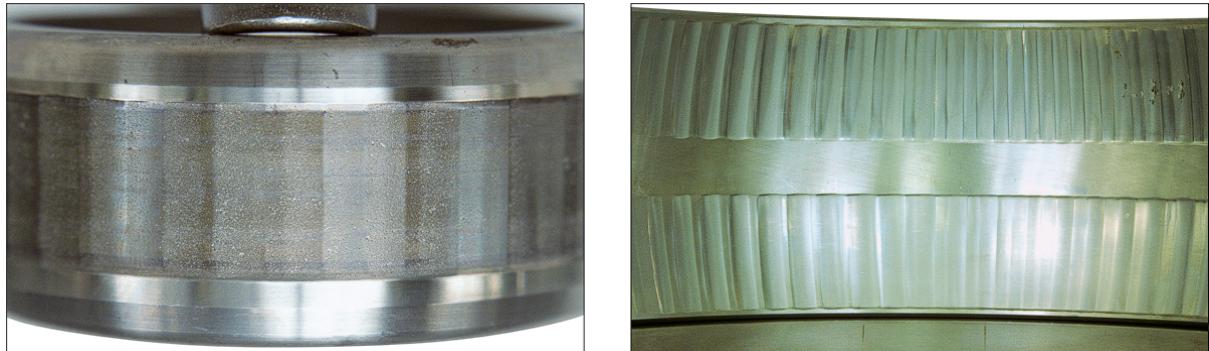
Outra falha comum, *Pitting*, ocorre quando a superfície se torna áspera e os elementos apresentam uma coloração fosca. As causas incluem lubrificação inadequada, presença de partículas estranhas, afinamento das pontas dos corpos rolantes em razão de um desalinhamento, ruptura da película lubrificante 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*. Retirado de 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. Retirado de NSK, 2014.



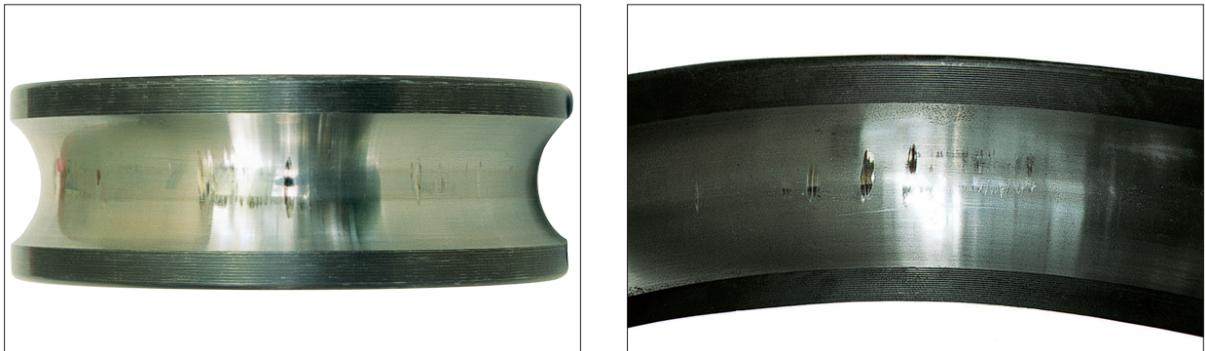
Corrosão por contato, ou corrosão por atrito, é um tipo de desgaste por raspagem corrosiva. Há duas formas de corrosão por atrito: no primeiro, forma-se um pó de óxido sobre as superfícies de contato; no segundo, ocorre afundamentos nas pistas ao longo do passo dos corpos rolantes. As causas para estas 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. Retirado de NSK, 2014.



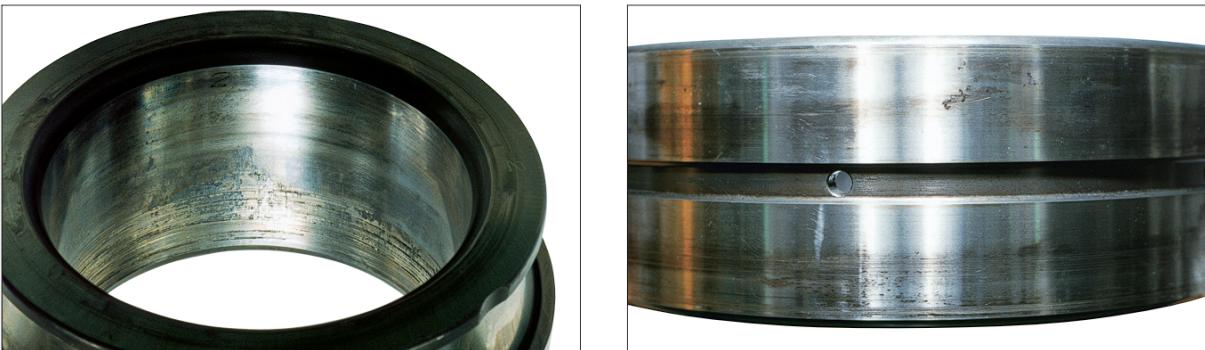
Falso brinel refere-se ao esmagamento nas pistas e elementos rolantes por vibração ou oscilação entre os pontos de contato. Dentre as possíveis causas estão lubrificante deficiente ou pequena amplitude no movimento de oscilação (NSK, 2014). A Figura 14 mostra um anel interno e um externo com esmagamento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

Figura 14 – Pistas com esmagamento. Retirado de 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. 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. Retirado de NSK, 2014.



Corrosão eletrolítica diz respeito a formação de afundamentos sobre as pistas. Estes afundamentos transformam-se gradualmente em ondulações. A causa para isto 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 facilitação da visualização, bem como o dano em rolos.

Figura 17 – Corrosão eletrolítica em rolamentos. Retirado de NSK, 2014.



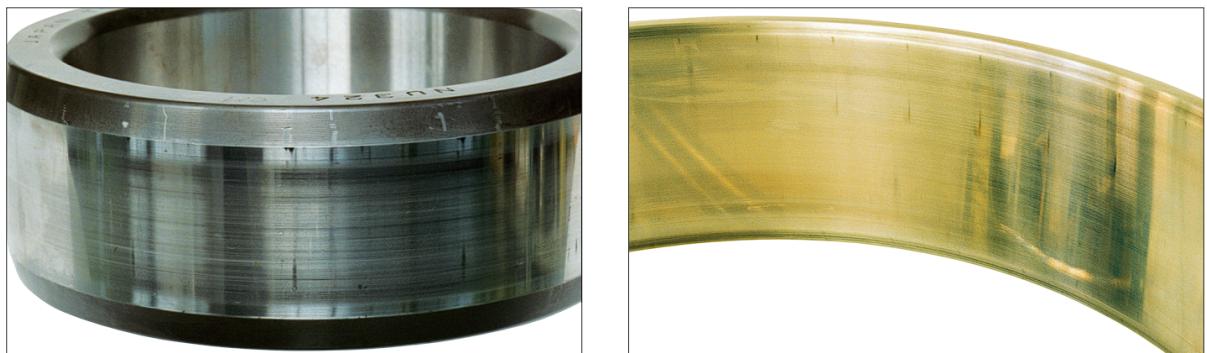
Oxidação e corrosão é uma falha que ocorre quando a superfície se torna parcial ou totalmente oxidada, e ocasionalmente óxido também surge ao longo das linhas do passo dos elementos rolantes. Causas para esta falha incluem condições inadequadas de armazenamento, embalagem inadequada, óleo protetivo insuficiente, 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. Retirado de NSK, 2014.



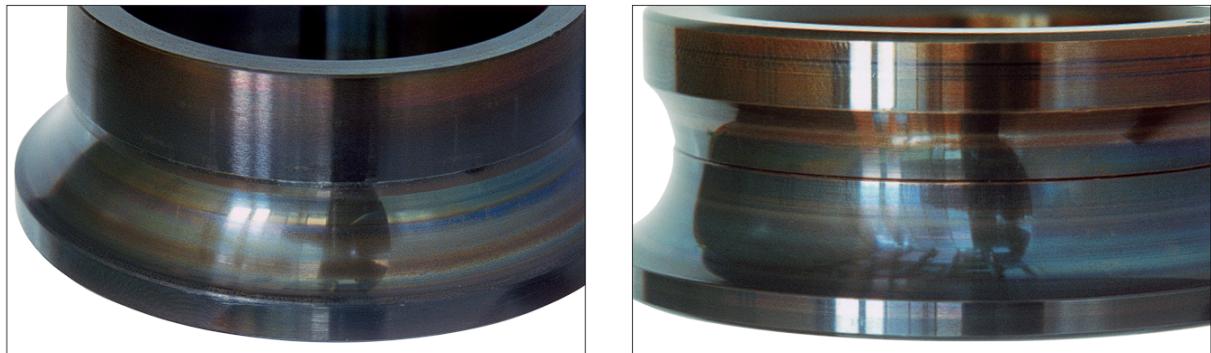
Falhas na instalação têm como suas principais decorrências longo riscos na superfície das pistas ou dos elementos rolantes. As causas mais comuns são inclinação dos anéis ou impactos durante instalação ou remoção. A Figura 19 mostra um anel interno e externo com riscos decorrentes de falha de instalação.

Figura 19 – Rolamentos com falhas de instalação. Retirado de 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. Retirado de NSK, 2014.

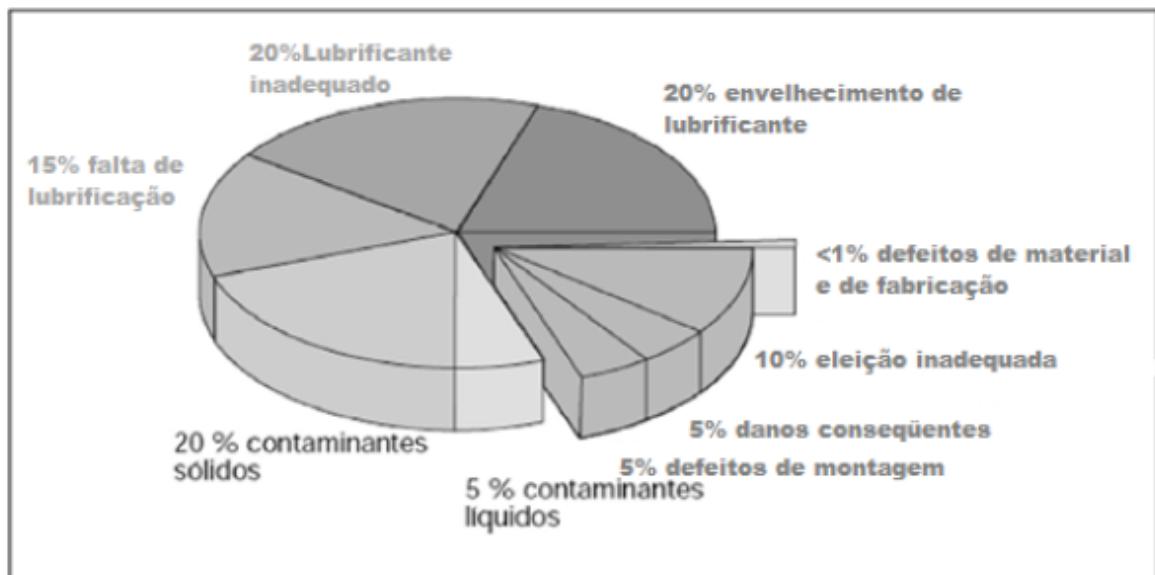


Ao ocorrem danos em rolamentos, verifica-se que ocorre o contato entre a superfície defeituosa de um elemento rolante e outra superfície sem defeito. Isto gera um choque entre estes elementos, o que causa um impulso que promove uma excitação tanto na máquina, quanto no rolamento. As causas para isto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

4.2.5 Principais causas de defeitos em rolamentos

Santander, 2014, fornece uma lista de danos primários que dão origem à danos secundários que, por sua vez, induzem falhas nos rolamentos. A Figura 21 apresenta as causas mais comuns para aparecimento de falhas em rolamentos.

Figura 21 – Causas de defeitos em rolamentos. Retirado de NSK, 2014.



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 este 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, caracteriza-se este movimento como Movimento Harmônico, forma mais simples que a vibração pode se apresentar (HOLANDA, 2016). Holanda, 2016, apresenta como exemplo disto 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 este 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, utiliza-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, estes 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 que representa o deslocamento, x:

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

A velocidade, por sua vez, é medida em milímetros por segundo (mm/s). A velocidade é a derivada primeira do deslocamento. O deslocamento implica na 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, p.21 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:

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

Limitando-se o escopo de abrangência, este 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 disto 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

De acordo com Ponci e Cunha, 2005, as frequências características de defeitos dos rolamentos são assíncronas, ou seja, estas não se dão em múltiplos inteiros da velocidade de rotação do eixo. As falhas de rolamentos geram quatro frequências características básicas, relacionadas às características e comportamento de seus componentes.

Assim, tem-se as seguintes fórmulas para o cálculo das frequências característica de defeitos nos rolamentos.

FTF (*fundamental train frequency*) 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, nestas fórmulas, temos fr , que é a subtração da frequência de rotação da pista interna pela frequência de rotação da pista externa; 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 destas 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 as vibrações mecânicas e as 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 destas 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. Isto excita ressonâncias tanto no rolamento quanto na máquina, dadas pelas frequências características de defeitos para cada rolamento. Sabendo-se que tais frequências podem ser obtidas através 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 destes 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. Meola, 2005, afirma 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.

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 esta quantifica a energia diretamente ligada à vibração e, portanto, é um indicador do poder destrutivo desta. O nível RMS é, por este 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:

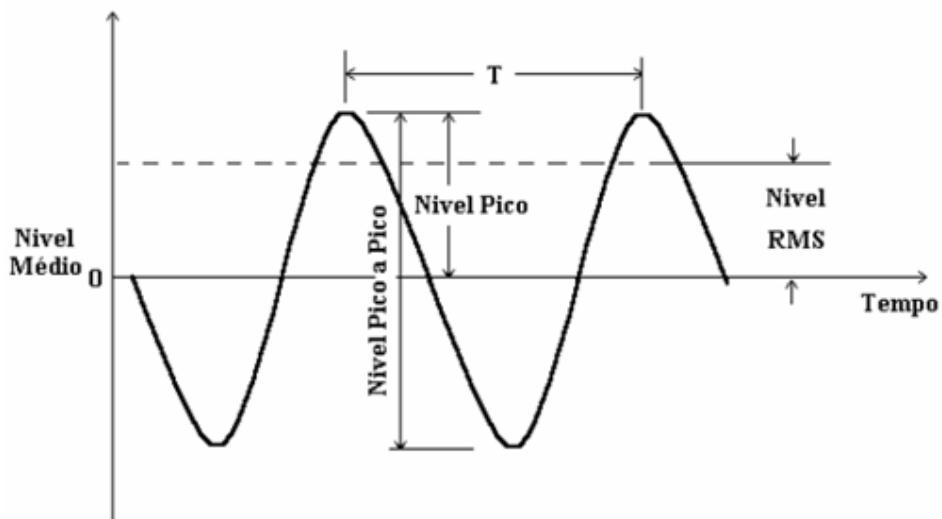
$$\text{Nível Médio} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)dt \quad (11)$$

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. Retirado de 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 estes é de aproximadamente 3dB, dada por:

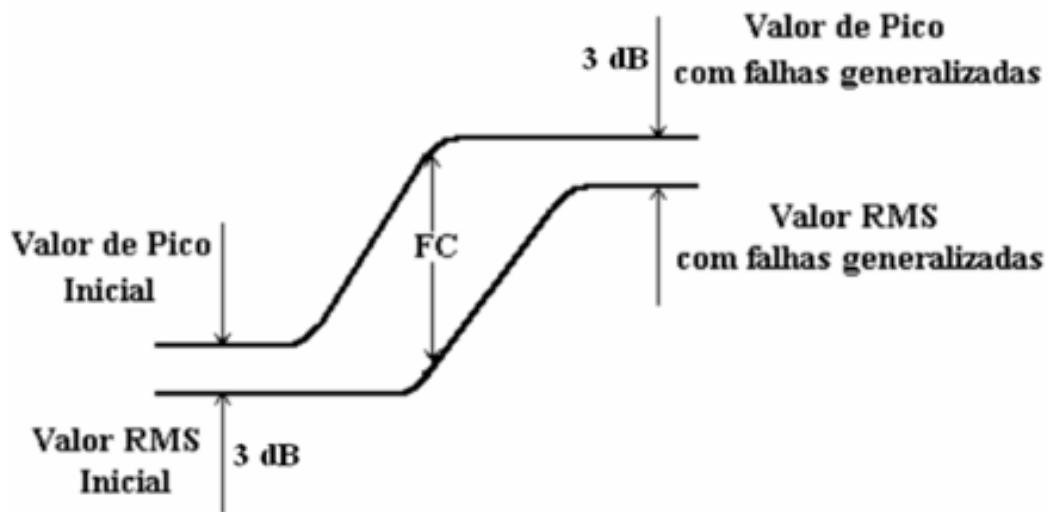
$$20\log_{10} \left(\frac{\text{Nível Pico}}{\text{Nível RMS}} \right) \quad (13)$$

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.

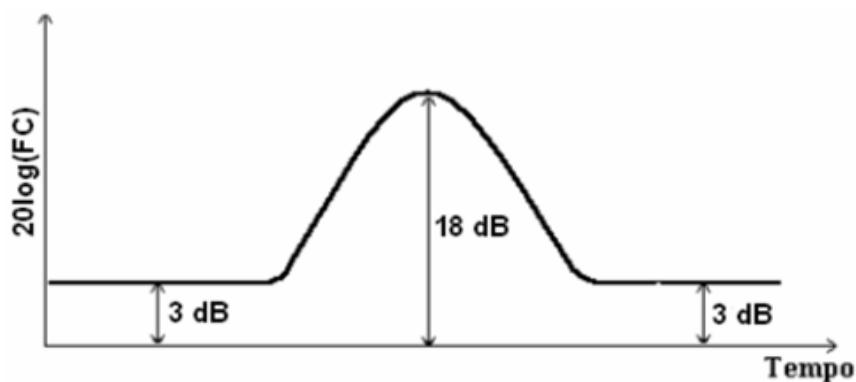
A Figura 23 demonstra esta relação entre os valores de Pico e RMS.

Figura 23 – Relação entre os valores de Pico e RMS com o desgaste progressivo de rolamentos. Retirado de 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. Retirado de 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 a 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 este valor tende a aumentar conforme o rolamento se deteriora.

É importante observar que estes 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 necessário 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. Desta forma, técnicas de análise espectral, tal como a transformada rápida de Fourier, podem mostrar em qual local do espectro de frequências se localiza 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, se recomenda 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.

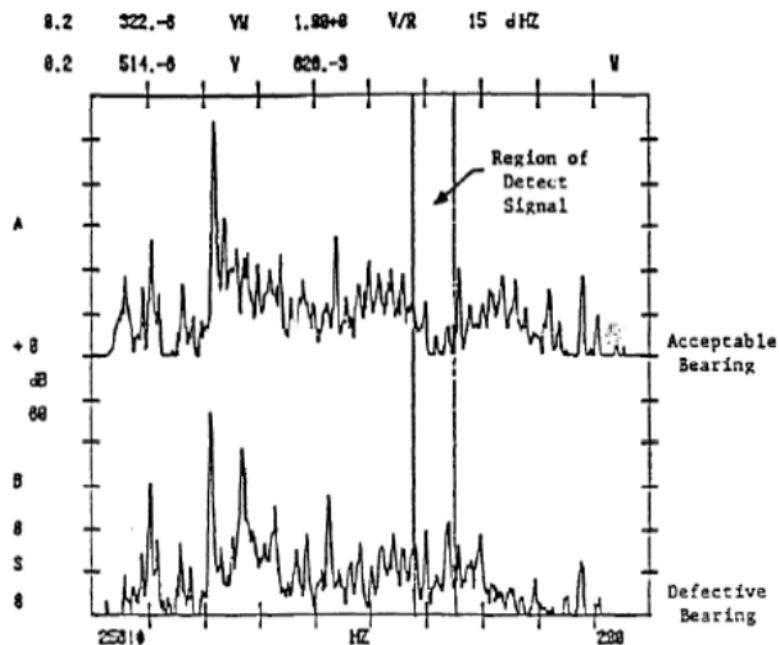
Dentre as técnicas de análise espectral, a mencionada transformada rápida de Fourier, conhecida pela sigla FFT, é uma das mais largamente empregadas. Entretanto, para que se obtenha resultados mais claros com a aplicação da FFT na análise espectral de rolamentos, dado o mascaramento das frequências dos 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 para este fim, a análise de envelope é a mais largamente empregada.

4.3.3 Análise de envelope do sinal

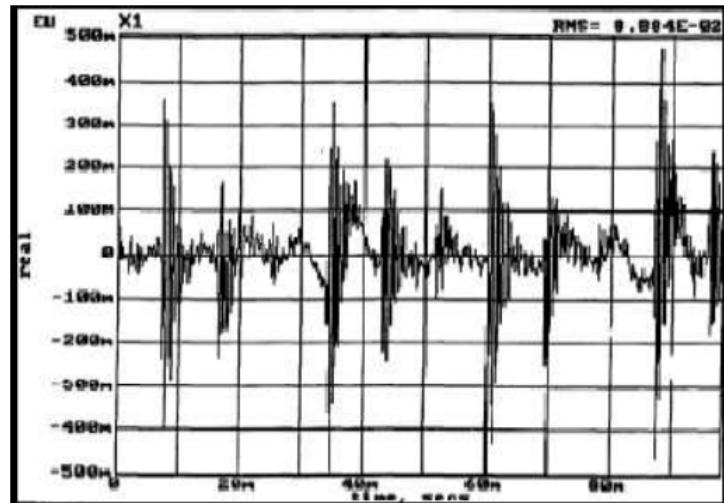
Segundo Barreiro, 2010, a NASA apoiou, em 1971, um programa para investigação da detecção de defeitos em rolamentos. Neste, foram conduzidos experimentos onde se deu a comparação dos sinais de rolamentos em bom estado com o de rolamentos com danos manualmente inseridos na pista interna. Para esta comparação os dados de vibração, emissões acústicas e temperatura dos rolamentos foram capturados. A Figura 25 mostra a diferença entre os espectros de vibração de um rolamento em bom estado e de um rolamento com dano introduzido.

Figura 25 – Comparação de espectros de vibração de um rolamento em bom estado e de um rolamento defeituoso. O sinal acima representa o rolamento em bom estado e o sinal abaixo, o rolamento defeituoso. A faixa destacada mostra a região de dano, explicitando as diferenças entre ambos. Retirado de Barreiro, 2010.



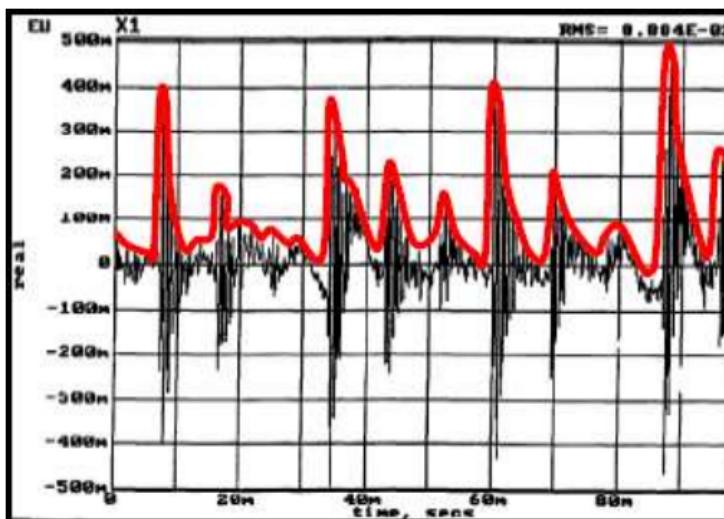
Dada a sutil diferença entre estes, decidiu-se conduzir maiores investigações (BARREIRO, 2010). A Figura 26 mostra o sinal do rolamento com dano introduzido visualizado, através de osciloscópio, no domínio do tempo.

Figura 26 – Sinal temporal do rolamento com dano introduzido. Retirado de Barreiro, 2010.



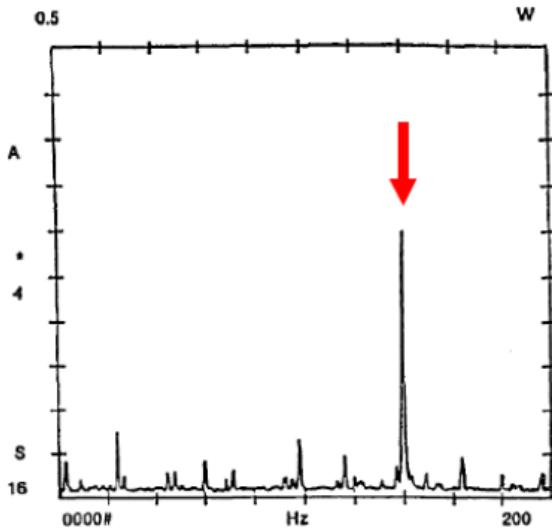
Com este sinal visualizado através do osciloscópio, o tempo entre os sinais de impacto foi medido e obteve-se, desta forma, a frequência de defeito na pista interna. Caso uma linha que envolvesse o sinal fosse traçada, conforme mostrado na Figura 27, então o espectro deste novo sinal determinado por esta linha deveria mostrar a frequência do defeito. A este se dá o nome de envelope (BARREIRO, 2010).

Figura 27 – Envelope do sinal temporal do rolamento com dano introduzido. Retirado de Barreiro, 2010.



A Figura 28 mostra este espectro. A seta vermelha aponta a falha, agora evidente devido sua elevada amplitude.

Figura 28 – Espectro do envelope do sinal temporal do rolamento com dano introduzido.
Retirado de Barreiro, 2010.



Desta forma, o trabalho aponta para a eficácia deste método na detecção de falhas incipientes em rolamentos.

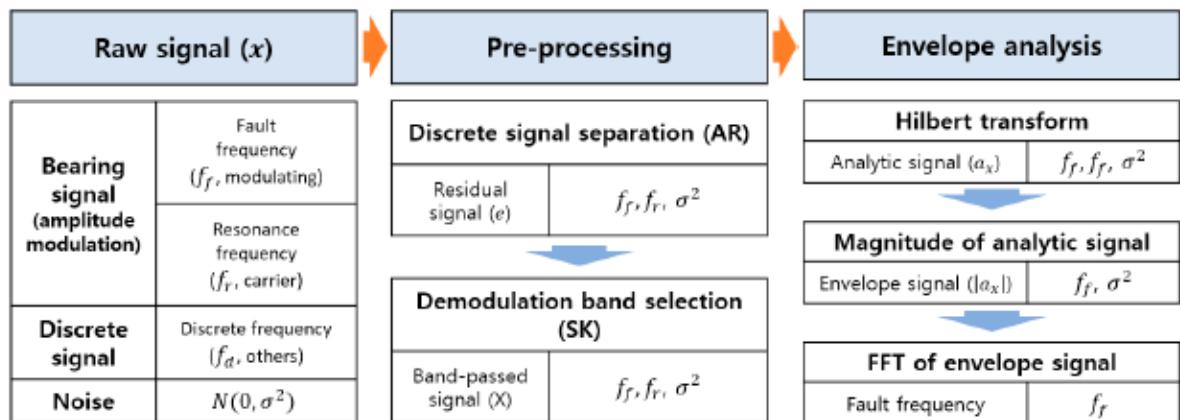
Uma vez que possibilita a detecção de falhas de rolamentos em um espectro de frequências através da comparação deste espectro com as frequências esperadas (KIM et. al, 2020). Ainda Segundo Randall, 2011 *apud* Almeida, 2013, a análise de envelope da vibração tem como objetivo a troca de uma faixa mais 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 através 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 através da construção de um sinal analítico complexo no domínio do tempo, onde a parte imaginária deste sinal se dá pela transformada de Hilbert da parte real.
4. Cálculo do espectro do sinal do envelope, onde obtém-se, 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, através da curtose espectral por janela de amostragem, para otimização da banda para o filtro passa-faixa. A Figura 29 mostra o processo de análise de Envelope do sinal com estas etapas de pré-processamento.

Figura 29 – Análise de Envelope com etapas de pré-processamento do sinal. Retirado de Kim, 2020.



4.3.4 Detecção de Falhas em Mancais de Rolamentos

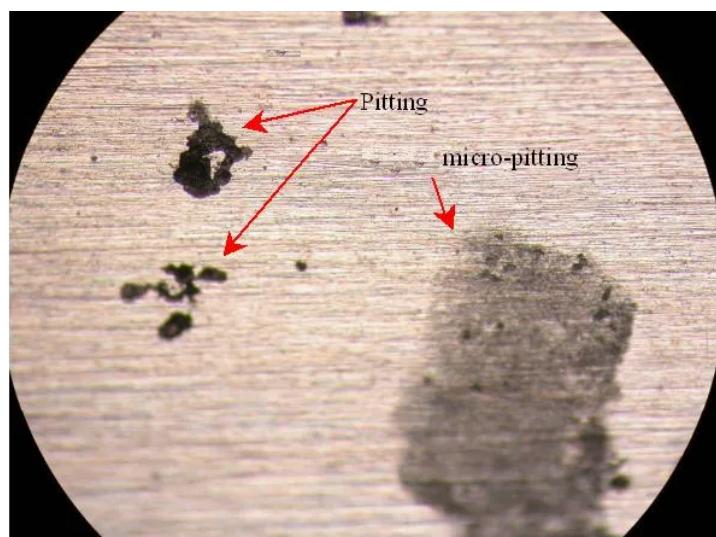
O diagnóstico de falhas em rolamentos desempenha, como visto, um importante papel na manutenção de maquinário rotativo. Como descrito na seção 4.3.1, as frequências características de defeito dos rolamentos podem ser calculadas a partir de suas propriedades geométricas e rotação ao qual estão submetidos.

Quando um rolamento desenvolve falhas, além de apresentar tais frequências, elas 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

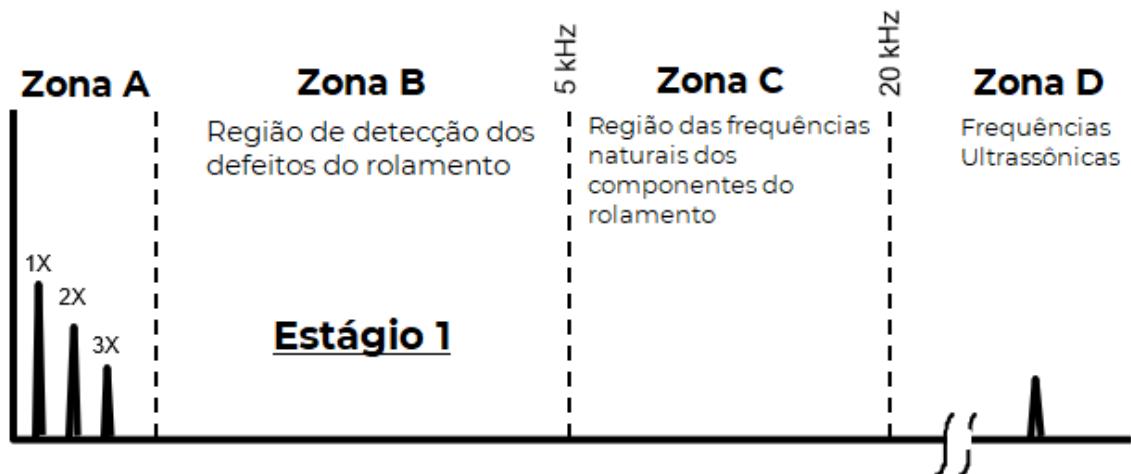
pequenas trincas que criam ondas elásticas. A energia destas ondas ainda é baixa e a vida útil nominal esperada é de 10% a 20%. Desta forma, para que seja possível a detecção através de técnicas como o envelope do sinal, é necessário que o tipo de sensor utilizado tenha grande sensibilidade e seja montado o mais próximo possível da zona de carga do rolamento (GRANEY e STARRY, 2011; CBM Connect, 2021). A Figura 30 mostra um exemplo de falha neste estágio.

Figura 30 – Estágio 1



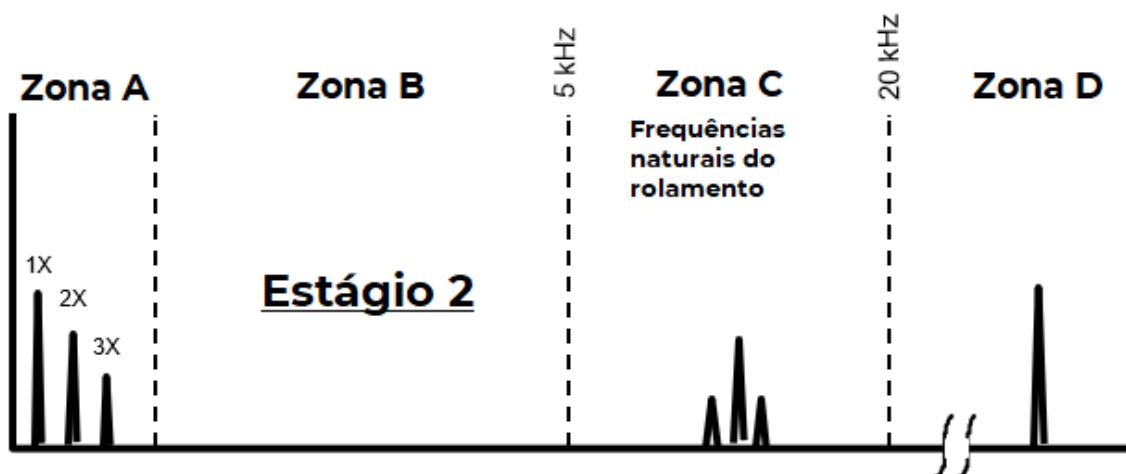
A Figura 31 demonstra a localização, no espectro de frequências, do sinal esperado para uma falha neste primeiro estágio, com um pico na Zona D que representa as frequências ultrassônicas.

Figura 31 – Primeiro estágio de defeito no rolamento. Adaptado de ACOEM, 2019.



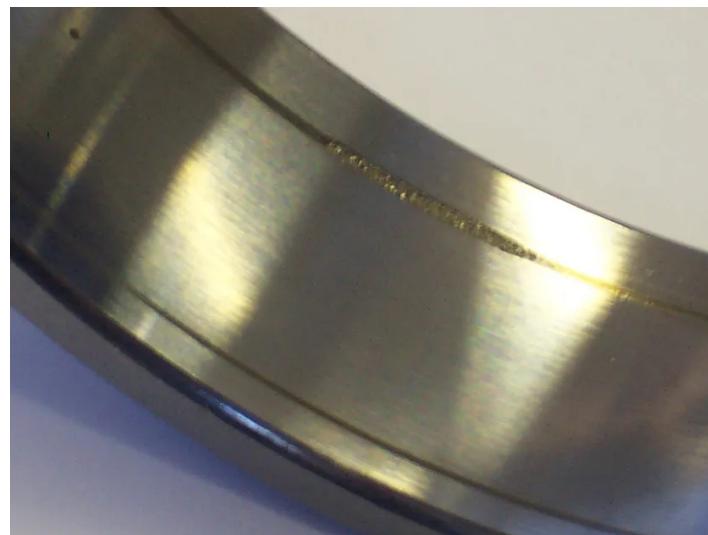
Já no segundo estágio de defeito no elemento rolante, a deterioração progride e a intensidade de impacto das forças também, de forma que esta torna-se suficiente para excitar as frequências naturais dos componentes do rolamento, que se encontram, usualmente, na faixa dos 2 kHz aos 6 kHz (GRANEY e STARRY, 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 32 mostra o aumento da amplitude na componente ultrassônica e a aparição das excitações nas frequências naturais do rolamento.

Figura 32 – Segundo estágio de defeito no rolamento. Adaptado de ACOEM, 2019.



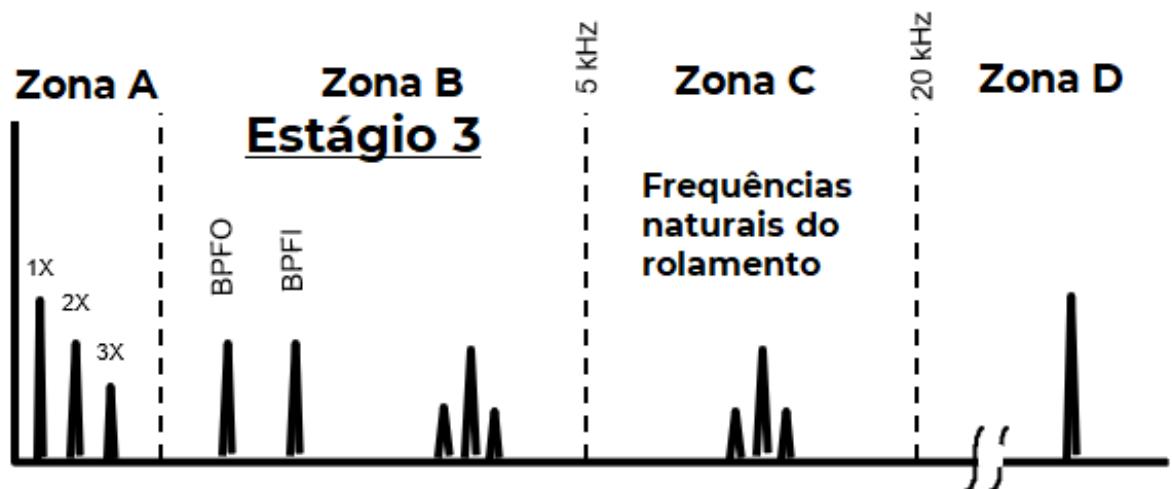
Já no terceiro estágio os defeitos começam a se mostrar aparentes à olho nu, sendo claramente visíveis. A deterioração progride e, nesta fase, as frequências características de defeito surgirão claramente no espectro. Uma vez que este estágio é detectado, o rolamento possui vida útil nominal restante 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 33 mostra um exemplo de rolamento com este estágio de falha em sua pista externa.

Figura 33 – Pista externa em segundo estágio de defeito no rolamento. Adaptado de ACOEM, 2019.



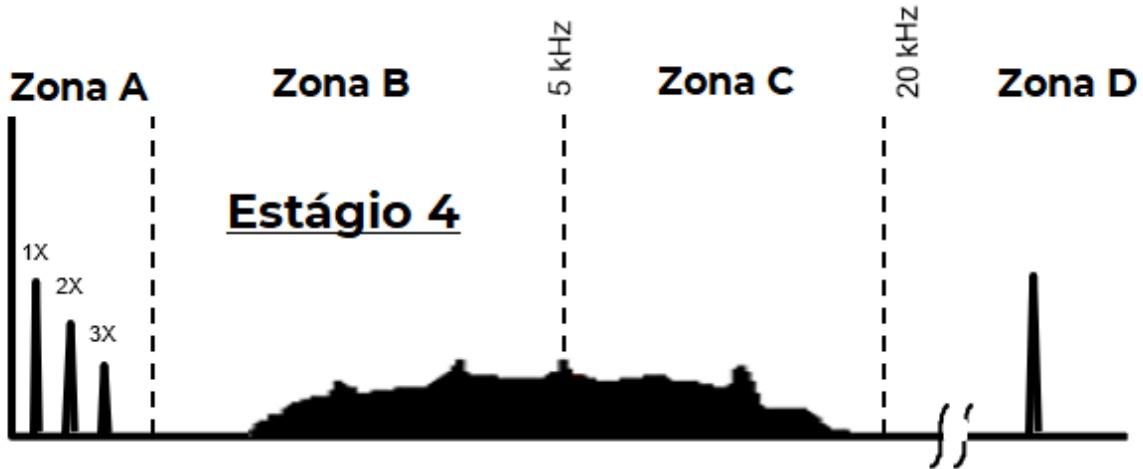
Já a Figura 34 mostra o espectro de frequências neste terceiro estágio, com aparição clara das frequências características de defeito na Zona B.

Figura 34 – Terceiro estágio de defeito no rolamento. Adaptado de ACOEM, 2019.



Por fim, o quarto estágio representa a última etapa de deterioração antes da falha total. Neste 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 máscara as frequências características, conforme visto na Figura 35.

Figura 35 – Quarto estágio de defeito no rolamento. Adaptado de 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 se dará o aparecimento de frequências características de defeitos, a BPFO, BPFI, BSF e FTF, que possibilitarão a determinação de onde a falha está ocorrendo. Além disto, 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 destas falhas, as técnicas anteriormente mencionadas, tais como a análise por meio de FFT, PSD e o método de Envelope do sinal, são empregadas.

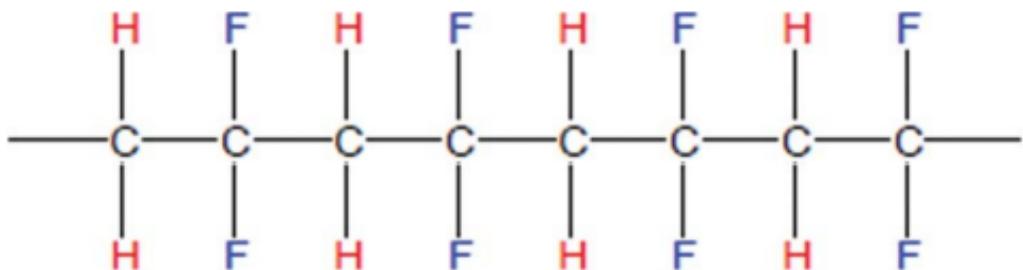
Para isto, entretanto, faz-se necessária a monitoração dos rolamentos com um elemento sensor, tal como filme PVDF.

4.4 Fluroreto de polivinilideno

O fluoreto 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 fluoreto 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. Esta unidade possui um grande 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 36 mostra a estrutura molecular do PVDF.

Figura 36 – Estrutura molecular do PVDF. Retirado de Xin, 2016.



Decorrente desta descoberta o interesse no estudo do PVDF se dá, dentre 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, p.204 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 através 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, este 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 este 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 mecânicamente elétrica, 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 ,

Devemos considerar o filme piezoelétrico como um material dinâmico que desenvolve uma carga elétrica proporcional a mudança no stress mecânico. 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. Uma possível analogia, fornecida por Chatigny e Robb, 1987, é a de uma esponja despejando e absorvendo um fluido, conforme uma pressão externa é aplicada e então liberada. O filme age como uma esponja liberando uma carga elétrica na frequência que 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, utilizamos 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 a 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 utiliza-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 a energia transformada dividida pela entrada total de energia. Assim, K_{312} é igual a energia elétrica transformada causadora de tensão mnica 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:

$$g_{33} = \frac{\text{Tensao no eixo 3}}{\text{Carga por area eletronica}} = \frac{m/m}{C/m^2} = \frac{m^2}{C} \quad (18)$$

Também deve-se considerar a constante hidrostática piezoelétrica, dh , que representa a razão de carga de curto-circuito 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 possa analisar os dados provenientes de sensores é necessário um sistema de aquisição de dados. França, 1997, define sistema de aquisição de dados afirmando que este trata-se de um conjunto de elementos interrelacionados, os quais visam 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 destes 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 nas quais esta precisa ser amplificada para que se adeque 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 através de um Amplificador Operacional. Este se trata de um amplificador multiestágio cujas características se almeja 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 através 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 este 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, destaca-se em particular as questões de amplificação e atenuação do sinal, essenciais em sistemas baseados em conversores analógico-digitais, A/D, onde obtém-se 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*, que 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 trata-se de um "dispositivo eletrônico que converte sinais analógicos em um formato digital equivalente". Este 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 trata-se da quantidade de entradas disponíveis para aquisição de dados. As faixas de conversão, de acordo com França, 1997, p. 15, 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, trata-se do "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 estes incrementos.

Já a velocidade, de acordo com a Omega, 2021, trata-se de ”a 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 em relação as taxas de amostragem que estas 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 a 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 a análise desta. Esta 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*, onde 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

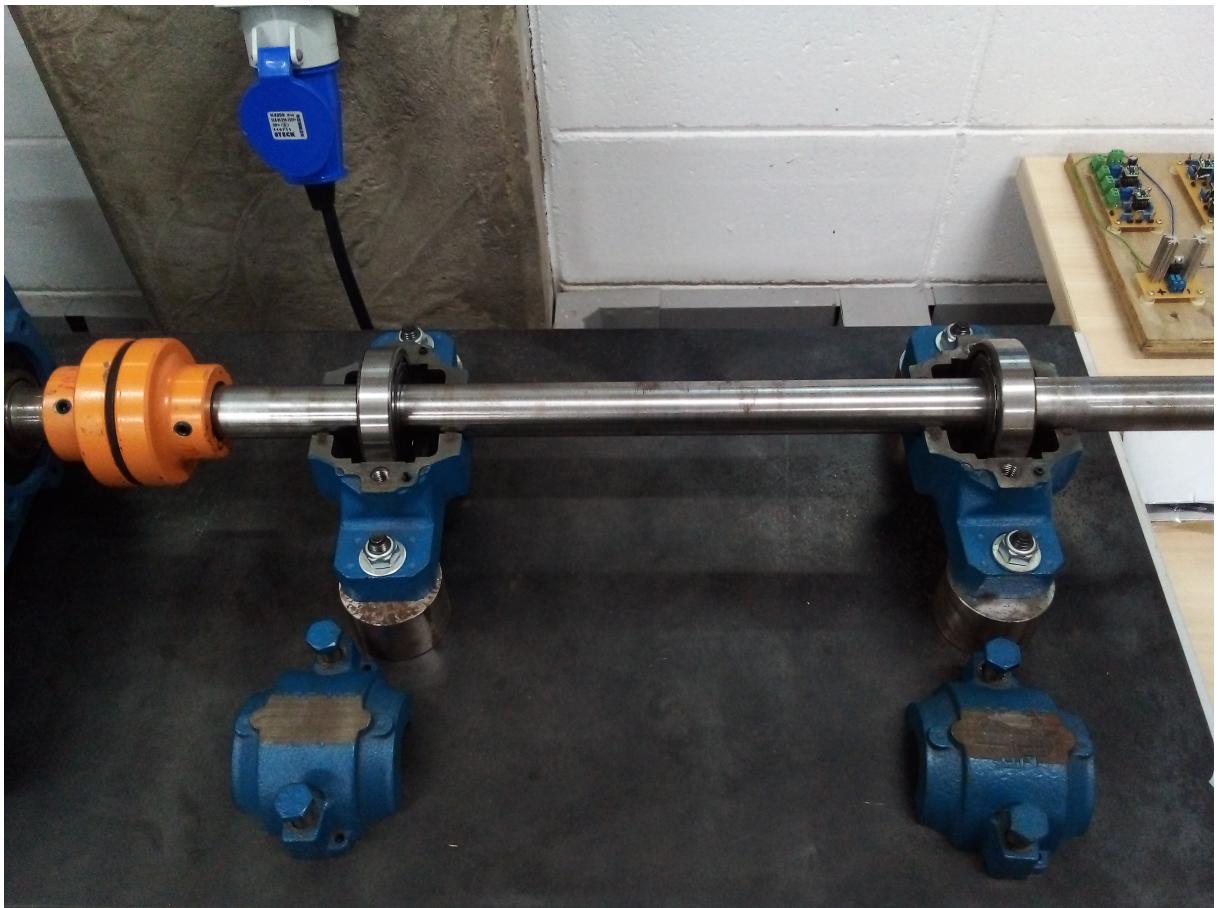
A Figura 37 mostra um modelo de rolamento autocompensador de rolos, tal como utilizado na bancada experimental.

Figura 37 – Rolamento autocompensador de rolos. Retirado de NSK, 2018.



A Figura 38 mostra os rolamentos já acoplado ao eixo motriz na bancada experimental, dentro de suas respectivas caixas.

Figura 38 – Rolamento autocompensador de rolos. Retirado de NSK, 2018.

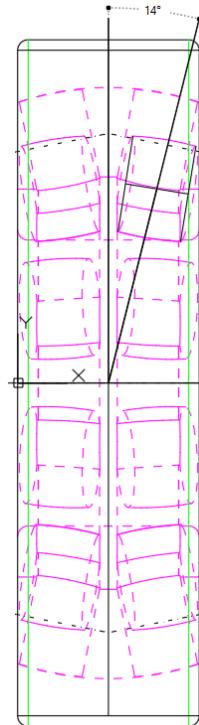


Algumas das medidas do rolamento necessárias para o cálculo das frequências características de defeito, a saber o ângulo de contato e o diâmetro dos elementos rolantes, estão disponíveis no *website* da fabricante NSK em um modelo CAD do mesmo, onde a partir deste calcularam-se os seguintes valores:

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

A Figura 39 mostra o CAD do rolamento NSK 21306CD com vista frontal, estando com as marcações para mensuração do ângulo de contato.

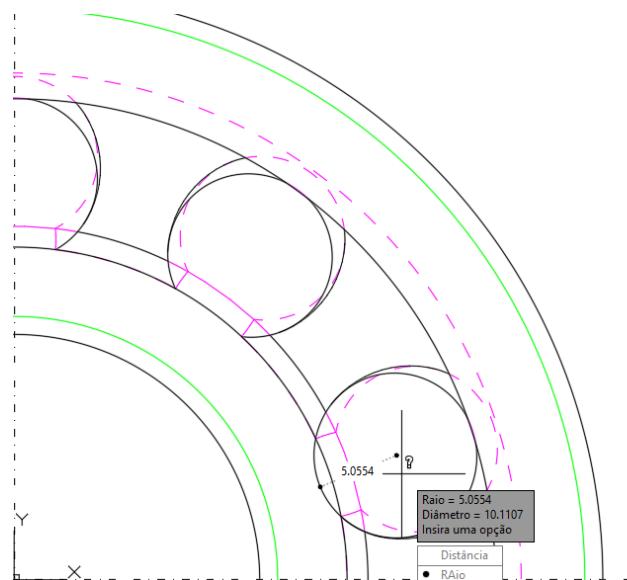
Figura 39 – Ângulo de contato calculado a partir do modelo CAD disponibilizado pela NSK.



Fonte: O autor (2022).

Já a Figura 40 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 40 – Diâmetro do elemento rolante calculado a partir do modelo CAD disponibilizado pela NSK.



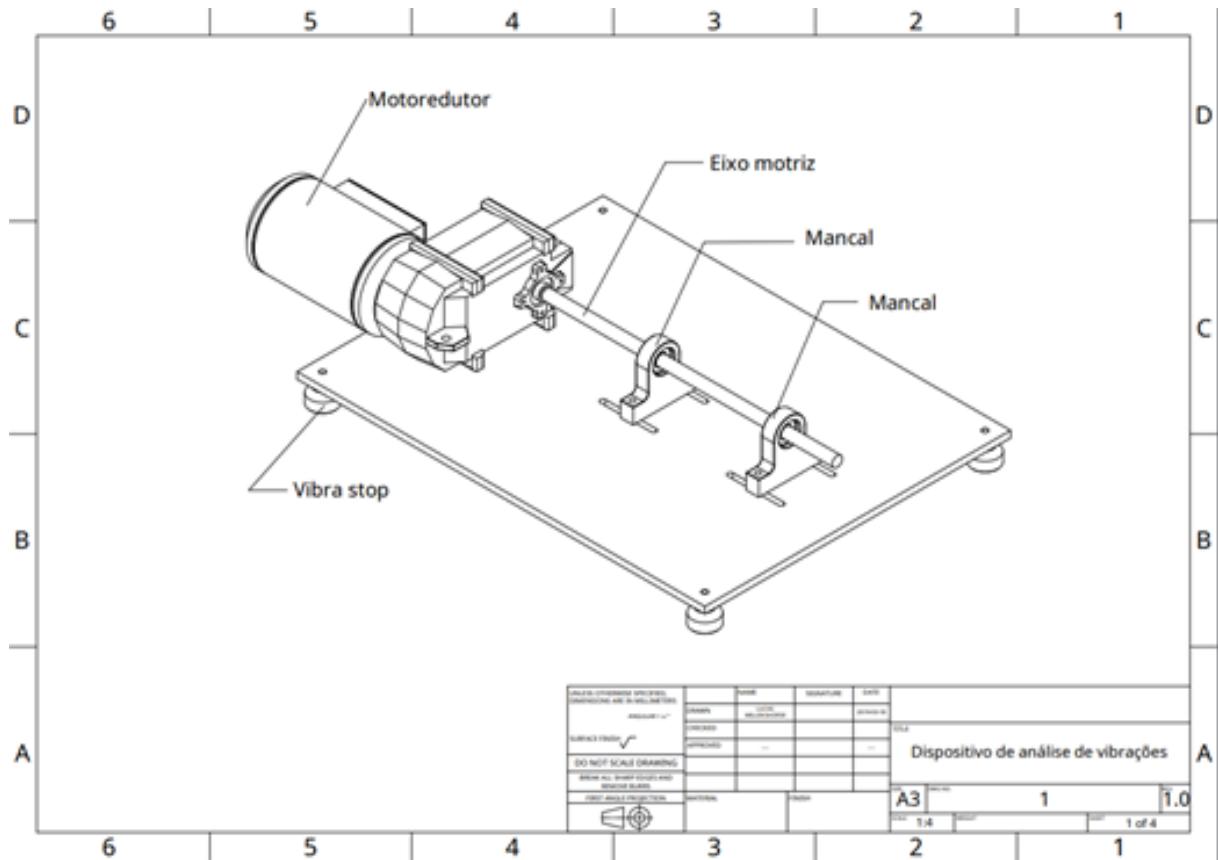
Fonte: O autor (2022).

As amostras do rolamento escolhido são novas e isentas de qualquer tipo de falha. Estas 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 motoredutor 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 41 mostra o projeto da bancada experimental.

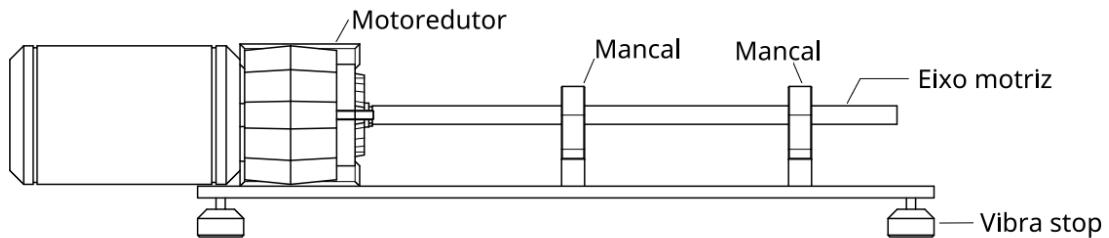
Figura 41 – Projeto da bancada experimental.



Fonte: O autor (2022).

A Figura 42 mostra uma visão lateral do dispositivo que será utilizado. Os sensores com seus respectivos acoplamentos serão afixados nos mancais.

Figura 42 – Projeto da bancada experimental visto lateralmente.



Fonte: O autor (2022).

Em relação a construção da bancada experimental, foi utilizado um torno mecânico do IFSP Câmpus Guarulhos para usinagem do eixo, e foi utilizada prensa a fim de realizar o acoplamento dos mancais de rolamentos ao eixo usinado e posteriormente este foi ligado ao motoredutor. A Figura 43 mostra a bancada experimental em sua fase inicial de elaboração.

Figura 43 – Bancada experimental em fase inicial de construção.



Fonte: O autor (2022).

Já a Figura 44 mostra a bancada com construção finalizada.

Figura 44 – Bancada experimental finalizada.



Fonte: O autor (2022).

Ao projeto inicial optou-se incluir duas melhorias: dispositivos isoamortecedores, capazes de bloquear vibrações externas para a bancada, bem como um acoplamento no eixo. A Figura 45 mostra o isoamortecedor da marca Gerb instalado. O projeto de instalação e dimensionamento do isoamortecedor está disponível no Apêndice D.

Figura 45 – Isoamortecedor Gerb.



Fonte: O autor (2022).

O motor utilizado na bancada de testes possui como características um torque de 400 N m, velocidade de 1750 RPM com taxa de redução de 48,90 vezes, resultante em velocidade de saída para o eixo de 35,8 RPM. A medição com Tacômetro em partida direta mostrou uma taxa de rotação do eixo de 37 RPM.

Figura 46 – Medição de rotação com partida direta.



Fonte: O autor (2022).

Também foi adicionado, para controle da bancada, um painel conforme mostrado na Figura 47.

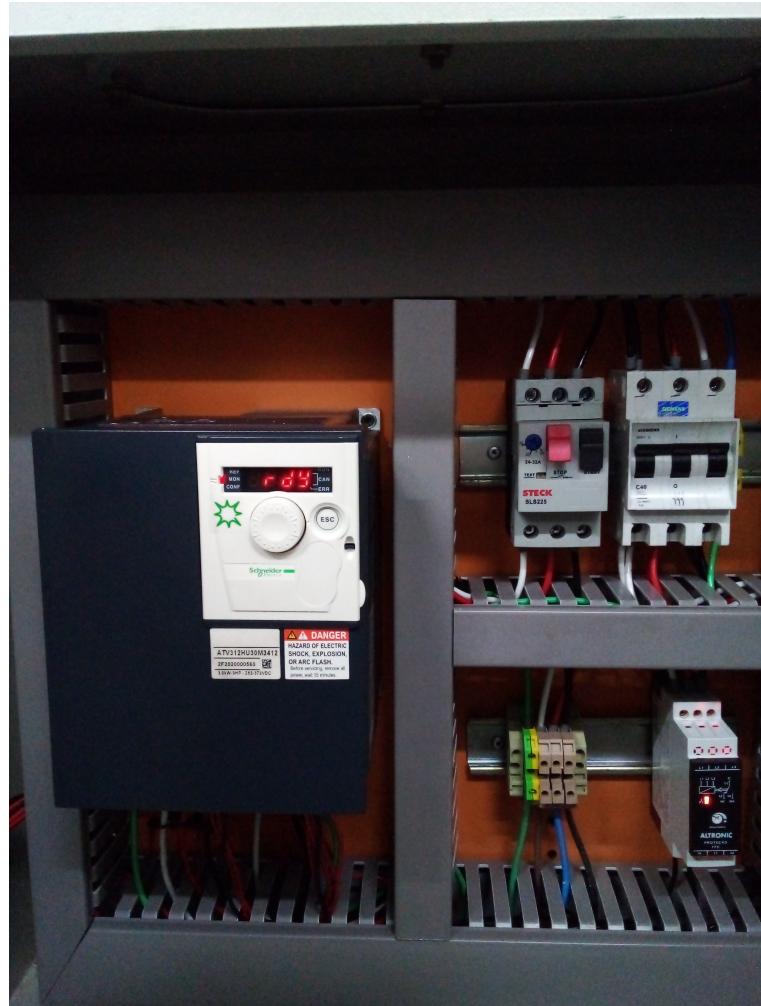
Figura 47 – Painel de controle da bancada experimental.



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 e um potênciometro para controle da velocidade da rotação do eixo através de um dispositivo inversor de frequências. A Figura 48 mostra a parte interna do painel.

Figura 48 – Inversor de frequências e instalação elétrica do painel da bancada experimental.



Fonte: O autor (2022).

Além disso, também foi adicionado um acoplamento ao eixo, a fim de se diminuir interferências da vibração do dispositivo motorreduutor nos rolamentos. A Figura 49 mostra o acoplamento unindo o eixo motriz ao motorreductor.

Figura 49 – Inversor de frequências e instalação elétrica do painel da bancada experimental



Fonte: O autor (2022).

A Figura 50 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 50 – Versão final da bancada experimental.



Fonte: O autor (2022).

5.3 Cálculo das frequências esperadas

A partir destes dados, 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:

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

Logo, para a *Fundamental Train Frequency* temos, aproximadamente:

$$FTF = \frac{37}{2} \left(1 - \frac{10.1}{51} \cos 14^\circ \right) = 15 \text{ Hz} \quad (21)$$

Para a *Ball Pass Frequency of The Inner Race* temos, aproximadamente:

$$BPFI = \frac{10}{2} 37 \left(1 + \frac{10.1}{51} \cos 14^\circ \right) = 220 \text{ Hz} \quad (22)$$

Para a *Ball Pass Frequency of The Outer Race* temos, aproximadamente:

$$BPFO = \frac{10}{2} 37 \left(1 - \frac{10.1}{51} \cos 14^\circ \right) = 141 \text{ Hz} \quad (23)$$

Por fim, para a *Ball Spin Frequency* temos, aproximadamente:

$$BSF = \frac{51}{2 * 10.1} 37 \left[1 - \left(\frac{10.1}{51} \cos 14^\circ \right)^2 \right] = 91 \text{ Hz} \quad (24)$$

O conhecimento prévio destas frequências é de grande importância na etapa de análise, uma vez que este

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 Specalties. A Figura 51 mostra o sensor de vibração.

Figura 51 – Sensor de vibração piezoelétrico. Retirado de Measurement Specialties, 2021.



Este trata-se 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. Este tem como principais características:

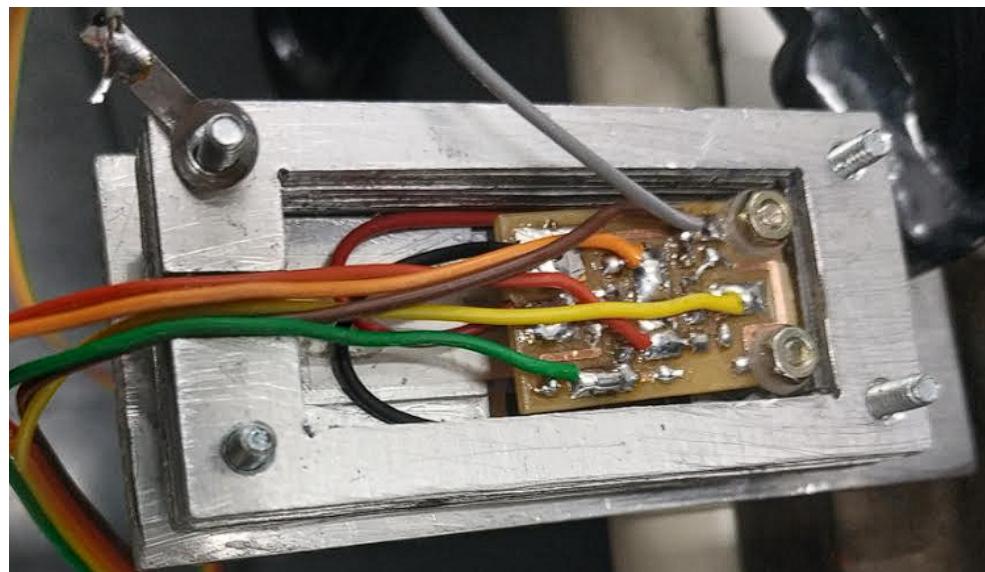
- Impedância mínima: 1 MΩ
- Impedância preferida: 10 MΩ e superior
- Tensão de saída: 10 mV-100 V dependendo da força e impedância do circuito
- Temperatura de armazenamento: -40°C a +70°C
- Temperatura de operação: 0°C a +70°C

Tendo em vista se tratarem de sensores de alta impedância, se faz 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 através de amplificador operacional.

Li et. al, 2011, explicitam o tratamento eletrônico para trabalho com o sensor PVDF, onde mostram a importância de um filtro rejeita-faixa e de amplificação operacional. Também os autores apontam que dada esta alta impedância, este se torna facilmente sujeito aos ruídos ambientes - tal como verificado experimentalmente nos testes realizados neste trabalho.

Portanto, a fim de mitigar este problema, a montagem dos sensores se deu em um encapsulamento de alumínio para diminuição destes ruídos. Os sensores foram acoplados com cola acrílica, a fim de que não ocorresse amortecimento significativo da vibração devido ao elemento colante. A Figura 52 mostra uma montagem do sensor em seu encapsulamento.

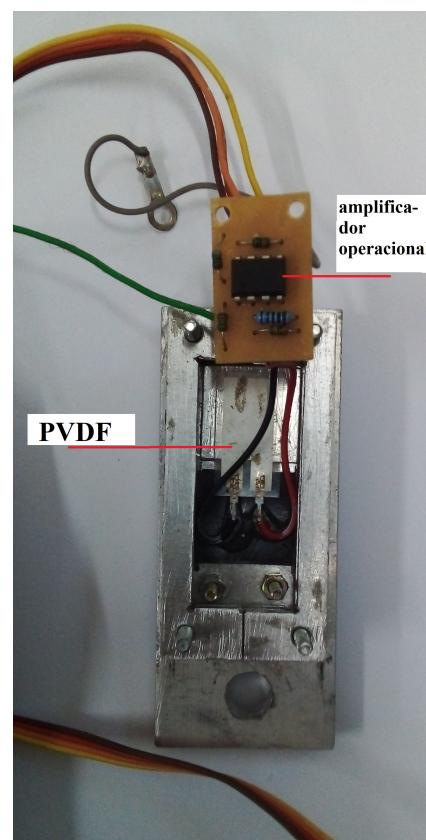
Figura 52 – Encapsulamento de alumínio com amplificador operacional e sensor filme PVDF.



Fonte: O autor (2022).

A Figura 53 mostra o sensor e o circuito amplificador operacional, montados no encapsulamento de alumínio, onde se acomoda o filme PVDF, além de amplificador operacional Texas Instruments TL082.

Figura 53 – Sensor de vibração piezoelétrico no encapsulamento de alumínio.

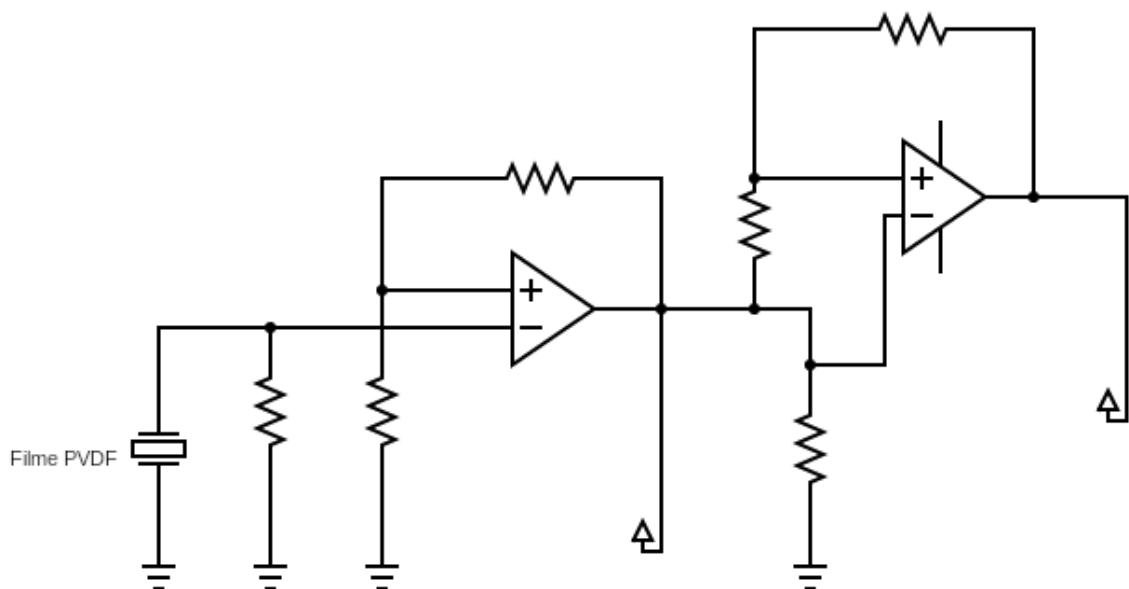


Fonte: O autor (2022).

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 54 mostra o desenho esquemático do circuito de condicionamento do sinal do sensor piezoelétrico. Neste buscou-se a amplificação do sinal, tendo se optado pelo amplificador operacional de propósito geral Texas Instruments TL082, uma vez que este possui dois canais e larga banda de 1 MHz (Texas Instruments, 2021). Os valores dos componentes deste circuito serão alterados a partir das informações obtidas nos testes.

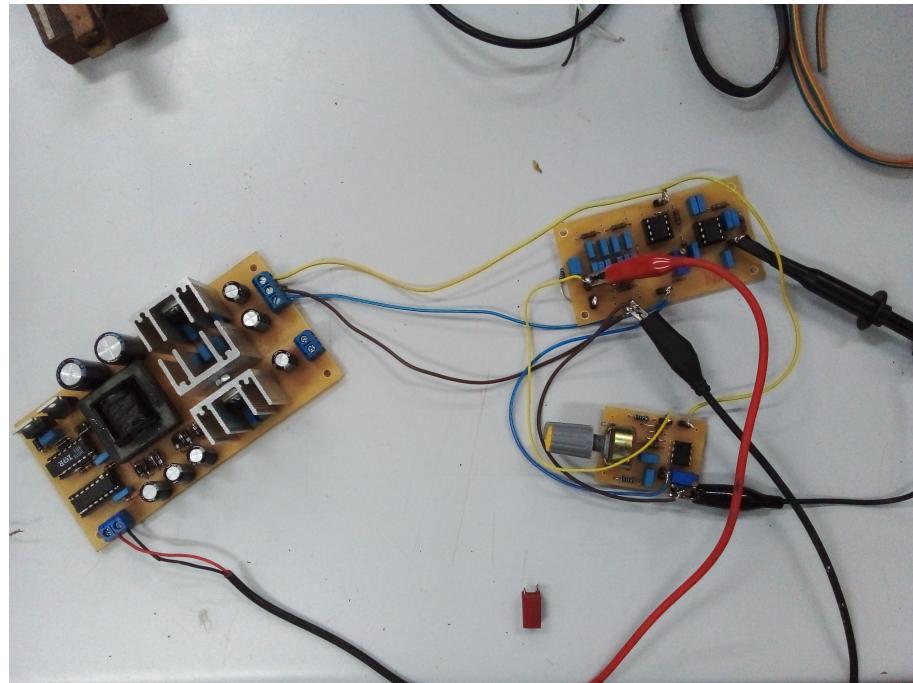
Figura 54 – Circuito amplificador operacional do sensor piezoelétrico.



Fonte: O autor (2022).

A partir de testes iniciais verificou-se que o sensor por ser de alta impedância, conforme anteriormente mencionado, apresentava altos níveis de ruído. Assim, foram projetados e construídos circuitos condicionadores de sinal para o trabalho com o sensor PVDF. A Figura 55 mostra o circuito rejeita-faixa construído, ligado à fonte de alimentação.

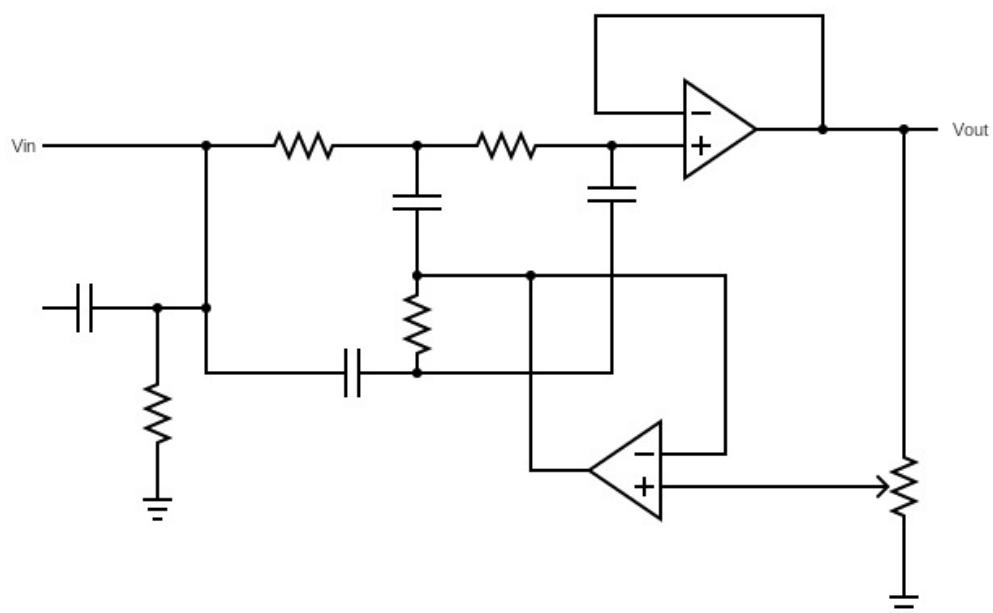
Figura 55 – Circuito rejeita-faixa para filtragem dos 60 Hz da rede.



Fonte: O autor (2022).

Os capacitores foram ligados em série para atingir os valores adequados e medidas com diferença inferior a 0.5% entre si, de modo a fornecer melhor resultado neste processo de filtragem. A Figura 56 apresenta o desenho esquemático do circuito rejeita-faixa.

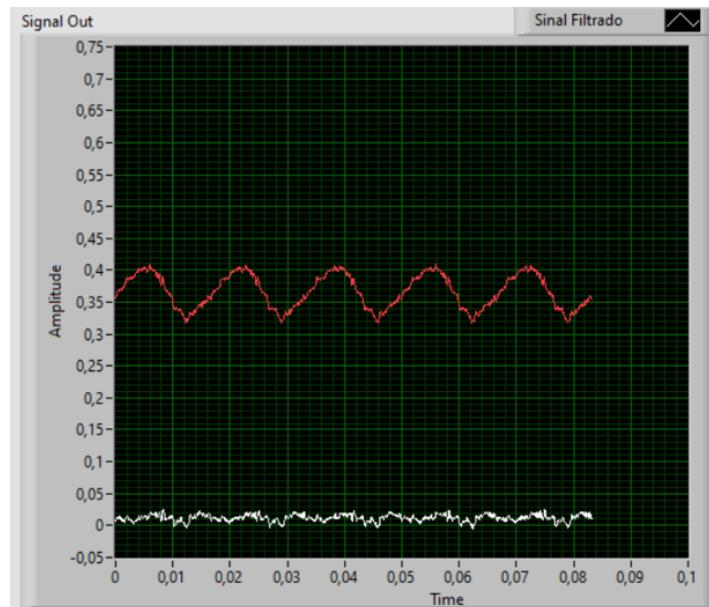
Figura 56 – Circuito rejeita-faixa para filtragem dos 60 Hz da rede.



Fonte: O autor (2022).

A Figura 57 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.

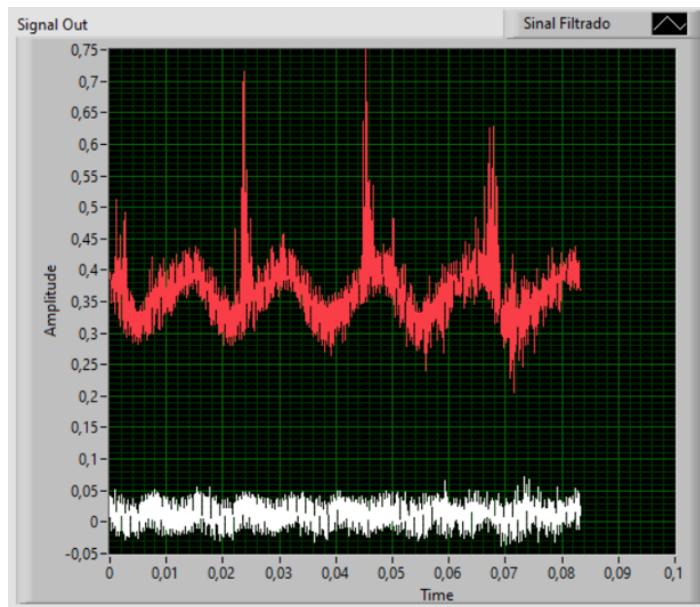
Figura 57 – Comparação do sinal filtrado com o sinal não-filtrado, com a bancada desligada.



Fonte: O autor (2022).

Já a Figura 58 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 58 – Comparação do sinal do sensor filtrado com o sinal não-filtrado, com bancada conectada à energia elétrica.



Fonte: O autor (2022).

Uma vez montado o aparato, os sinais decorrentes da vibração foram aqquisitados 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

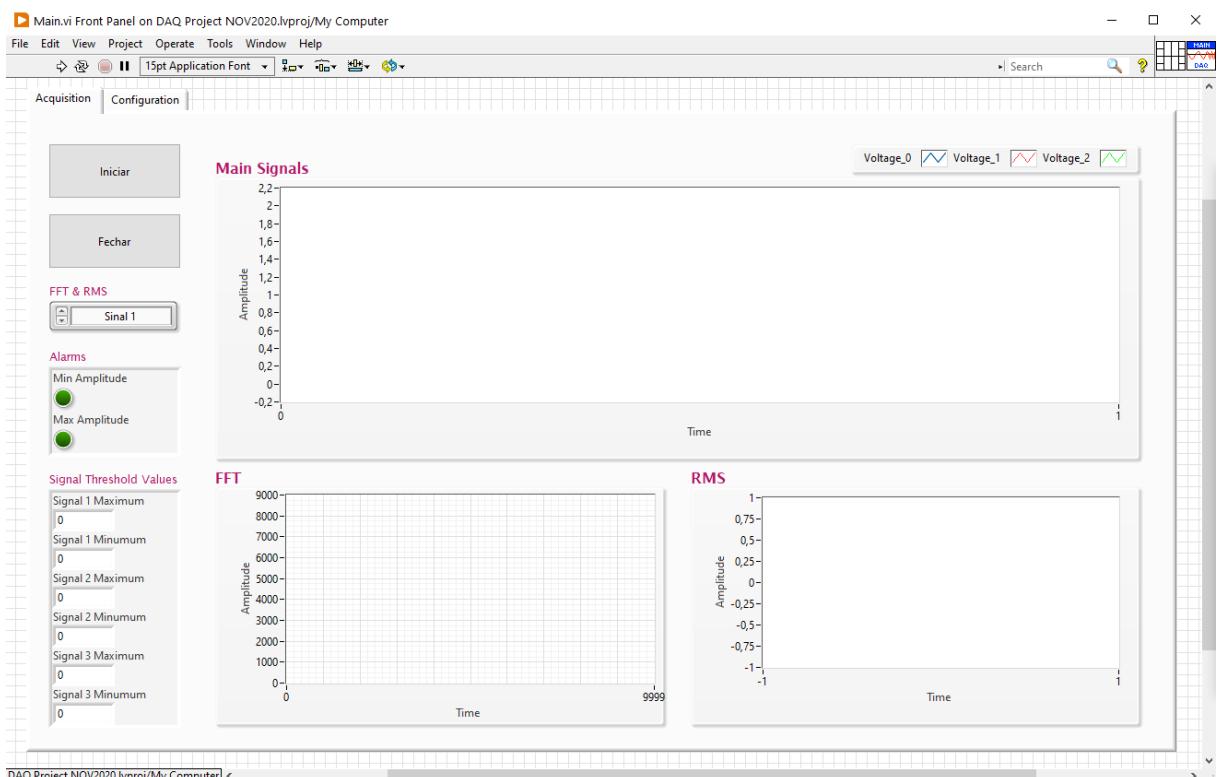
Para a aquisição de dados, foi construído software de aquisição com utilização do DAQ USB-6212 da National Instruments, com 16 entradas analógicas de 16 bits e até 400 kS/s. A Figura 59 apresenta o dispositivo utilizado.

Figura 59 – DAQ USB 6212. Retirado de National Instruments, 2021.



Em conjunto com a interface USB6212 foi utilizado 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 60 mostra a tela de aquisição de dados do sistema desenvolvido.

Figura 60 – Sistema de aquisição desenvolvido com LabView.

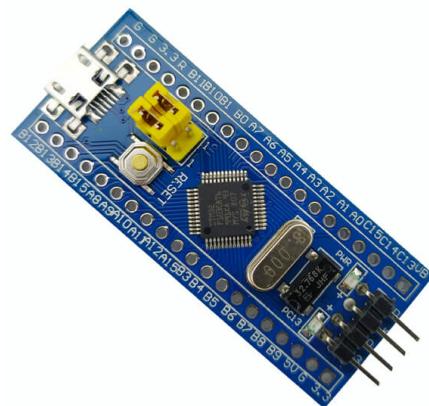


Fonte: O autor (2022).

O software desenvolvido na plataforma LabVIEW encontra-se disponível no Apêndice A.

Além disso também foi construído um sistema de aquisição baseado no microcontrolador STM32, modelo stm32f103, também conhecido como *bluepill*. Este foi 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 61 – 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 deste justificou-se como um experimento a fim de se verificar a viabilidade conjunta de um sistema de aquisição de baixo custo em conjunto com o sensor de baixo custo. Em conjunto com o sistema de comunicação em linguagem C, desenvolvido para o microcontrolador, 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 estes softwares encontram-se também 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 estes programas de análise dos dados pode ser encontrado no apêndice C.

Para construção destes foi utilizado a plataforma Anaconda e o Jupyter Notebook de Python, bem como também foi utilizado para teste dos códigos 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. Estes deram pela 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 ?? há uma quantidade perceptível de interferências eletromagnéticas no sensor por sua natureza de alta impedância.

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 ruidosas.

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. Estas taxas 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, da assinatura dos danos nos rolamentos.

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

Os danos nos rolamentos foram inseridos manualmente. A Figura 62 mostra o dano introduzido no elemento rolante, onde é possível verificar o desbaste de um dos rolos. Este processo seria semelhante, porém mais drástico, ao dano conhecido por esmagamento.

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

Fonte: O autor (2022).

Figura 62 – Dano introduzido no elemento rolante.



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 do sinal do sensor

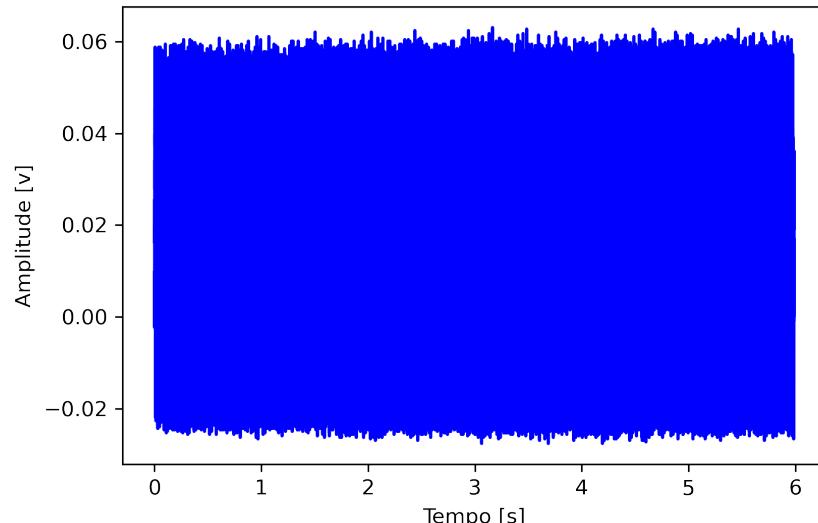
Para caracterização do sinal inerente ao sensor, submetido ao circuito de condicionamento e filtragem do sinal, foram feitos os seguintes experimentos: 1) aquisição do sinal do sensor com o maquinário desligado e desconectado da energia elétrica; 2) aquisição com o maquinário desligado, mas conectado à tomada; 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 a taxa de aquisição dos ensaios. A tabela

Estes três cenários distintos propostos visaram a verificação da amplitude de ruídos elétricos que ainda fossem capaz de interferências no sinal.

A Figura 63 mostra o sinal temporal da bancada de ensaios desconectado da energia elétrica.

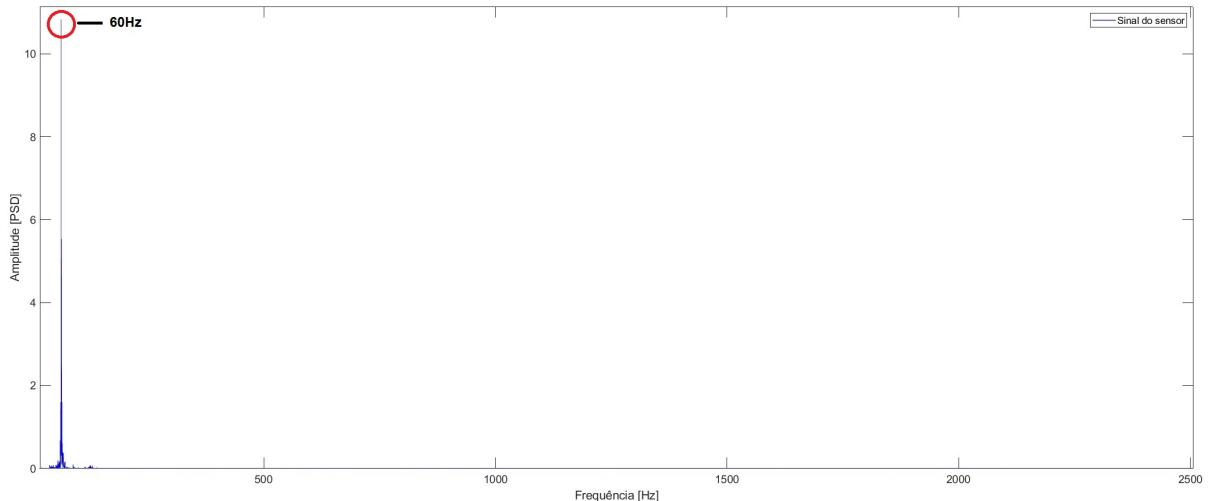
Figura 63 – Sinal temporal da bancada desconectada da energia elétrica.



Fonte: O autor (2022).

O sinal temporal aponta a presença de um ruído, com amplitude pico a pico de aproximadamente 8 mV. Calculando-se o FFT e o PSD do sinal, foi obtido o resultado mostrado na Figura 64.

Figura 64 – Espectro do sinal da bancada desconectada da energia elétrica.

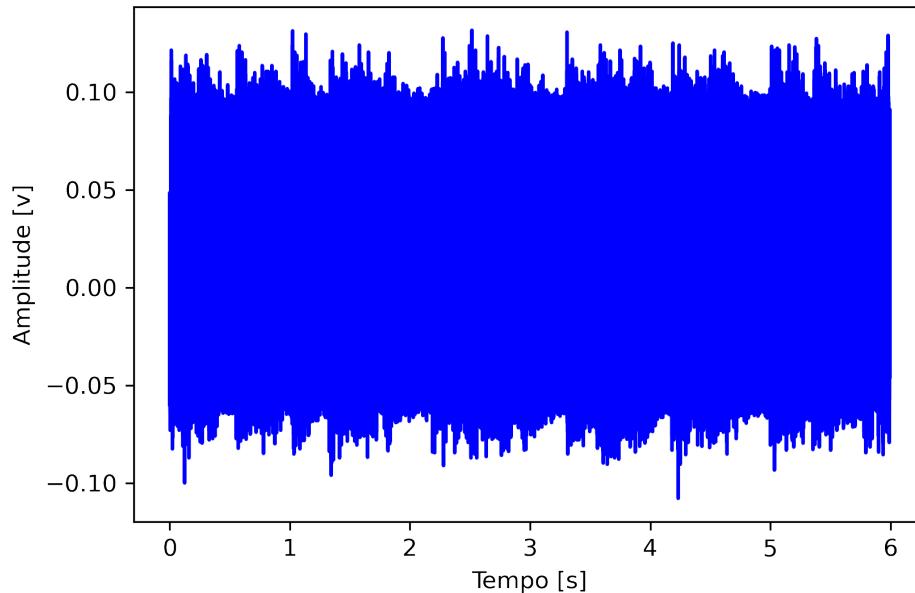


Fonte: O autor (2022).

Através da remoção do componente de corrente contínua do sinal, foi possível verificar quais frequências o compõe. Foi possível verificar que o espectro possui um elevado pico na região dos 60 Hz, sem alterações nas demais faixas de frequência. Considerando-se que apenas o filtro rejeita-faixa estava ligado à energia neste momento, conclui-se que o referido ruído foi induzido pela própria fonte de alimentação do mesmo. Ou seja, ainda que o circuito condicionador, em conjunto com o filtro, tenha sido capaz de atenuar as componentes de interferência elétrica, componentes de ruído elétrico ainda se mostraram presentes.

A partir deste cenário, para que se verificasse o quanto estes sinais seriam presentes nas componentes de frequência durante o processo de aquisição dos dados, foi proposto o experimento de aquisição dos dados com a bancada ligada a tomada, mas não energizada. A Figura 65 mostra o sinal temporal da bancada quando conectada à energia elétrica.

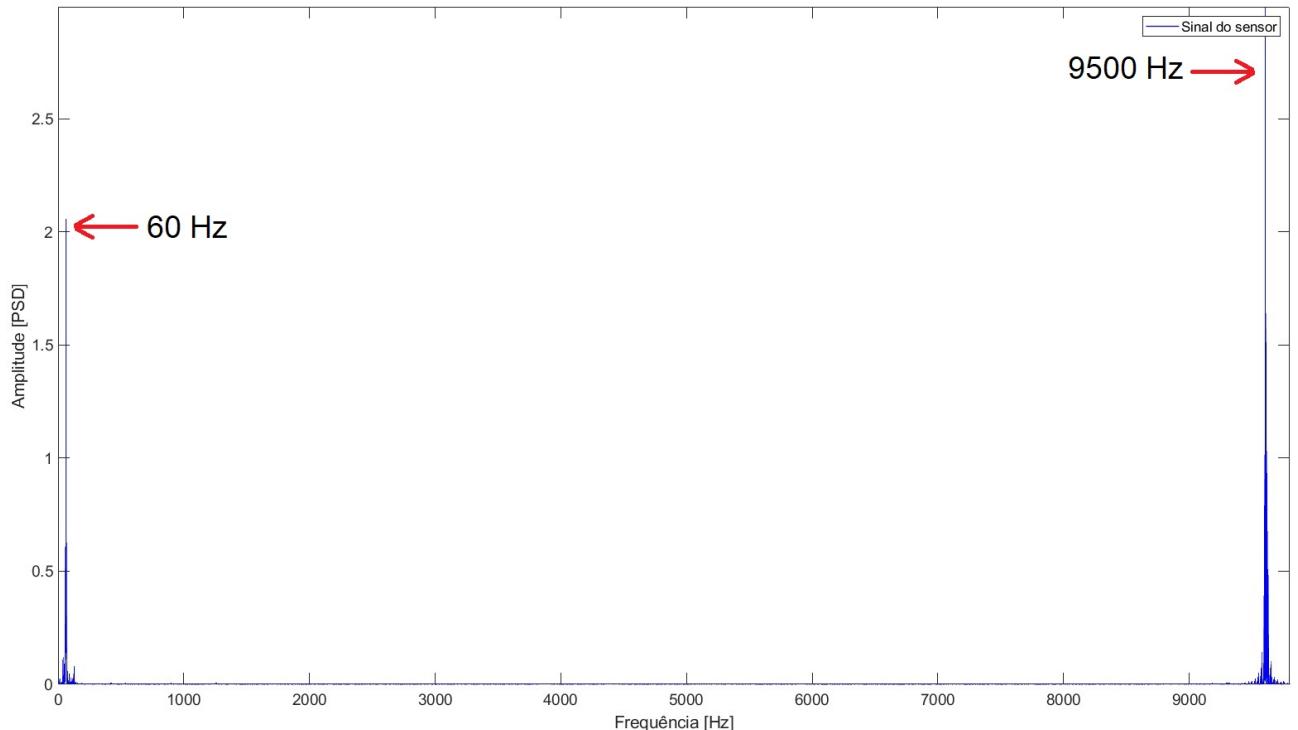
Figura 65 – Sinal temporal da bancada conectada à energia elétrica.



Fonte: O autor (2022).

A partir do sinal temporal deste 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 200 mV, aumento significativo em relação ao experimento anterior. A Figura 66 mostra as componentes deste sinal, composto tanto pelos 60 Hz anteriormente identificados quanto por uma nova componente de alta frequência, centrada na faixa dos 9500 Hz. A origem desta nova componente de alta frequência não pode ser identificada.

Figura 66 – Espectro de densidade de potência da bancada conectada à energia elétrica.

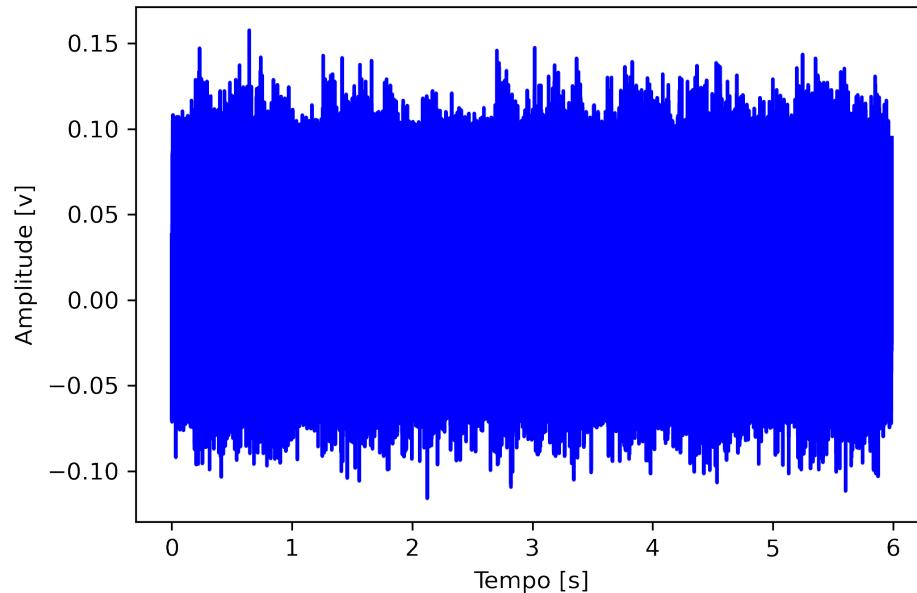


Fonte: O autor (2022).

Estas interferências, conclui-se, se devem à natureza de alta impedância do sensor PVDF.

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 67 mostra o sinal temporal deste caso.

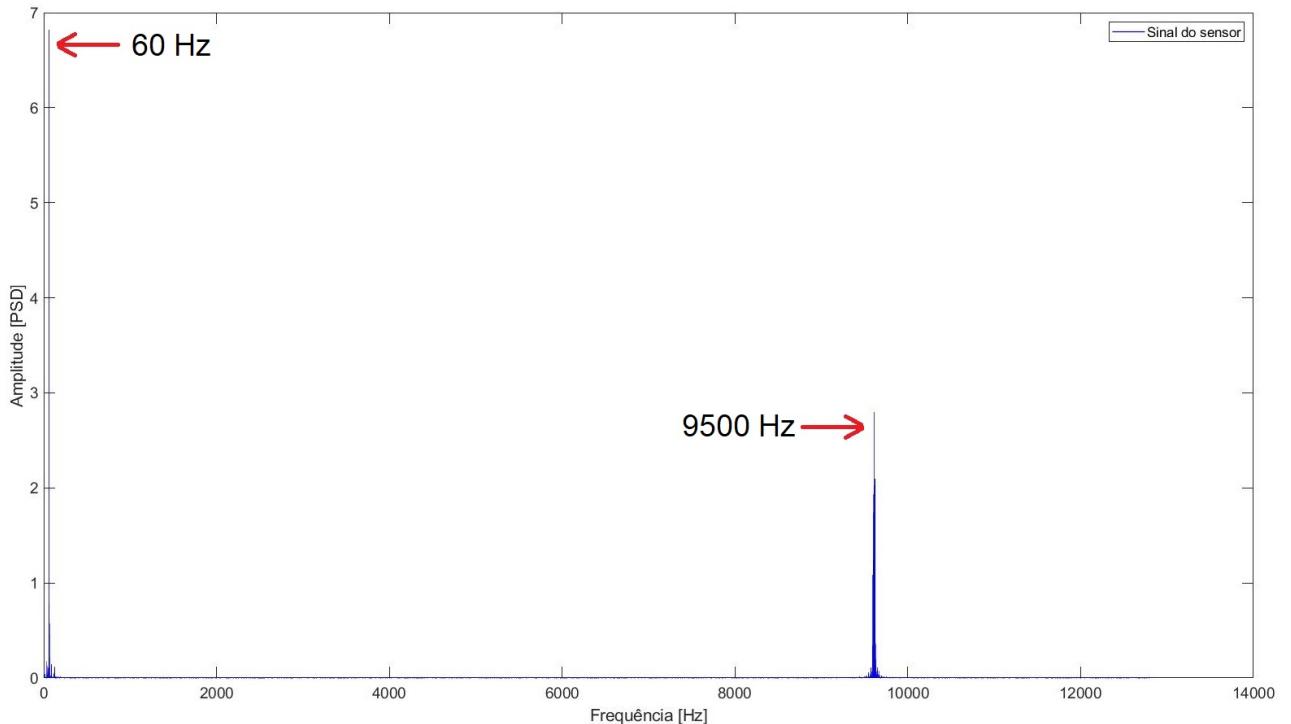
Figura 67 – Sinal temporal da bancada conectada à energia elétrica e energizada.



Fonte: O autor (2022).

É possível verificar, neste caso, o aumento da amplitude pico a pico dos sinais, superior a 250 mV. Já em relação ao sinal espectral deste caso, como é possível visualizar na Figura 68, o mesmo aponta picos na região dos 60 Hz e dos 9500 Hz. Nota-se, entretanto, que ao contrário do experimento anterior, onde as interferências de alta frequência dominavam o espectro em termos de amplitude, neste experimento a frequência da corrente alternada volta a ser dominante. Isto ocorre pela indução causada pelos elementos da bancada de testes, agora energizados, tal como o próprio motorredutor e o inversor de frequências.

Figura 68 – 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 8mv	Espectro com pico nos 60Hz
Bancada ligada na energia elétrica	Aproximadamente 200mv	Espectro demonstrando uma concentração de ruído nos 60Hz e pico por volta dos 9500Hz
Bancada ligada na energia elétrica e energizada	Aproxidamente 250mv	Espectro demonstrando uma concentração de ruído nos 9500Hz e pico nos 60Hz

Fonte: O autor (2022).

Nota-se que a amplitude dos sinais aumenta consideravelmente quando a bancada está conectada à rede elétrica. Isto demonstra, 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. Brisebois, 2006, aponta que sensores de alta impedância podem sofrer ruídos por uma série de fatores, tais

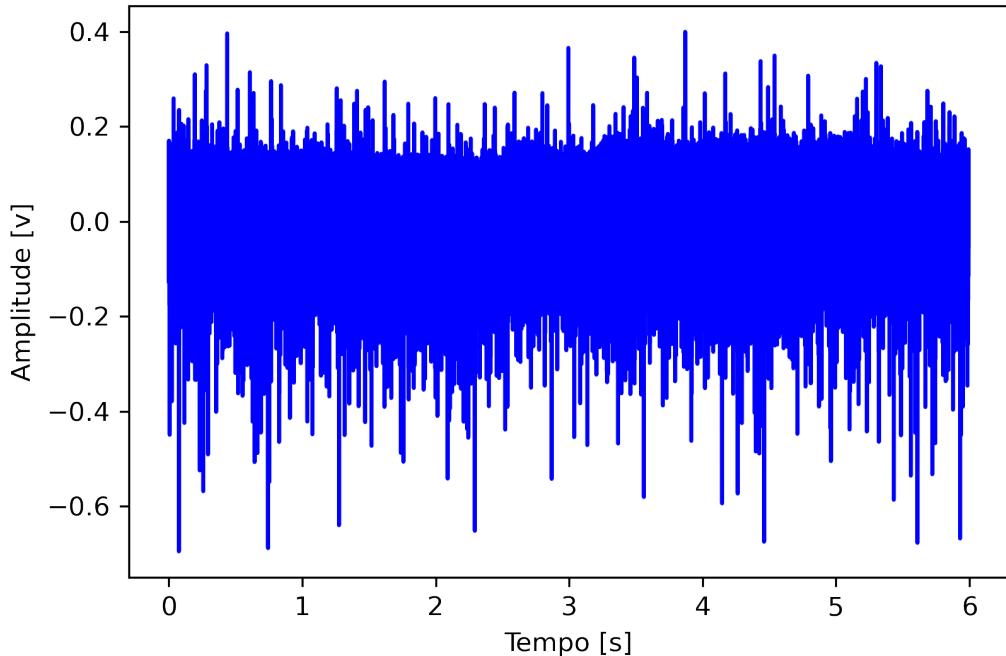
como ruído externo, resíduos de fluxo de solda, correntes de polarização, dentre outros. Uma vez caracterizados tais ruídos, entretanto, eles podem ser considerados ao se analisar os resultados para verificação da viabilidade do filme PVDF na aplicação proposta.

6.2 Caso 2 - caracterização do sinal do motorredutor

Após a caracterização das interferências elétricas que seriam inerentes ao sensor, o padrão de vibrações do motorredutor foi caracterizado, a fim de que fossem verificadas suas frequências. Isto foi necessário pois as frequências geradas pelo conjunto motorredutor não eram, à priori, conhecidas. Assim, para que se evitasse possíveis confusões ao se caracterizar 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 69 mostra o referido sinal no domínio do tempo.

Figura 69 – Sinal temporal do motorredutor.

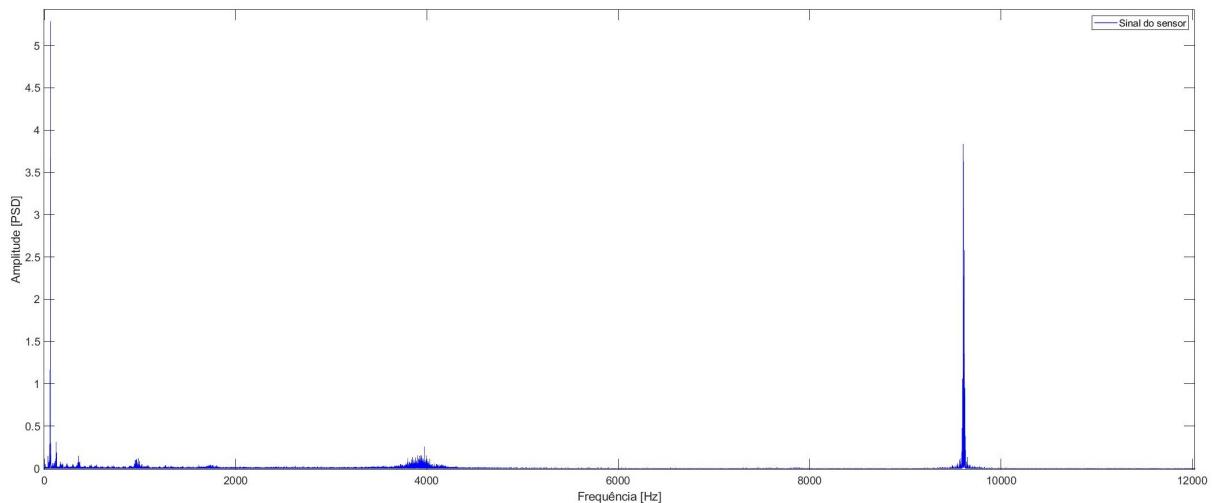


Fonte: O autor (2022).

Percebe-se um incremento significativo nos valores de tensão pico a pico, quando comparado ao caso anterior com a bancada meramente energizada, atingindo por volta de 1 V. Isto mostrou inicialmente uma evidência de que a relação sinal-ruído seria, portanto, positiva - ou seja, a tensão gerada pelo sinal mecânico seria superior à do ruído elétrico.

Contudo, analisando-se o caso no domínio das frequências é possível notar, ao se analisar o PSD deste experimento, que as frequências dominantes ainda se mantém centradas nos ruídos anteriormente detectados. A Figura 70 mostra os picos de energia contidos no sinal, destacados, ainda, nos 60 Hz e também nos 9500 Hz.

Figura 70 – Espectro de densidade de potência do motorreductor.

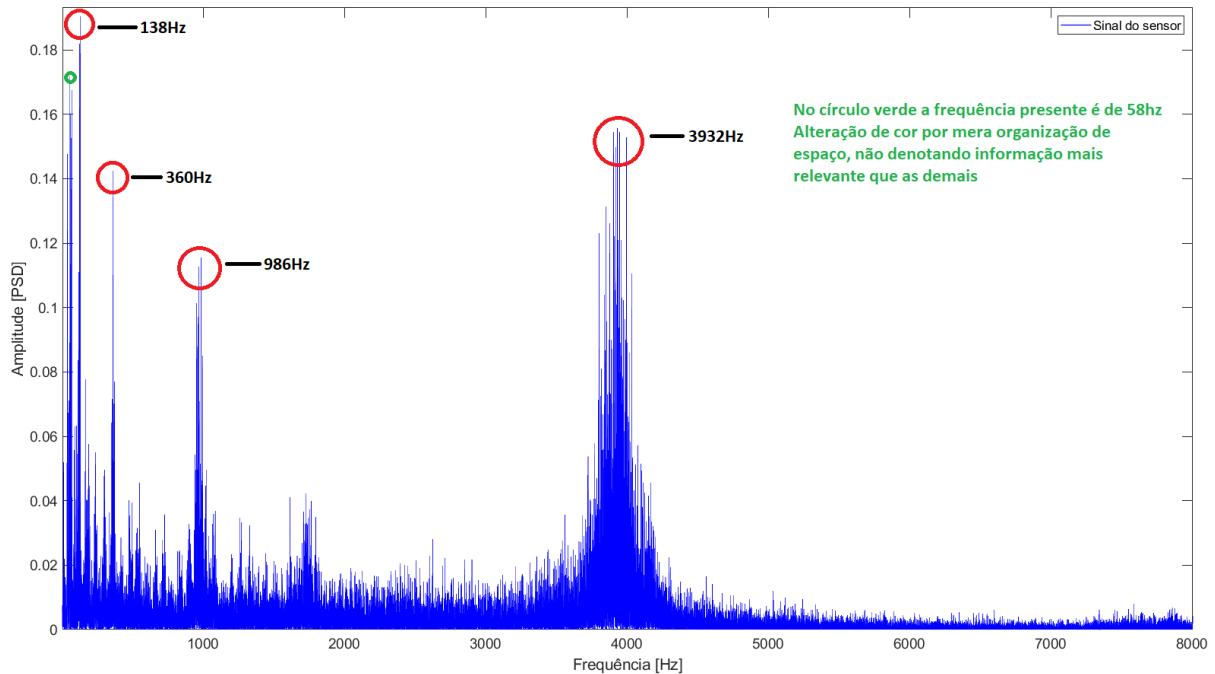


Fonte: O autor (2022).

Dado o ruído inerente ao sensor, adotou-se uma estratégia de filtragem manual através da análise da densidade espectral de potência, filtrando-se os ruídos com grande interferência no sinal.

Para que fosse possível visualizar onde as demais frequências estavam ocorrendo, foi realizado o processo de filtragem através do PSD. Foram excluídos, após inspeção visual, os picos acima de 0.2 W/Hz. Excluindo-se os picos significativos de ruídos, o resultado, então apresentou-se conforme visto na Figura ??.

Figura 71 – Espectro de densidade de potência do motorredutor com picos filtrados.



Fonte: O autor (2022).

A partir desta filtragem verifica-se uma predominância de frequências na região dos 3800 Hz aos 4000 Hz.

Contudo, além deste também é possível verificar picos isolados por volta dos 128 Hz, 360 Hz, além de uma concentração de menor amplitude de frequências em 986 Hz e outra, ainda menor, na região dos 1730 Hz.

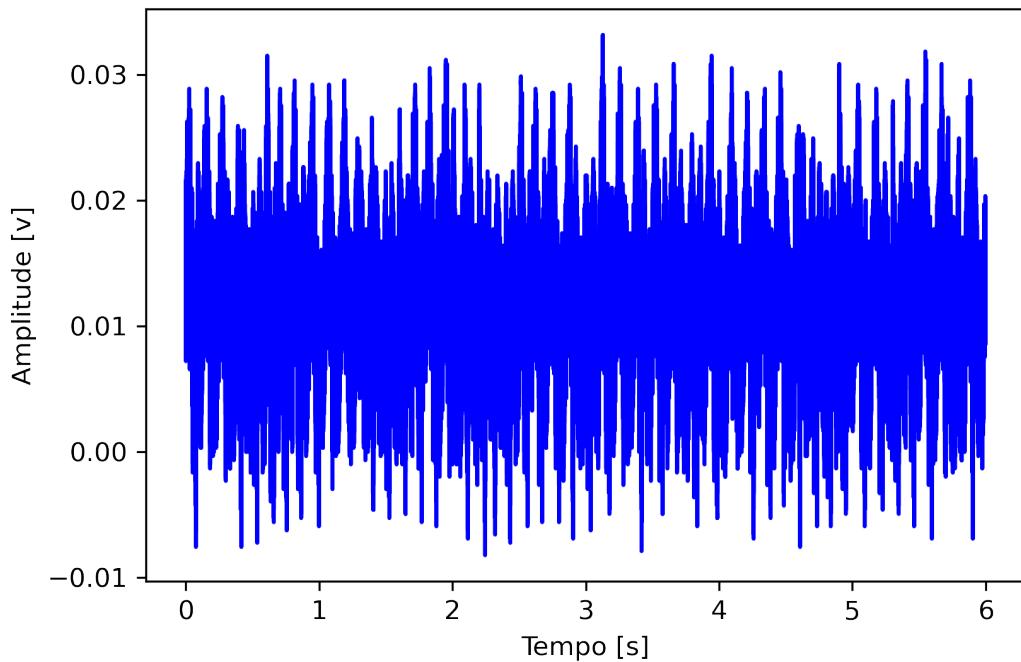
As características do sinal de vibração do motorredutor, portanto, são summarizadas na tabela ...

6.3 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 72 mostra o sinal temporal do rolamento em bom estado.

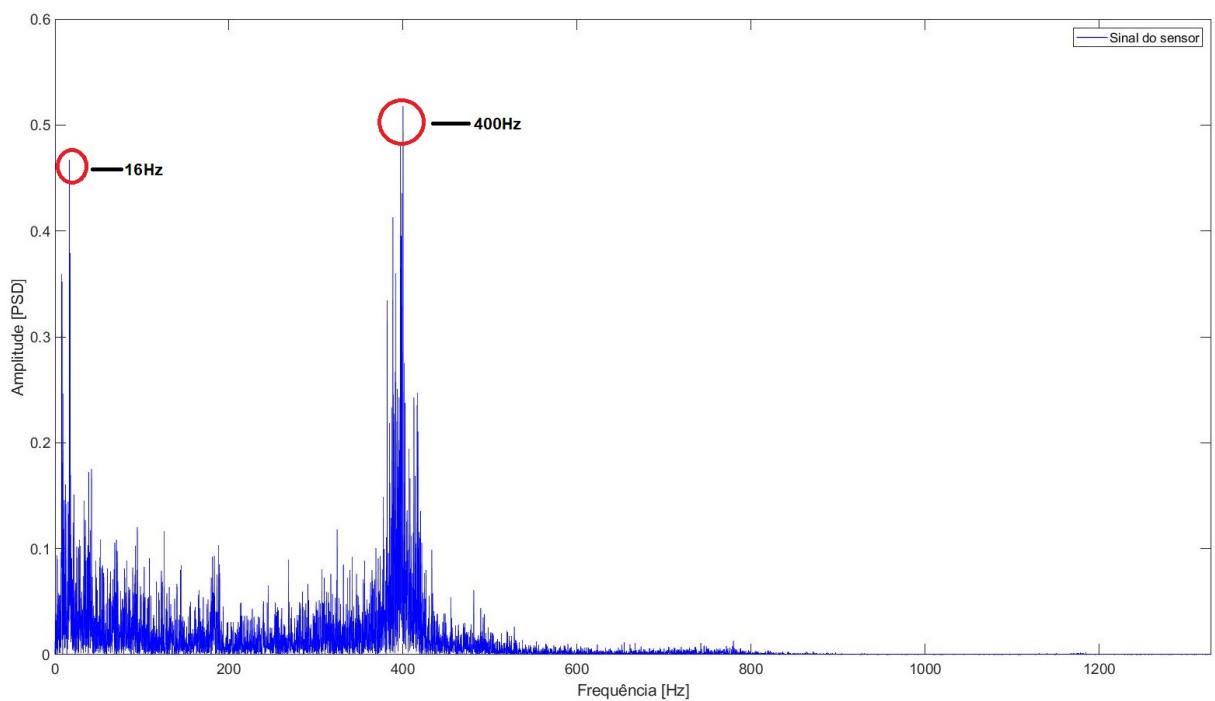
Figura 72 – Sinal temporal do rolamento em bom estado.



Fonte: O autor (2022).

A Figura 73 apresenta o PSD do rolamento em bom estado.

Figura 73 – Espectro de densidade de potência do rolamento em bom estado.



Fonte: O autor (2022).

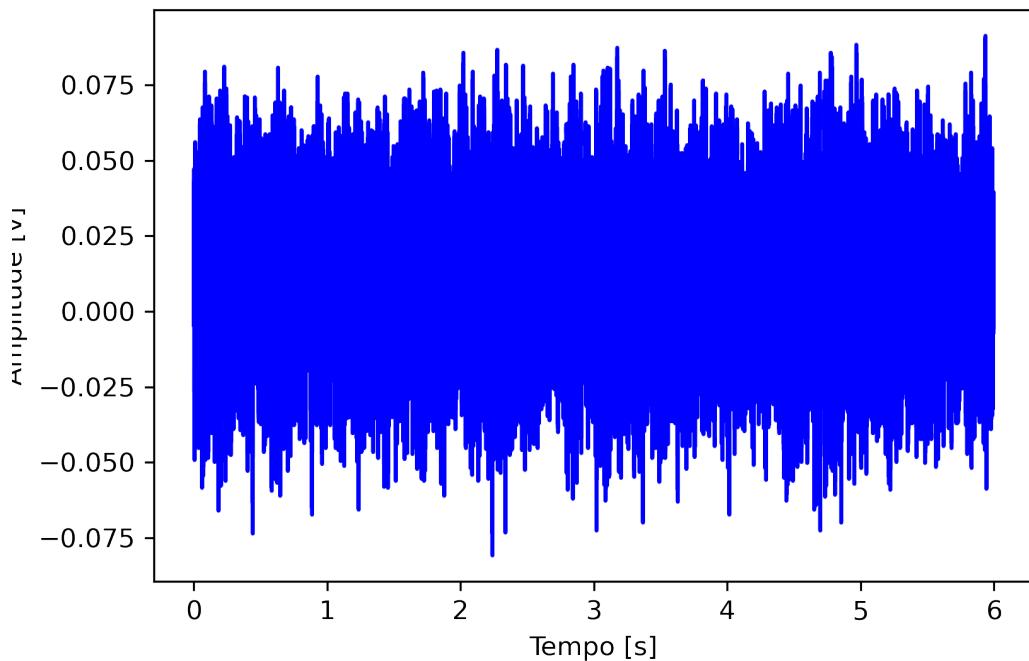
Nele podemos verificar uma concentração de freqüências por volta dos

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

A partir destas caracterizações, é dado prosseguimento nos experimentos a fim de identificação de danos no rolamento. Neste experimento foi introduzido dano no elemento rolante, conforme mostrado na seção 5. O dano imposto ao rolamento simulou a situação de esmagamento e foi tal que o ruído do rolamento tornou-se audível ao aproximar-se de onde este estava localizado.

A Figura 74 mostra o sinal temporal do rolamento com dano no elemento rolante.

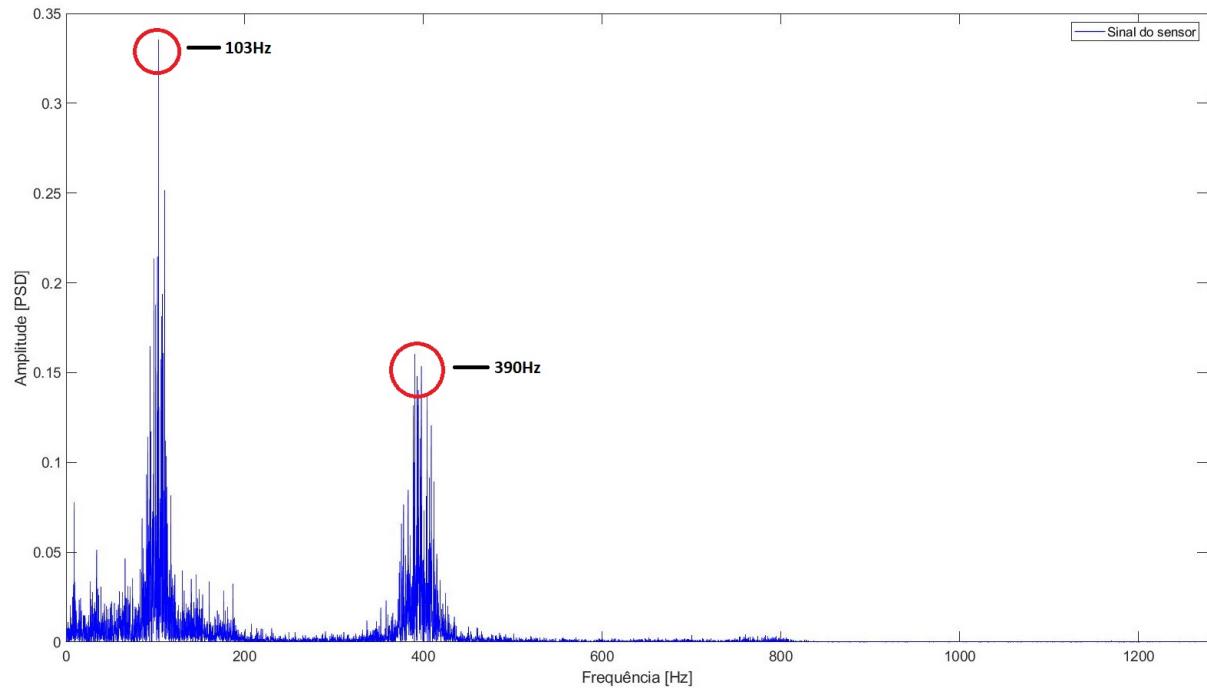
Figura 74 – Sinal temporal do rolamento com dano no elemento rolante.



Fonte: O autor (2022).

É possível verificar através do sinal temporal uma tensão pico a pico de aproximadamente 150 mV. Observando-se a densidade espectral de potência, é possível verificar a existência de uma concentração iniciando-se nos 80 Hz e indo até, aproximadamente, os 117 Hz, com pico nos 103 Hz. Também há uma concentração, de menor amplitude, entre os 380 Hz e os 408 Hz, conforme mostra a Figura 75.

Figura 75 – Espectro de densidade de potência do rolamento com dano no elemento rolante



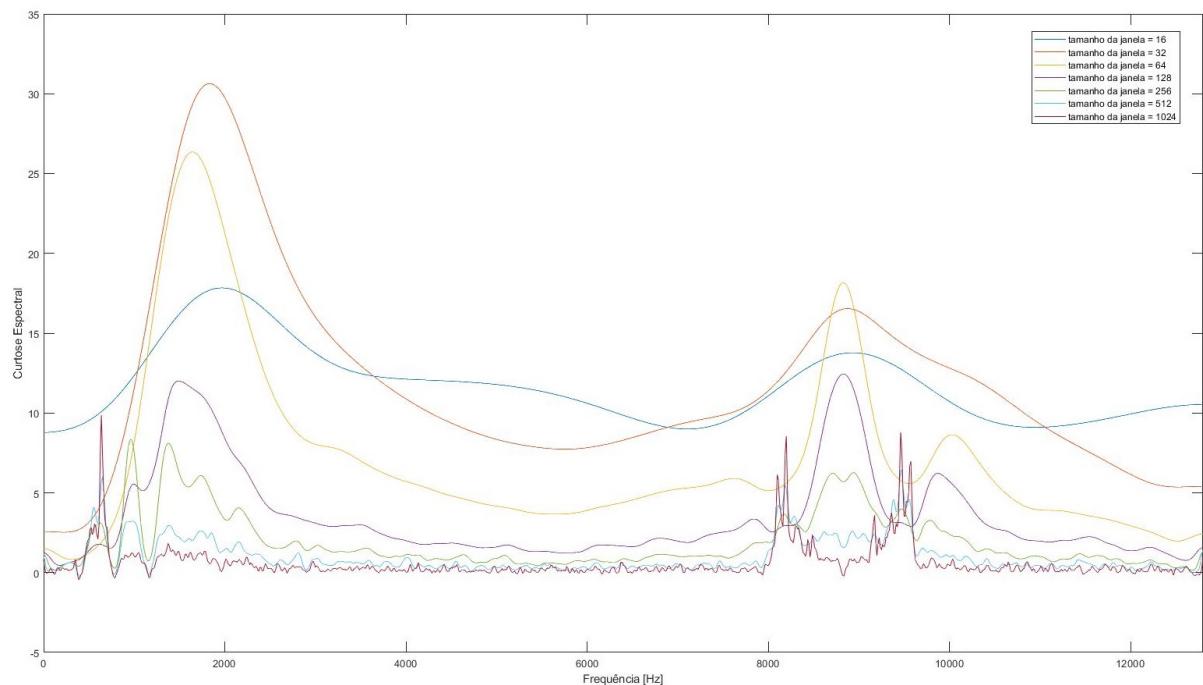
Fonte: O autor (2022)

Em relação às frequências de defeito esperadas, em particular no que se trata do elemento rolante, a região de maior amplitude verificada no espectro aproxima-se do valor esperado, ainda que acima do calculado para a frequência base. Esperava-se uma frequência para o dano BSF de aproximadamente 95 Hz e foi detectado um pico nos 103 Hz. O pico nos 390 Hz apresenta um indício de valor harmônico para o BSF, sendo $4 \times$ o valor base característico de defeito no elemento rolante. No experimento anterior também foi possível notar a existência de um pico próximo desta frequência, ainda que ocorrendo em uma faixa um pouco mais elevada do espectro. Neste sentido, estima-se que o valor possa ter sido transmitido pelo eixo. De qualquer forma, nota-se, após estes dois picos de frequências, concentrações de pequena amplitude no restante do espectro tal como verificado, por exemplo, entre 700 Hz e 800 Hz. Além disto, também é possível verificar que os ruídos externos mostraram menor amplitude neste experimento. A maior distância de posicionamento do elemento sensor em relação ao ponto de energização da bancada, portanto, mostrou-se influente quanto à diminuição dos ruídos elétricos externos.

Dadas estas questões, para caracterização do rolamento com dano introduzido no elemento rolante, também foi adotado o método de análise do envelope do sinal. Este se deu para 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 através do método da curtose espectral, conforme verificado na Figura 76.

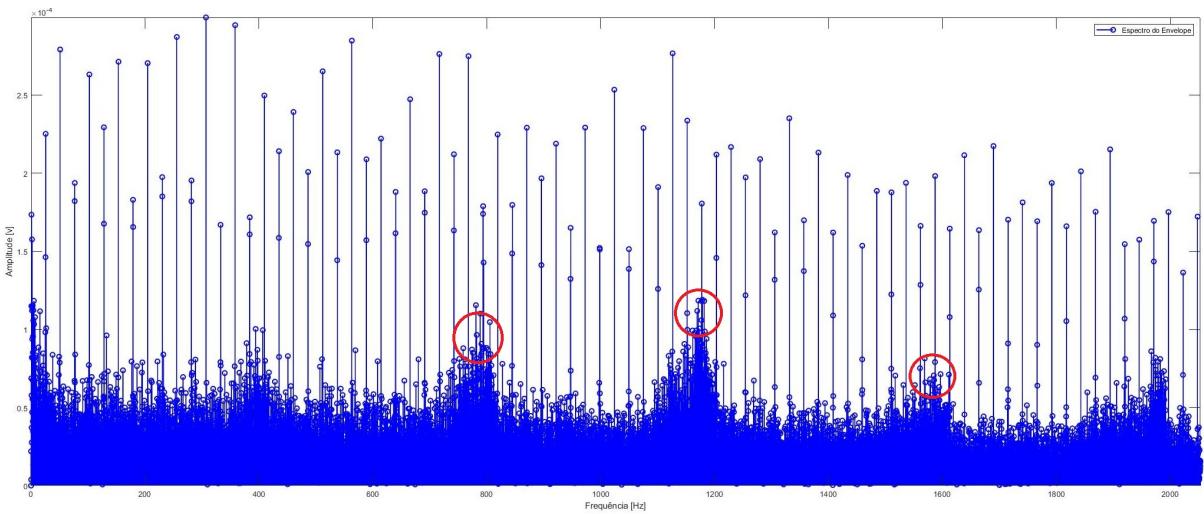
Figura 76 – Curtose espectral para diferentes janelas no rolamento com dano no elemento rolante.



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 77 pelos círculos vermelhos. A concentração nas frequências mais baixas mostra-se de difícil separação, dada a 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 77 – 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.

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

6.6 Caso 6 – caracterização do sinal e identificação das frequências característica de defeitos nos rolamentos, com utilização de sensor acelerômetro

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 através 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.

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.

CNI, Confederação Nacional das Indústrias. **Perfil da Indústria Brasileira.** Brasil, 2019. Disponível em: 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, José 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.

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.

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

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.

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.

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.

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.

Apêndice A – Programa para aquisição de dados na plataforma LabView

Apêndice B – Programa para aquisição de dados com microcontrolador STM32

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

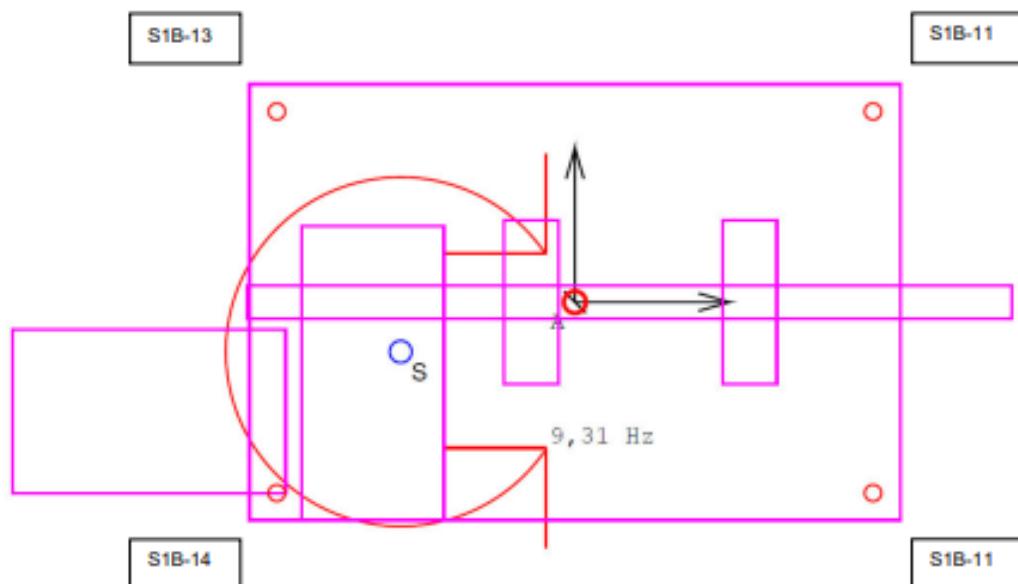
Alessandro M. Furuguem
 Depto. Técnico Comercial
 Tel.: +55 11 5185-0027
 Direto. : +55 11 5185-0023
 Cel.: +55 11 99608-6387
alessandro.furuquem@gerb.com.br

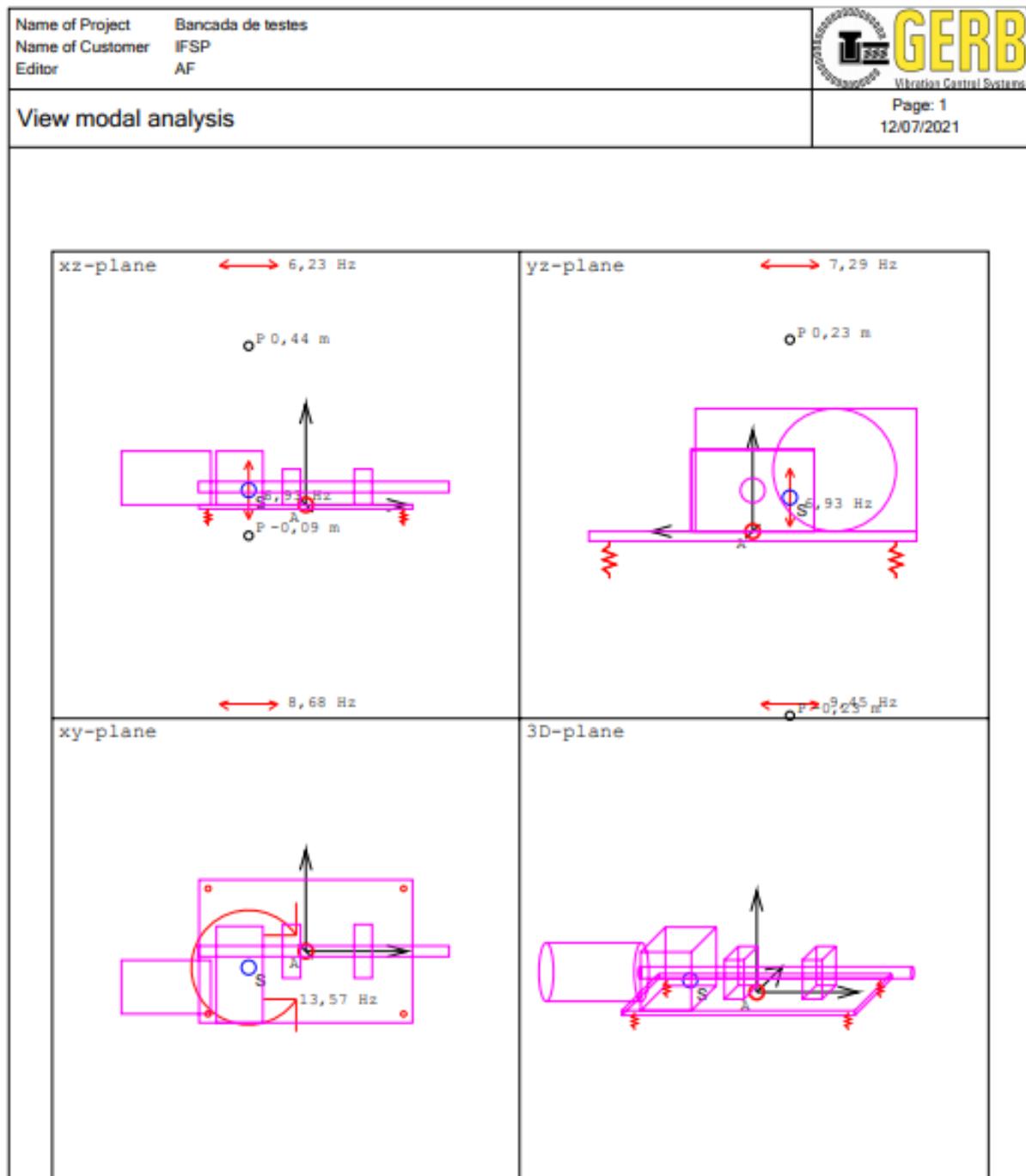


Escrítorio: Rua da Paz, 1741
 Fábrica: Rua Belisário Campanha, 183
 CNPJ: 38.813.200/0001-36 (escritório)

– 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

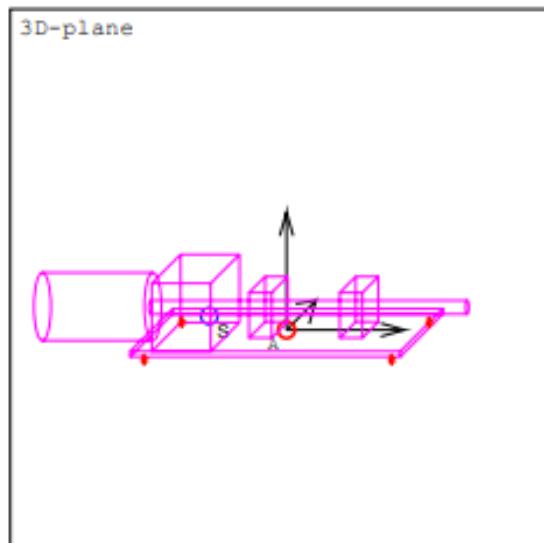
GERB Schwingungsdämmungen GmbH & Co.KG Roedemallee 174-176 13407 Berlin, Deutschland Postfach 51 02 30, 13362 Berlin Tel.+49-30-4191-0, Fax -199 info@gerb.de	USt-IdNr. DE 118873256 Kommanditgesellschaft: HR Berlin-Charlottenburg Nr. A 33006 B Postfach 10 14 52, 45014 Essen Tel.+49-201-26604-0, Fax -40 info@gerb.de	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
--	--	---