

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**

Texto de qualificação apresentado 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

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 interno, 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	18
Figura 2 – a) Processo de fabricação dos anéis internos e externos. Retirado de SANTOS et al., 2017.	20
Figura 3 – Anéis internos de rolamentos apresentando escamamento. Retirado de NSK, 2014.	23
Figura 4 – Pista de rolamento com descascamento. Retirado de NSK, 2014.	24
Figura 5 – Rolamentos com amassados e arranhaduras. Retirado de NSK, 2014.	24
Figura 6 – Aneís interno e externo com danos por escorregamento. Retirado de NSK, 2014.	25
Figura 7 – Anéis internos e anel externo com fraturas. Retirado de NSK, 2014.	25
Figura 8 – Rolamento com lasca e trincas. Retirado de NSK, 2014.	26
Figura 9 – Gaiolas danificadas. Retirado de NSK, 2014.	26
Figura 10 – Anel interno e rolos com impressões. Retirado de NSK, 2014.	27
Figura 11 – Anel interno e esfera com <i>pitting</i> . Retirado de NSK, 2014.	27
Figura 12 – Anel interno e externo com desgaste. Retirado de NSK, 2014.	28
Figura 13 – Rolamentos com corrosão por contato. Retirado de NSK, 2014.	28
Figura 14 – Pistas com esmagamento. Retirado de NSK, 2014.	29
Figura 15 – Deformação de deslizamento. NSK, 2014.	29
Figura 16 – Dano causado superaquecimento. Retirado de NSK, 2014.	30
Figura 17 – Corrosão eletrolítica em rolamentos. Retirado de NSK, 2014.	30
Figura 18 – Rolamentos com oxidações e corrosões. Retirado de NSK, 2014.	31
Figura 19 – Rolamentos com falhas de instalação. Retirado de NSK, 2014.	31
Figura 20 – Manchas e descoloração em rolamentos. Retirado de NSK, 2014.	32
Figura 21 – Representação dos níveis de um sinal harmônico. Retirado de Meola, 2005.	37
Figura 22 – Relação entre os valores de Pico e RMS com o desgaste progressivo de rolamentos. Retirado de Meola, 2005.	38
Figura 23 – Fator de Crista no tempo. Retirado de Meola, 2005.	38
Figura 24 – Estrutura molecular do PVDF. Retirado de Xin, 2016.	41

Figura 25 – Rolamento autocompensador de rolos. Retirado de NSK, 2018.	52
Figura 26 – Ângulo de contato calculado a partir do modelo CAD disponibilizado pela NSK. Elaborado pelo autor.	53
Figura 27 – Diâmetro do elemento rolante calculado a partir do modelo CAD disponibilizado pela NSK. Elaborado pelo autor.	54
Figura 28 – Projeto da bancada experimental. Elaborado pelo autor.	55
Figura 29 – Projeto da bancada experimental visto lateralmente. Elaborado pelo autor.	55
Figura 30 – Bancada experimental. Elaborado pelo autor.	56
Figura 31 – Sensor de vibração piezoelétrico. Retirado de Measurement Specialties, 2021.	58
Figura 32 – Sensor de vibração piezoelétrico no encapsulamento de alumínio. Elaborado pelo autor.	58
Figura 33 – Circuito preliminar de condicionamento do sensor piezoelétrico. Elaborado pelo autor.	59
Figura 34 – Microcontrolador STM32F103. Retirado de ST, 2021.	59
Figura 35 – Sinal de 5 kHz capturado pelo sistema construído com o microcontrolador STM32. Elaborado pelo autor.	60
Figura 36 – Sistema de aquisição desenvolvido com LabView. Elaborado pelo autor.	61
Figura 37 – Fluxo de aquisição e processamento. Elaborado pelo autor.	62
Figura 38 – Circuito preliminar de condicionamento do sensor piezoelétrico. Elaborado pelo autor.	64

Lista de tabelas

Tabela 1 – Cronograma proposto para o trabalho. Elaborado pelo autor. 65

Lista de abreviaturas e siglas

BPFI	Ball Pass Frequency Inner Race
BPFO	Ball Pass Frequency Outer Race
BSF	Ball Spin Frequency
DAQ	Data Acquisition
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	11
2	Objetivos	14
2.1	<i>Geral</i>	14
2.2	<i>Específicos</i>	14
3	Revisão Bibliográfica	15
3.1	<i>Manutenção</i>	15
3.1.1	<i>Manutenção preditiva</i>	16
3.2	<i>Fundamentos e aplicações de rolamentos</i>	18
3.2.1	<i>Tipos de rolamentos</i>	19
3.2.2	<i>Processos de fabricação de rolamentos</i>	19
3.2.3	<i>Carga e vida útil de rolamentos</i>	21
3.2.4	<i>Falhas em rolamentos</i>	23
3.3	<i>Análise de vibrações</i>	33
3.3.1	<i>Frequências características de defeitos e detecção de falhas em rolamentos</i>	35
3.3.2	<i>Técnicas de detecção de falhas em rolamentos</i>	36
3.4	<i>Fluroreto de polivinilideno</i>	41
3.5	<i>Sistemas de aquisição de dados</i>	45
3.5.1	<i>Condicionamento de Sinal</i>	45
3.5.2	<i>DAQ - Data Acquisition</i>	46
4	Estado da arte	48
4.1	<i>Aplicações do Fluroreto de Polivinilideno como sensor de vibração</i>	48
4.1.1	<i>Detecção de Falhas em Mancais de Rolamentos</i>	50
5	Materiais e métodos	51
5.1	<i>Rolamentos autocompensadores de rolos</i>	51
5.2	<i>Bancada experimental</i>	54
5.3	<i>Aquisição e análise do sinal do filme PVDF</i>	57

6	Resultados	63
7	Próximos passos	64
	Referências ¹	66
	Apêndice A – Programa para aquisição de dados na plataforma LabView	69
	Apêndice B – Programa para aquisição de dados com micro- controlador STM32	70
	Apêndice C – Programas para análise dos sinais dos rolamentos	71

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

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.

Espera-se que, a partir dos experimentos e análise dos dados, se possa obter 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 da pista do anel interno, 2 - desgaste na pista do anel externo e 3 - desgaste no elemento rolante.
- Determinar um nível de alarme, indicativo de uma situação pré falha.
- Encontrar o melhor posicionamento do sensor para captar os sinais de falha.
- Comparar o custo do sistema proposto com os atualmente disponíveis no mercado.

3 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.

3.1 *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).

3.1.1 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.

3.2 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.

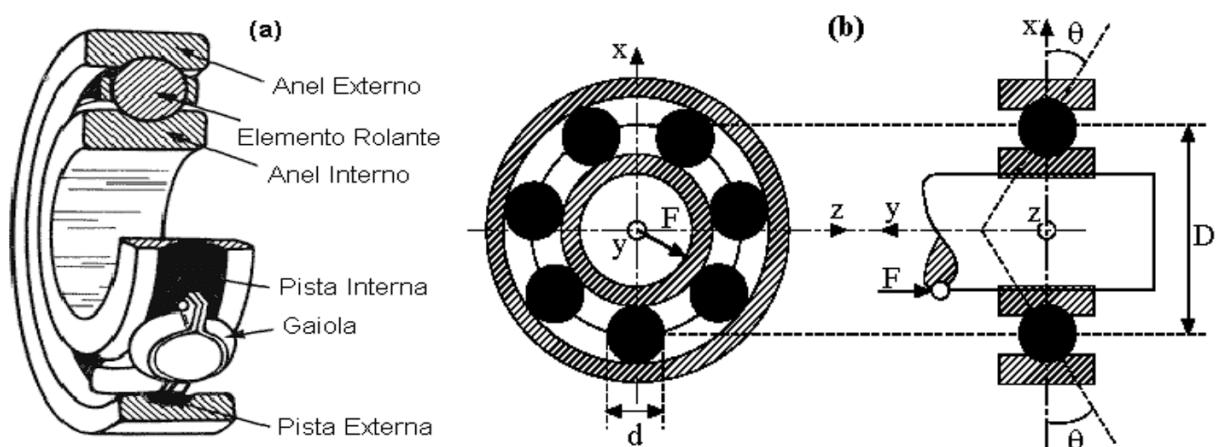


Figura 1 – a) Componentes de um rolamento. (b) Dimensões do rolamento. Retirado de Mesquita et al. 2002

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.

3.2.1 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.

3.2.2 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.

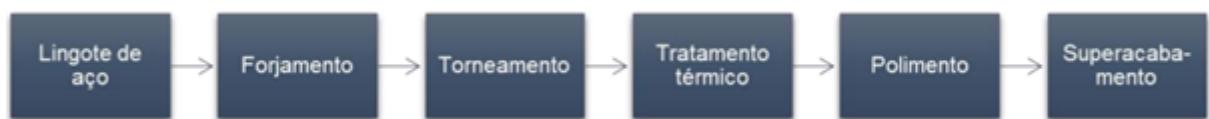


Figura 2 – a) Processo de fabricação dos anéis internos e externos. Retirado de SANTOS et al., 2017.

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).

3.2.3 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).

3.2.4 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.

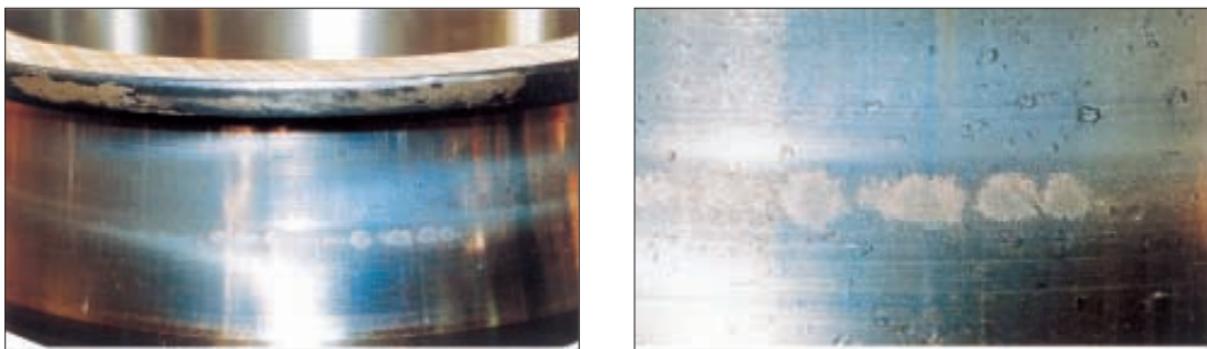


Figura 4 – Pista de rolamento com descascamento. Retirado de NSK, 2014.

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 repentinas, lubrificante inadequado e entrada de água. A Figura 6 mostra um anel interno e um anel externo que sofreram escorregamento.

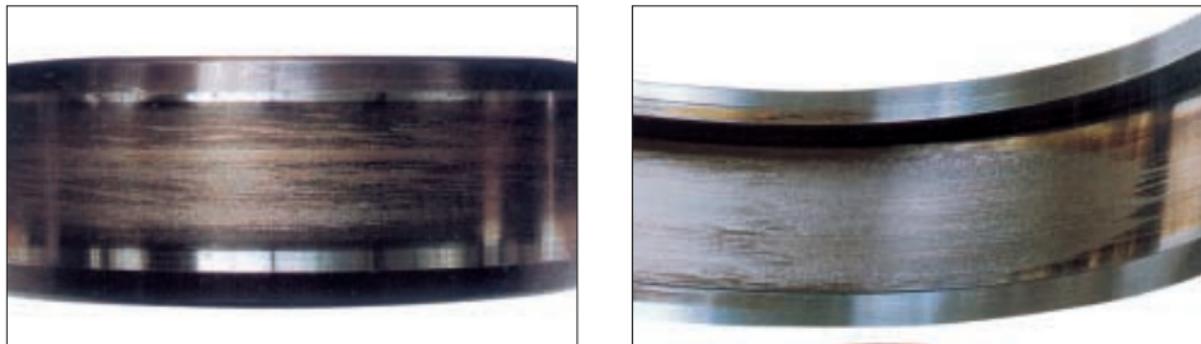


Figura 6 – Anéis interno e externo com danos por escorregamento. Retirado de NSK, 2014.

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 interno 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.

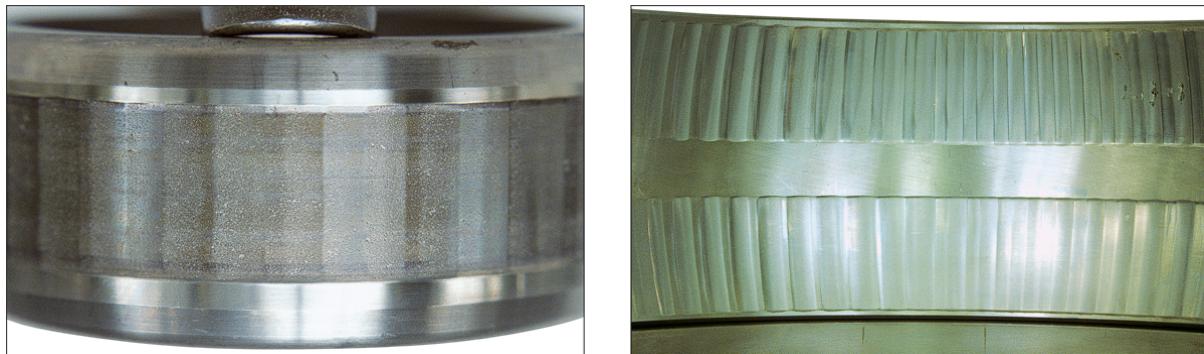


Figura 12 – Anel interno e externo com desgaste. Retirado de NSK, 2014.

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.

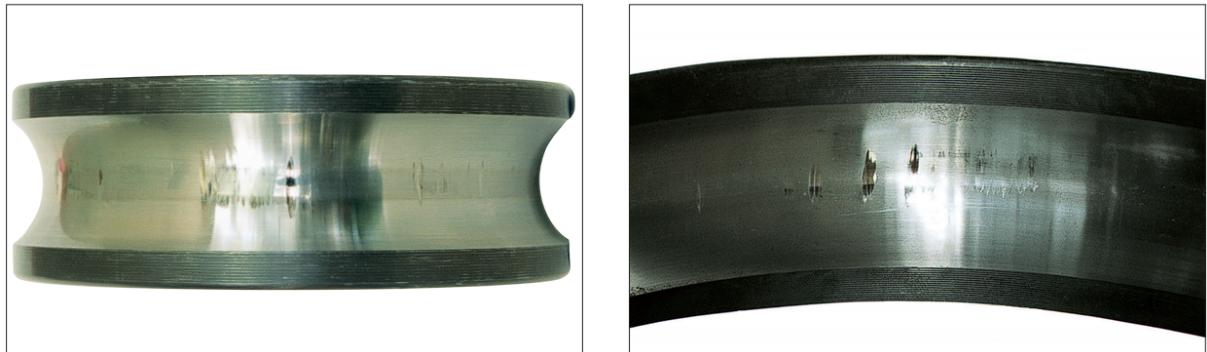


Figura 14 – Pistas com esmagamento. Retirado de NSK, 2014.

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.

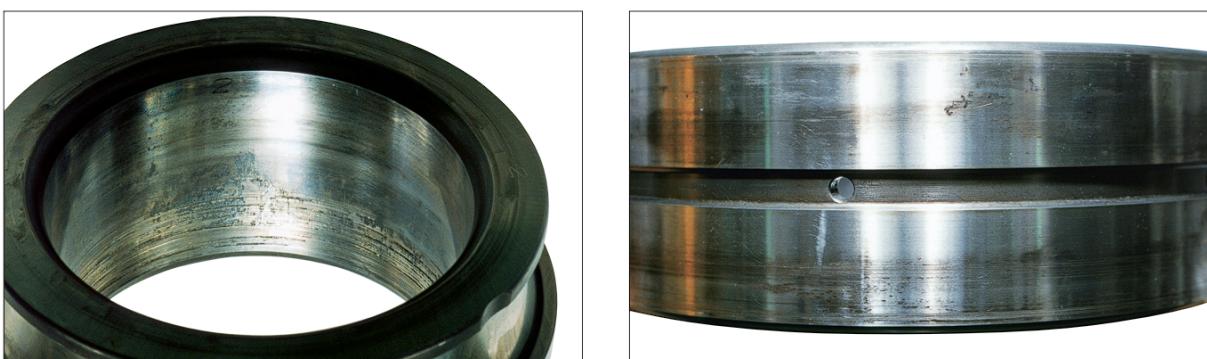


Figura 15 – Deformação de deslizamento. NSK, 2014.

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, 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.

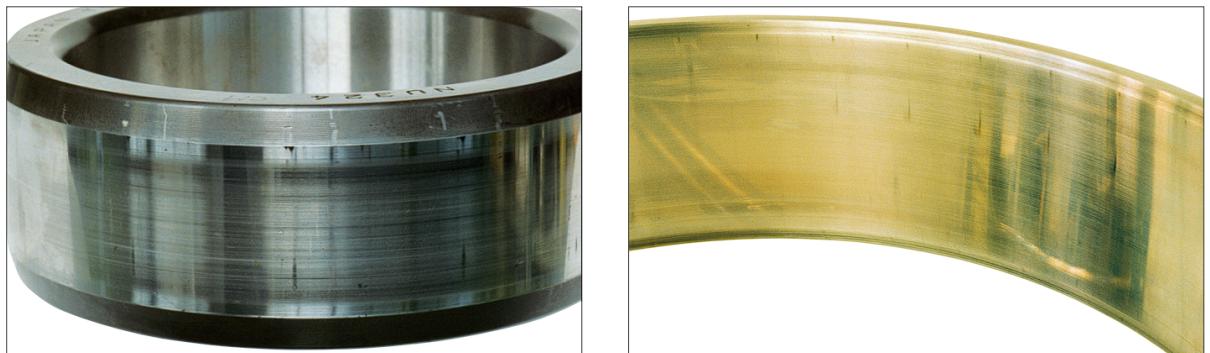


Figura 19 – Rolamentos com falhas de instalação. Retirado de NSK, 2014.

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.

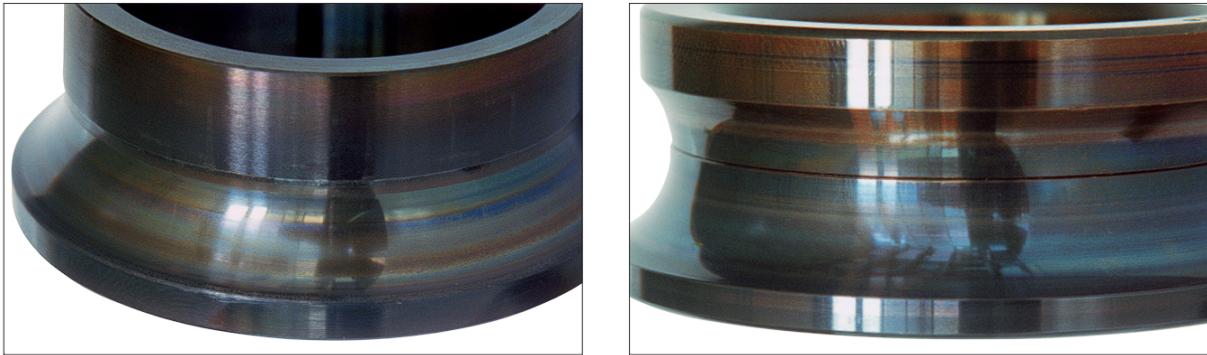


Figura 20 – Manchas e descoloração em rolamentos. Retirado de NSK, 2014.

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.

Assim, 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.

3.3 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.

3.3.1 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.

3.3.2 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 21 exemplifica a relação estes níveis.

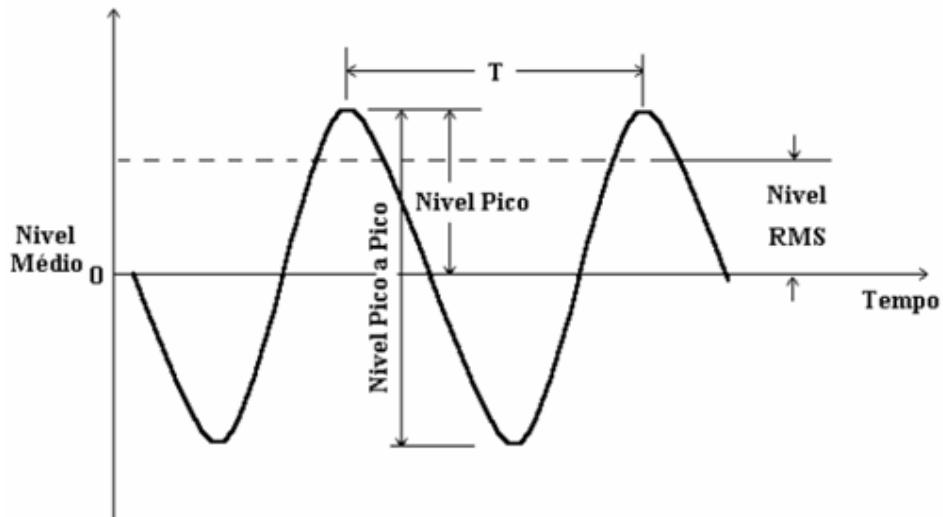


Figura 21 – Representação dos níveis de um sinal harmônico. Retirado de Meola, 2005.

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 22 demonstra esta relação entre os valores de Pico e RMS.

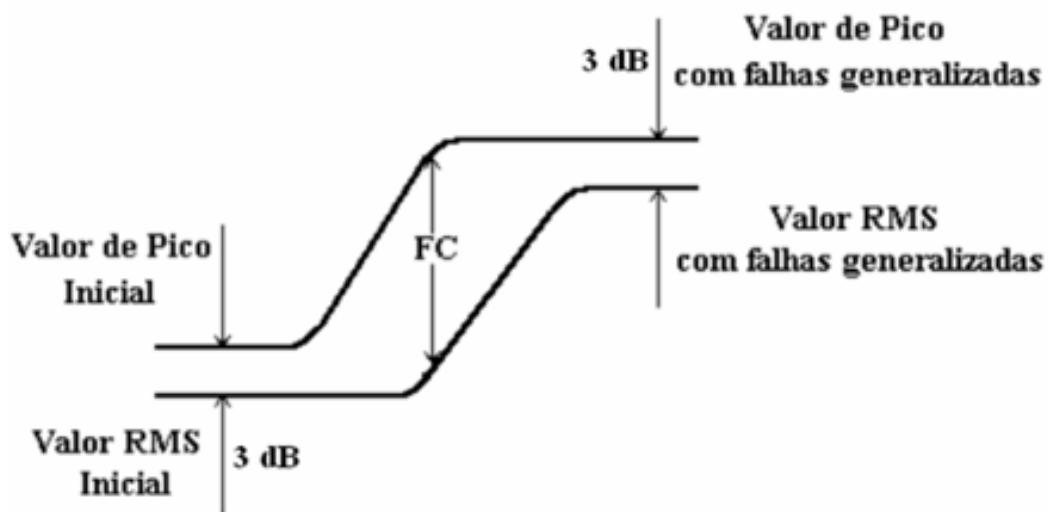


Figura 22 – Relação entre os valores de Pico e RMS com o desgaste progressivo de rolamentos. Retirado de Meola, 2005.

Já a Figura 23 demonstra o comportamento do Fator de Crista no tempo com o desgaste do rolamento.

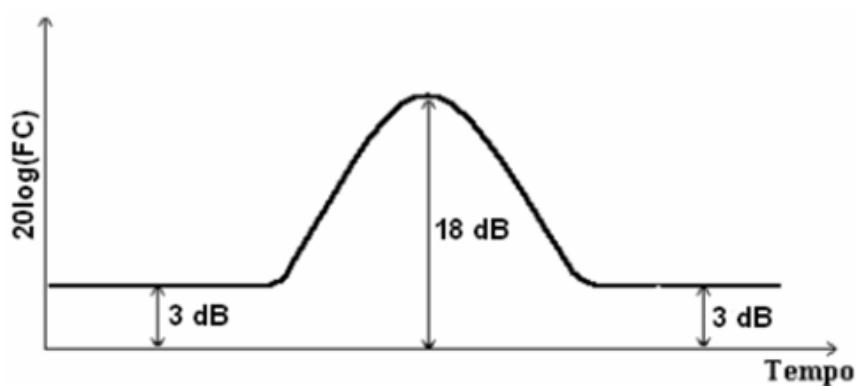


Figura 23 – Fator de Crista no tempo. Retirado de Meola, 2005.

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

deteção 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 onde 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 o dano em sua fase inicial.

Para tanto, são empregados métodos de filtragem de sinais, que serão abordados em maior profundidade na seção 3.5.1 deste trabalho, bem como de análise no domínio conjunto tempo-frequência, tal como a STFT, *Short Time Fourier Transform*.

Neste sentido, estas técnicas serão abordadas dentro do método mais largamente empregado para análise de danos em rolamentos: a análise de envelope (KIM et. al, 2020).

Segundo Randall, 2011 *apud* Almeida, 2013, a análise de envelope da vibração tem como objetivo que seja feita 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. Assim, a análise de envelope segue os passos a seguir:

-

3.4 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 um pesquisador japonês, 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 24 mostra a estrutura molecular do PVDF.

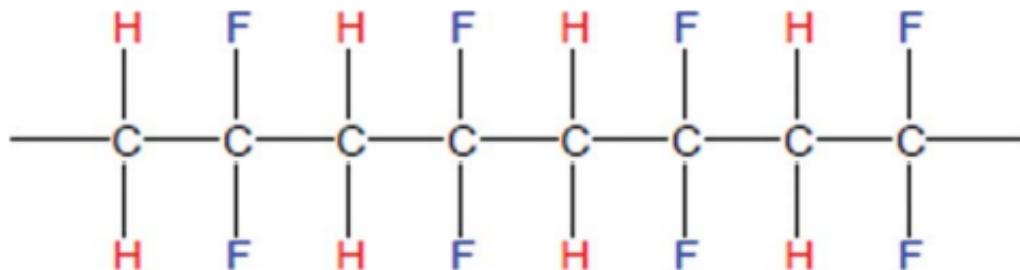


Figura 24 – Estrutura molecular do PVDF. Retirado de Xin, 2016.

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 mecânica 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, $p = C/m^2K$.

3.5 *Sistemas de aquisição de dados*

Para que possa analisar os dados provenientes de sensores é necessário um sistema de aquisição de dados. França, 1997, p. 4 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.

3.5.1 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-banda, rejeita-banda e passa-tudo.

3.5.2 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.

4 Estado da arte

Nesta seção, apresenta-se o estado da arte quanto a utilização de sensores PVDF em aplicações de monitoramento de vibração. Apresenta-se, também, as técnicas atuais na detecção em falhas de rolamentos.

4.1 *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.

4.1.1 Detecção de Falhas em Mancais de Rolamentos

5 Materiais e métodos

Tendo-se em vista relação aos materiais utilizados para condução dos experimentos, bem como os métodos empregados para tanto.

5.1 *Rolamentos autocompensadores de rolos*

Para a realização dos experimentos serão 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 permissível entre 1° e 2.5° . Esta categoria de rolamento foi escolhida pois possibilita uma maior facilidade para inserção manual de defeitos, o que será feito após a caracterização de seu sinal. Isto possibilitará, assim, a comparação entre os sinais do rolamento defeituoso em relação ao rolamento em perfeito estado.

As dimensões do rolamento escolhido são:

- Número de elementos rolantes: 20 (10 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 25 mostra um modelo de rolamento autocompensador de rolos, tal como utilizado na bancada experimental.



Figura 25 – 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 site da NSK Japão em um modelo CAD do mesmo, onde a partir deste calcularam-se os seguintes valores:

- Diâmetro dos elementos rolantes: 10.1mm
- Ângulo dos elementos rolantes: 14°

A Figura 26 mostra o CAD do rolamento NSK 21306CD com vista frontal, estando com as marcações para mensuração do ângulo de contato.

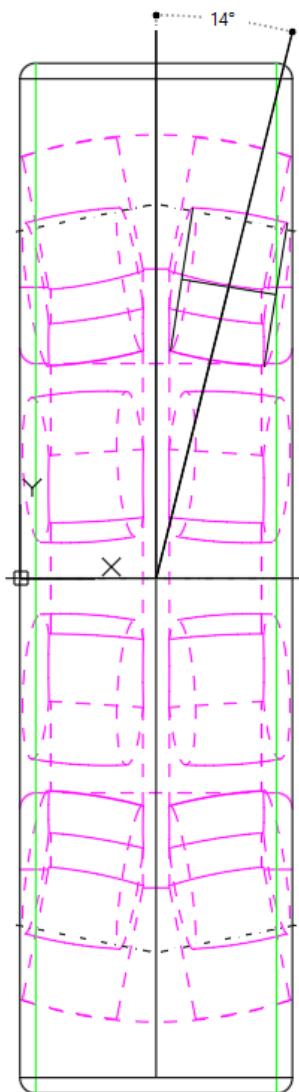


Figura 26 – Ângulo de contato calculado a partir do modelo CAD disponibilizado pela NSK. Elaborado pelo autor.

Já a Figura 27 apresenta o diâmetro do elemento rolante, calculado a partir do raio de um dos elementos rolantes visto a partir da face direita do rolamento.

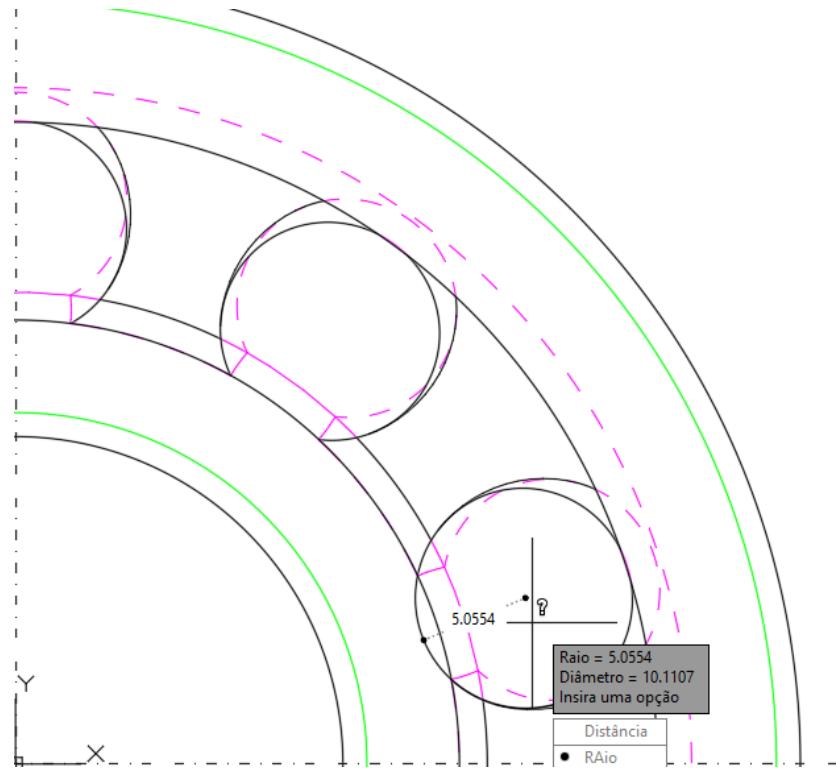


Figura 27 – Diâmetro do elemento rolante calculado a partir do modelo CAD disponibilizado pela NSK. Elaborado pelo autor.

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 terão terão 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 28 mostra o projeto da bancada experimental.

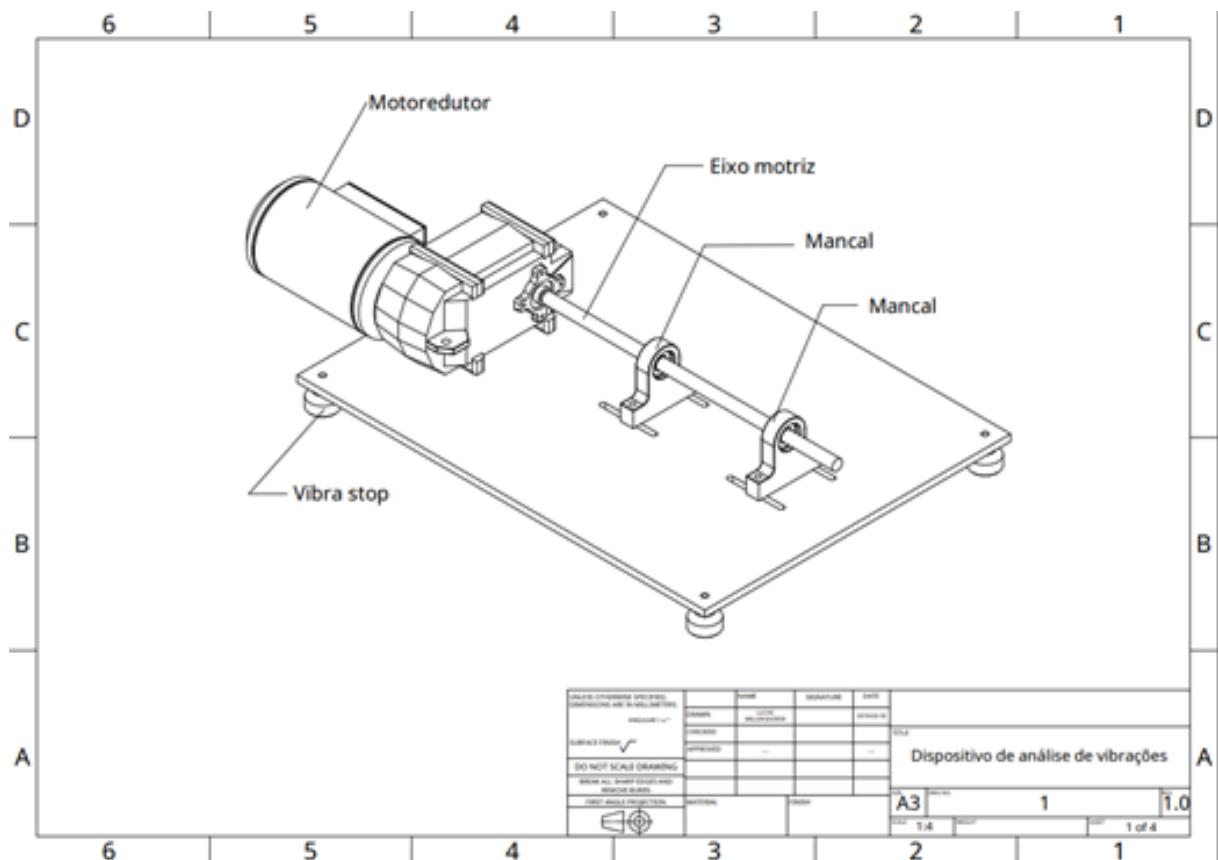


Figura 28 – Projeto da bancada experimental. Elaborado pelo autor.

A Figura 29 mostra uma visão lateral do dispositivo que será utilizado. Os sensores com seus respectivos acoplamentos serão afixados nos mancais.

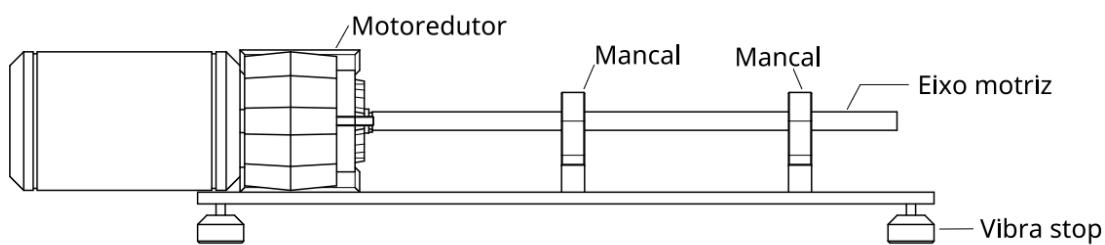


Figura 29 – Projeto da bancada experimental visto lateralmente. Elaborado pelo autor.

Em relação a construção da bancada experimental, a mesma se deu durante o ano de 2019. 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.

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.



Figura 30 – Bancada experimental. Elaborado pelo autor.

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:

$$FTF = \frac{35}{2} \left(1 - \frac{10.1}{51} \cos 14^\circ \right) = 14 \text{ Hz} \quad (21)$$

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

$$BPFI = \frac{10}{2} 35 \left(1 + \frac{10.1}{51} \cos 14^\circ \right) = 208 \text{ Hz} \quad (22)$$

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

$$BPFO = \frac{10}{2} 35 \left(1 - \frac{10.1}{51} \cos 14^\circ \right) = 141 \text{ Hz} \quad (23)$$

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

$$BSF = \frac{51}{2 * 10.1} 35 \left[1 - \left(\frac{10.1}{51} \cos 14^\circ \right)^2 \right] = 85 \text{ Hz} \quad (24)$$

5.3 Aquisição e análise do sinal do filme PVDF

A partir destas frequências pode-se estimar as áreas para análise do sinal aquisitado, bem como realizar o tratamento e filtragem do sinal resultante do sensor a fim de eliminação de interferências eletromagnéticas.

Serão aquisitados sinais de todas as amostras com defeitos, com a utilização de sensores fabricados com o polímero PVDF, com terminais que permitem a medição da sua diferença de potencial, quando estes estiverem sujeitos a um esforço mecânico.

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 sinais de rádio incidentes sobre o local de testes, bem como tratamento da tensão resultante de esforço mecânico através de amplificação do sinal.

Para tanto, utiliza-se um encapsulamento construído em alumínio, onde se acomoda o filme PVDF, além de amplificador operacional Texas Instruments LM2904, filtro passa alta e filtro passa baixa com regulagem de frequências variáveis. A Figura 31 mostra o sensor de vibração.



Figura 31 – Sensor de vibração piezoelétrico. Retirado de Measurement Specialties, 2021.

A montagem dos sensores se deu em um encapsulamento de alumínio. Estes são acoplados com cola acrílica, a fim de que não ocorra amortecimento da vibração devido ao elemento colante. Uma vez montado o aparato, os sinais decorrentes da vibração são aquisitados para posterior comparação com os sinais característicos dos rolamentos sem defeitos a fim de que se determine a severidade da falha. A Figura 32 mostra uma montagem do sensor em seu encapsulamento.

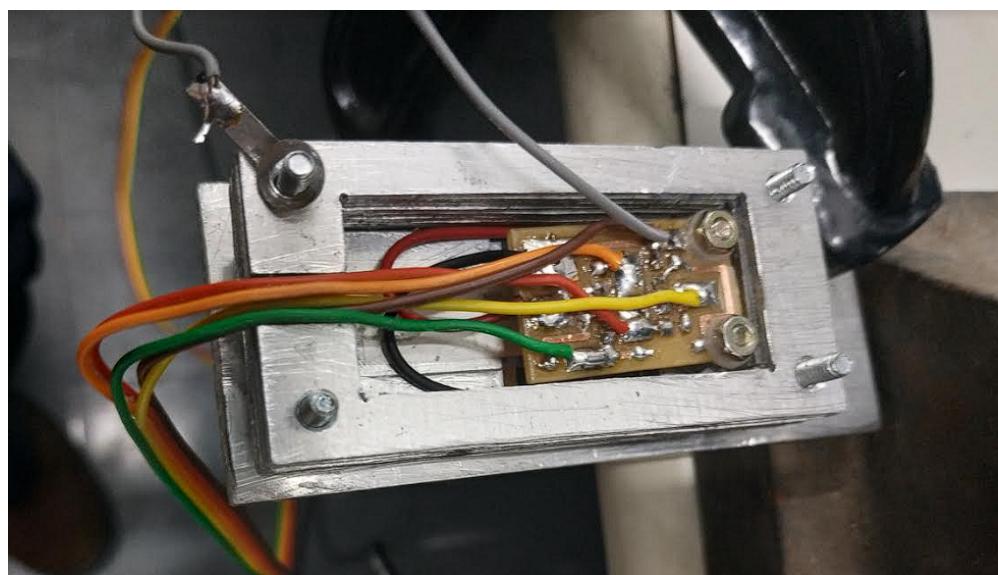


Figura 32 – Sensor de vibração piezoelétrico no encapsulamento de alumínio. Elaborado pelo autor.

A Figura 33 mostra o circuito preliminar de condicionamento do sensor piezoelétrico, elaborado no *software* Proteus. Neste buscou-se a amplificação do sinal, tendo se optado

pelo amplificador operacional de propósito geral Texas Instruments LM2904, 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.

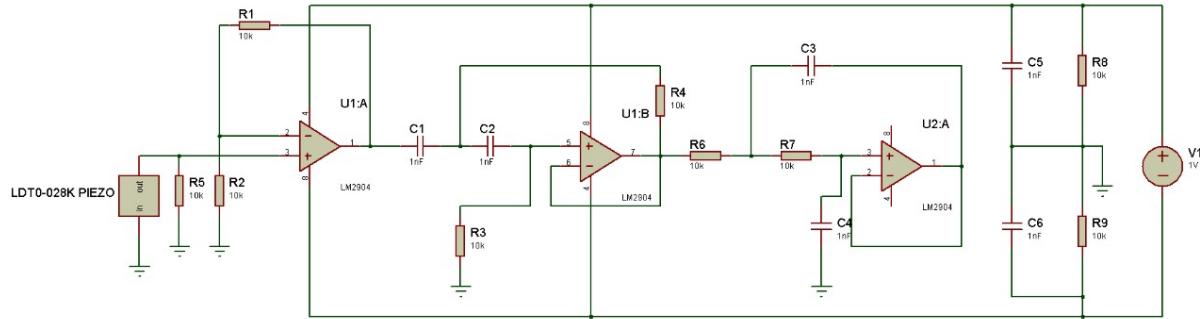


Figura 33 – Circuito preliminar de condicionamento do sensor piezoelétrico. Elaborado pelo autor.

Para a aquisição de dados, foi construído software 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.

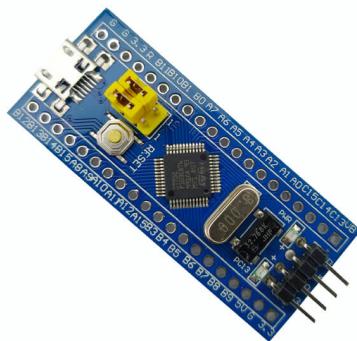


Figura 34 – Microcontrolador STM32F103. Retirado de ST, 2021.

O software foi desenvolvido em linguagem C, com utilização dos registradores do microcontrolador e testado com dispositivo gerador de função. A Figura 35 mostra a aquisição de um sinal de 5 kHz, representado através de forma de onda. Para a aquisição do sinal dos rolamentos optou-se por uma taxa de 51.6 kHz, ou seja, 2,56 vezes a frequência limite de interesse de 20 kHz inicialmente adotada.

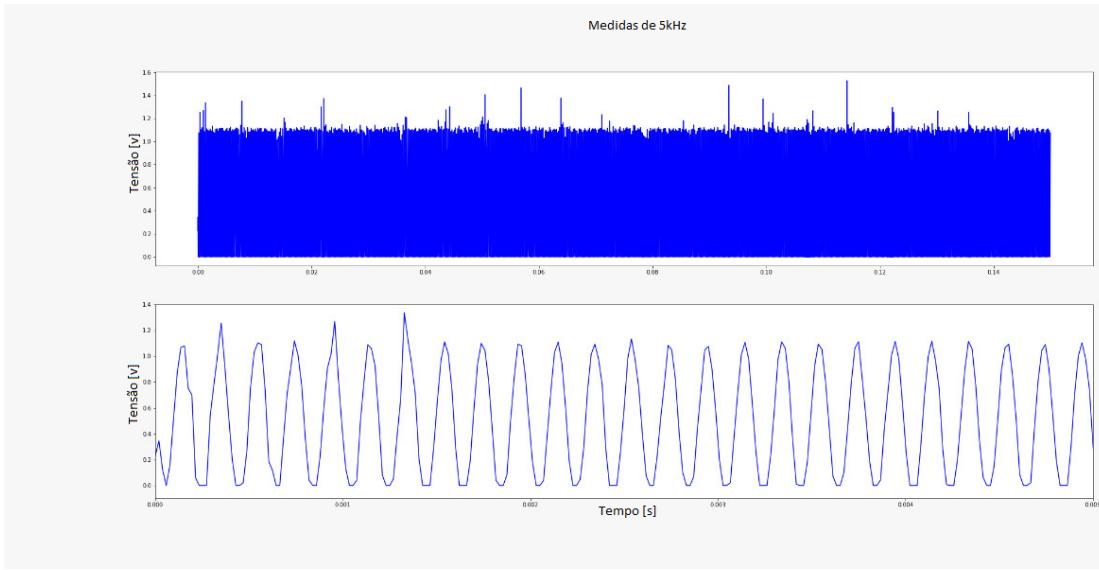


Figura 35 – Sinal de 5 kHz capturado pelo sistema construído com o microcontrolador STM32. Elaborado pelo autor.

Os modelos matemáticos de identificação de frequências características de defeitos serão utilizados para a análise dos sinais no domínio do tempo e da frequência, que terão a finalidade de calibragem dos níveis de alarme. Para fins de validação dos dados obtidos através do sistema de aquisição desenvolvido com a plataforma STM32, será utilizado a DAQ da National Instruments modelo USB-6212. Esta conta com integração total ao sistema LabView, largamente utilizado na indústria e que será, aqui, utilizado para construção de um sistema com finalidade comparativa. A Figura 36 apresenta o sistema desenvolvido para tanto, na versão livre para uso acadêmico do LabView 2020.

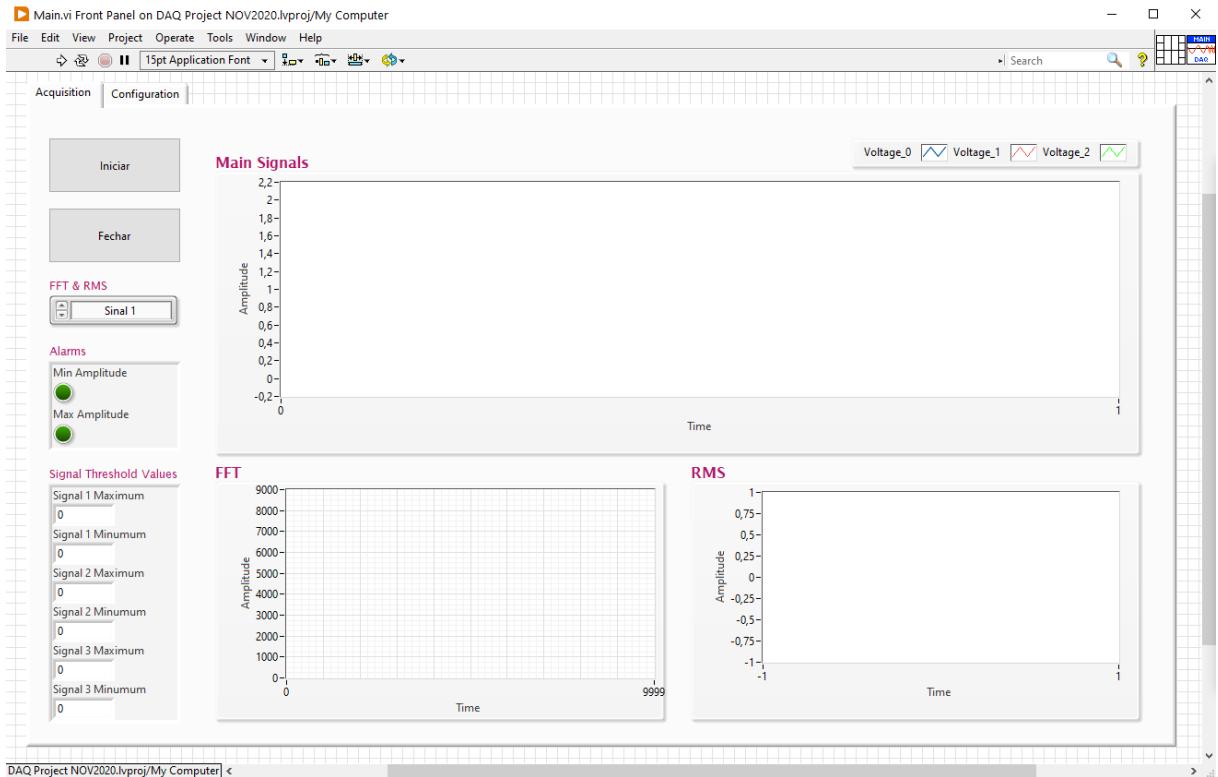


Figura 36 – Sistema de aquisição desenvolvido com LabView. Elaborado pelo autor.

Após a captura dos dados, a análise se dará através de nível RMS e Transformada rápida de Fourier. Para a análise dos dados aquisitados através do sistema desenvolvido com o STM32 será utilizada a plataforma Pandas, construída na linguagem de programação python, bem como também mantém-se aberta a possibilidade de utilização da plataforma Octave, alternativa livre ao sistema Matlab. Estas são ferramentas de software livre, com licenças do tipo BSD.

A Figura 37 apresenta o fluxo de como se dará o processo.

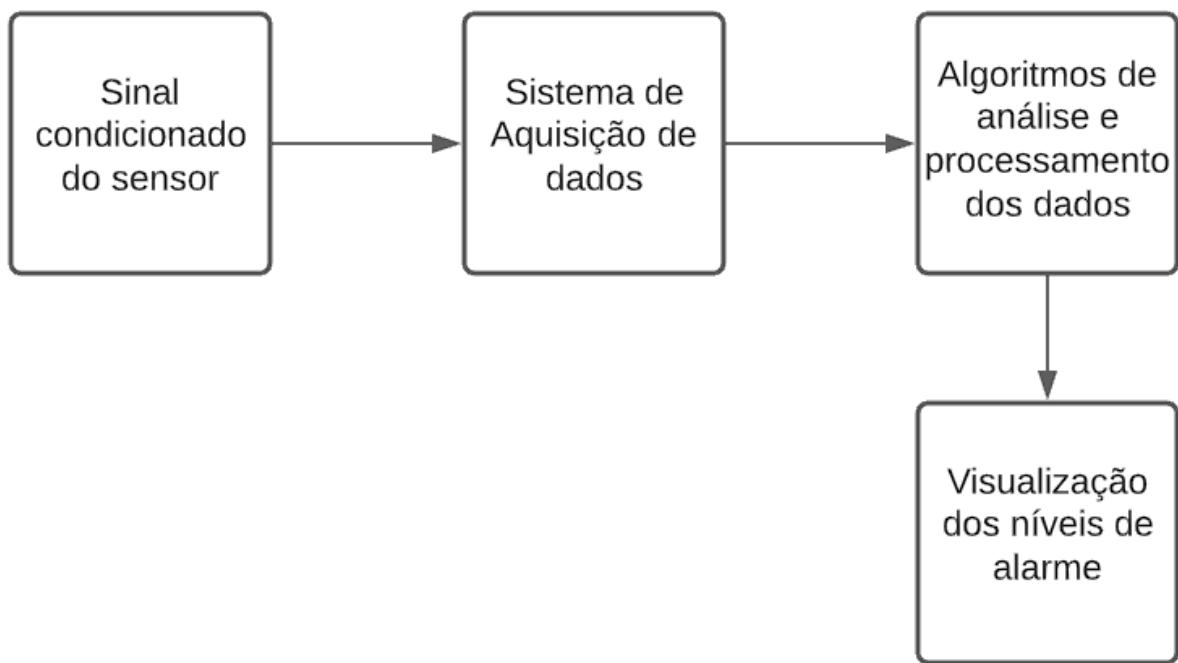


Figura 37 – Fluxo de aquisição e processamento. Elaborado pelo autor.

A análise dos resultados obtidos se dará à luz da revisão bibliográfica e comparativamente com os resultados encontrados em outros artigos.

6 Resultados

7 Próximos passos

Com base na revisão bibliográfica realizada, prevê-se o início dos experimentos seguindo um processo tal qual ilustrado na Figura 38.

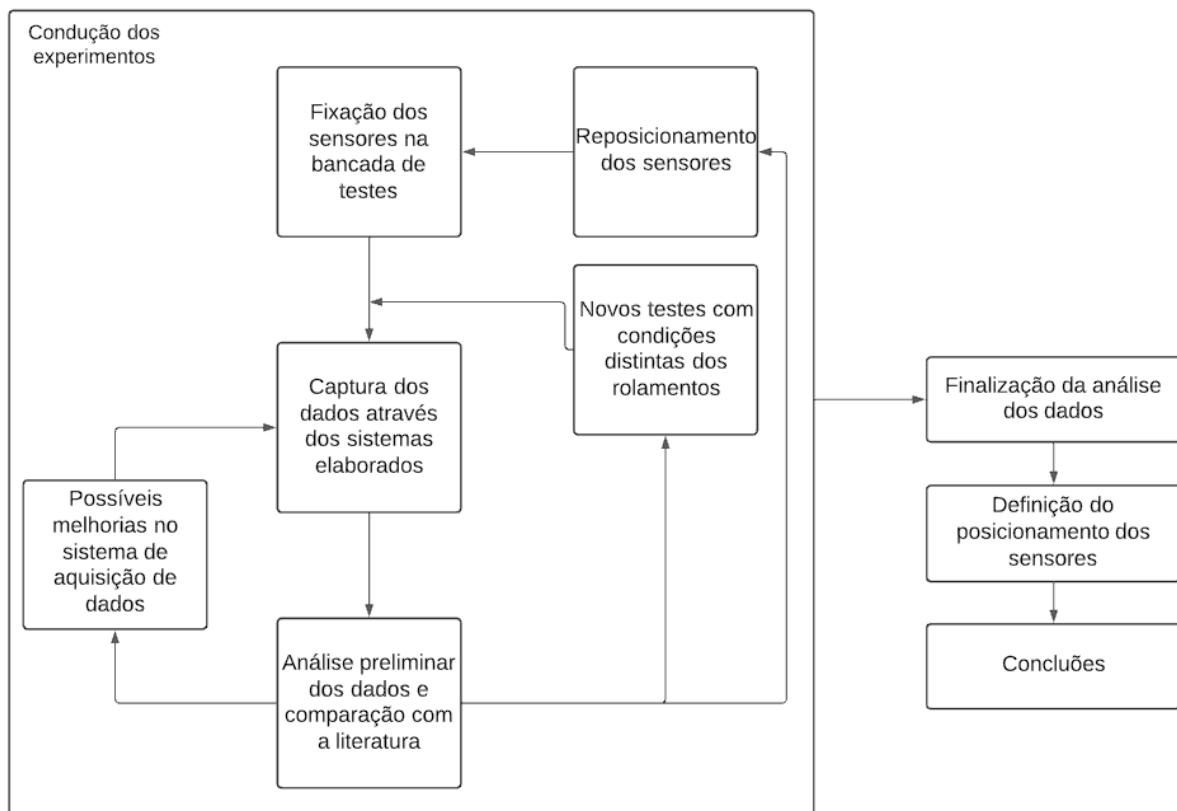


Figura 38 – Circuito preliminar de condicionamento do sensor piezoelétrico. Elaborado pelo autor.

A partir da montagem da bancada de testes e fixação dos sensores, será possível a aquisição dos dados e análise preliminar destes. Com esta análise, abre-se a possibilidade de um ciclo de possíveis ajustes nos sistemas de aquisição - incluindo-se, o condicionamento do sinal. É esperado, com isso, que se possa consolidar a caracterização do sinal em relação ao rolamento sadio e que, disto, decorram-se os testes subsequentes com os rolamentos com falhas.

Atualmente o trabalho possui as seguintes etapas em estágio de finalização ou finalizadas

- Levantamento bibliográfico inicial
- Construção da bancada de testes

- Desenvolvimento do sistema de aquisição de dados com LabView
- Desenvolvimento do sistema de aquisição de dados com STM32

A partir da revisão bibliográfica realizada e dos passos já tomados, pretende-se o início dos experimentos.

Com os dados coletados e os experimentos realizados, será possível avaliar os sinais aquisitados, verificando-se a adequação do sistema de aquisição de dados elaborado, os ajustes de posicionamento dos sensores e, por fim, introdução de falhas nos rolamentos a fim de que se diferencie os sinais de um rolamento em bom estado dos sinais de um defeituoso.

Espera-se, assim, que a questão quanto a possibilidade de utilização do sensor PVDF para detecção de falhas em rolamentos possa ser respondida.

A Tabela 1 mostra o cronograma proposto para finalização do trabalho.

Tabela 1 – Cronograma proposto para o trabalho. Elaborado pelo autor.

Atividade / Mês	Junho	Jullho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Qualificação	X						
Ajustes Metodológicos pós qualificação	X	X					
Início e condução dos experimentos		X	X	X			
Análise dos Resultados				X	X		
Escrita da dissertação		X	X	X	X	X	
Defesa						X	
Revisões e entrega final							X

Fonte: Elaborado pelo autor.

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