



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Eric Koji Nakirimoto

Desenvolvimento de um sistema de medição para qualificação de graxa de poliureia em rolamentos

Florianópolis
2023

Eric Koji Nakirimoto

Desenvolvimento de um sistema de medição para qualificação de graxa de poliureia em rolamentos

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr.
Coorientador: Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr.

Florianópolis
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Nakirimoto, Eric Koji

Desenvolvimento de um sistema de medição para
qualificação de graxa de poliureia em rolamentos / Eric
Koji Nakirimoto ; orientador, Rodolfo César Costa Flesch,
coorientador, Carlos Alberto Flesch, 2024.

92 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Graxa. 3. Sistema de medição.
I. Flesch, Rodolfo César Costa. II. Flesch, Carlos
Alberto. III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Eric Koji Nakirimoto

Desenvolvimento de um sistema de medição para qualificação de graxa de poliureia em rolamentos

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Saulo Gúths, Dr.
POSMEC/UFSC

Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr.
POSMEC/UFSC

Prof. Ricardo Antonio Francisco Machado, Dr.
PósENQ/UFSC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Coordenação do Programa de
Pós-Graduação

Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2023.

Este trabalho é dedicado à minha esposa, meus filhos,
aos meus colegas de trabalho e aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado força, saúde e resiliência para superar as dificuldades encontradas.

Aos meus pais, Hiro e Sonia, e meu irmão, Daniel, por terem estado ao longo de toda minha vida ao meu lado.

À minha esposa, Karla, por estar ao meu lado compartilhando seu amor, companheirismo, paciência, incentivo e por ser uma mãe e esposa excepcional.

Ao Prof. Dr. Eng. Rodolfo César Costa Flesch, pela confiança, compreensão, apoio, incentivo, suporte, dedicação e disponibilidade que permitiram com que este trabalho atingisse seu objetivo.

Ao meu querido amigo Julio Cesar da Silva pelo apoio, confiança, sabedoria e amizade, que me ajudou nos momentos difíceis e em toda parte técnica relacionada a graxa.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Eng. Saulo Güths, Prof. Dr. Eng. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto e Prof. Dr. Eng. Ricardo Antonio Francisco Machado, pela disponibilidade em avaliar e contribuir com este trabalho.

Aos colegas do Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento do Produto da WEG, em especial ao Cassiano Antunes de Cezario, ao Hugo Gustavo Gomes Mello, à Carolina Croceta Bombazar, ao Daniel Schmitz e ao Waldiberto de Lima Pires.

À Universidade Federal de Santa Catarina e a todo seu corpo docente, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pelos conhecimentos transmitidos em um programa de excelência acadêmica.

A todos os amigos e companheiros que contribuíram na motivação, discussões e apoio para a realização deste trabalho.

*“O conhecimento não serve de nada, a não ser que se ponha em prática.”
(Anton Pavlovich Tchekhov)*

RESUMO

Motores elétricos e outros dispositivos girantes tipicamente fazem uso de rolamentos com lubrificação por graxa. Em função do tempo e das condições de operação, a graxa degrada e perde sua capacidade de lubrificação, o que causa muitas das falhas observadas em campo em motores elétricos. O objetivo desta dissertação é desenvolver um sistema de qualificação de graxa de poliureia que permita avaliar degradação térmica e por contaminação de partículas metálicas. Para isso, foram desenvolvidas duas linhas de trabalho, uma com a utilização de câmeras, para avaliar a degradação térmica com base na alteração da cor da graxa, e a outra com a utilização de sensores Hall, para avaliar a contaminação por partículas metálicas com base na alteração das características do campo magnético. Inicialmente, os métodos propostos foram avaliados em bancada e, posteriormente, em um protótipo que simula o rolamento de um motor elétrico para aplicação industrial. Para avaliação, desenvolveram-se um método para degradar termicamente a graxa em ambiente controlado e uma tampa de rolamento não magnética impressa com impressora 3D. Os resultados obtidos na avaliação experimental comprovam que os sistemas propostos são eficazes nas detecções da degradação térmica de graxa e na detecção de partículas metálicas em condições controladas. No experimento desenvolvido para validar a degradação térmica da graxa utilizando 20,0 g de graxa degradada termicamente, o sistema conseguiu identificar uma variação de 40% nas imagens tratadas que foi causada pela mistura da graxa nova com a contaminada. Quando ocorreu a contaminação total da graxa degradada o sistema identificou variações inferiores a 10% nas imagens tratadas. Em um experimento inserindo 2,8 g de partículas em um rolamento, os sensores Hall identificaram variações de densidade no fluxo magnético de 0,01 mT até 0,32 mT. As principais limitações encontradas foram causadas pela qualidade da câmera empregada, que é de baixo custo, e pela influência da movimentação da gaiola metálica do rolamento na densidade do fluxo magnético adquirida pelo sensor Hall.

Palavras-chave: Análise de graxa. Análise de imagens. Contaminação por partículas metálicas.

ABSTRACT

Electric motors and other rotating devices typically make use of grease lubricated bearings. Depending on time and operating conditions, the grease degrades and loses its lubricating capacity, which causes many of the failures observed in the field in electric motors. The objective of this dissertation is to develop a polyurea grease qualification system that allows the evaluation of thermal degradation and contamination of metallic particles. To this end, two lines of work were developed, one using cameras, to evaluate thermal degradation based on changes in the color of the grease, and the other using Hall sensors, to evaluate contamination by metallic particles based on in changing the characteristics of the magnetic field. Initially, the proposed methods were evaluated on a bench and, later, on a prototype that simulates the bearing of a electric motor for industrial application. For evaluation, a method to thermally degrade grease in a controlled environment and a non-magnetic bearing cover printed with a 3D printer were developed. The results obtained in the experimental evaluation prove that the proposed systems are effective in detecting thermal degradation of grease and detecting metallic particles under controlled conditions. In the experiment developed to validate the thermal degradation of grease using 20,0 g of thermally degraded grease, the system was able to identify a variation of 40% in the analyzed images that was caused by the mixture of new grease with the contaminated. When total contamination of the degraded grease occurred, the system identified variations of less than 10% in the analyzed images. In an experiment inserting 2,8 g particles into a bearing, Hall sensors identified density variations in the magnetic flux from 0,01 mT to 0,32 mT. The main limitations found were caused by the quality of the camera used, which is low cost, and by the influence of the metal bearing cage movement on the magnetic flux density acquired by the Hall sensor.

Keywords: Grease analysis. Image analysis. Contamination by metallic particles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes dos rolamentos radiais de rolos e esferas	22
Figura 2 – Modos de falhas em rolamentos com suas derivações	24
Figura 3 – Motor com redutor: [1] Redutor; [2] Motor elétrico	26
Figura 4 – Detalhes construtivos para máquina de ensaio de quatro-esferas . .	30
Figura 5 – Sistema de cor RGB	33
Figura 6 – Sistema de cor CIELAB	34
Figura 7 – Exemplo do fluxo de conversão de cor com objetivo de acabamento colorimétrico	35
Figura 8 – Câmera WC045 utilizada para captura de imagens coloridas	37
Figura 9 – Conceito da bancada que será utilizada para validar o experimento em condições de mancalização semelhantes a um motor elétrico . .	39
Figura 10 – Conceito da bancada que será utilizada para validar o experimento em condições de mancalização semelhantes a um motor elétrico . .	40
Figura 11 – Graxa de poliureia: [1] graxa nova com luz branca ; [2] graxa nova com iluminação de luz ultravioleta A	42
Figura 12 – Simulação do ímã com um software para identificar o comportamento do fluxo magnético	43
Figura 13 – Preparo das partículas metálicas	44
Figura 14 – Dispositivo para o ensaio inicial com partículas: [1] ponta de prova com o sensor Hall; [2] volume impresso com ímã permanente e graxa; [3] borracha para fixação do volume impresso; [4] dispositivo para fixação do volume e ponta de prova; [5] gaussímetro	45
Figura 15 – Relação entre contaminante e densidade do fluxo magnético	46
Figura 16 – Experimento comparando distância e densidade do fluxo magnético	46
Figura 17 – Polimento do bastão de vidro para que ele possa ser empregado como uma lente	50
Figura 18 – Bancada de ensaios de degradação térmica para avaliação inicial: [1] câmera com adaptação e lente protótipo; [2] controlador de temperatura da estrutura; [3] estrutura metálica com um resistor de aquecimento; [4] controlador de chaveamento de iluminação com temporização; [5] variador de tensão para os resistores; [6] sistema de monitoramento e registro de temperatura	51
Figura 19 – Comparativo entre imagens adquiridas durante dois períodos do experimento: [1] e [3] imagens da graxa com a luz branca e luz negra, respectivamente, no início do experimento; [2] e [4] Imagens da graxa com a luz branca e luz negra, respectivamente, no final do experimento com a temperatura de 110 °C	52

Figura 20 – Exemplo de variação gerada pela mesma câmera demonstrada por meio de imagens de uma amostra de graxa adquiridas a cada dois minutos sem nenhum efeito externo ou alteração por conta do ambiente	52
Figura 21 – Exemplo de extração de plano de cores vermelho, verde e azul respectivamente utilizando a biblioteca de extração de planos do software Labview	53
Figura 22 – Preparo artesanal do vidro para execução do experimento dentro de uma estufa mantendo a característica de montagem do primeiro ensaio: [1] vidro curvo prototipado; [2] sensor de temperatura extra utilizado para conferir a temperatura especificada na estufa e a temperatura interna; [3] amostra de graxa na face inferior da lente; [4] lente acoplada na câmera	55
Figura 23 – Curvas de degradação no tempo com temperaturas específicas demonstrando que uma graxa nova possui o valor de amplitude de 100%	56
Figura 24 – Ensaio de tempo de indução oxidativo com amostras de graxa nova e degradada	56
Figura 25 – Ensaio de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier com amostras de graxa nova, operada em uma condição de degradação lenta e degradada	57
Figura 26 – Ensaio com estrutura fixa para garantir a aquisição de imagens de amostras: [1] câmera; [2] LED branco em formato de anel; [3] amostra de cor; [4] tripé; [5] base magnética com braço articulado para fixação do LED	58
Figura 27 – Imagens dos padrões adquiridas pelas câmeras e tratadas para representar a cor média	60
Figura 28 – Comparativo de três degradações térmica da graxa degradadas na temperatura de 160 °C sendo que considerou-se 100% a amostra de graxa nova	62
Figura 29 – Conceito da bancada que será utilizada para validar o experimento em condições de mancalização semelhantes a um motor elétrico	65
Figura 30 – Fluxo da graxa no anel de fixação	66
Figura 31 – Conceito do anel de fixação desenvolvido para fixar o sensor Hall, ímãs permanentes e lentes utilizadas: [1] orifício para a fixação do LED; [2] suporte para o ímã permanente; [3] suporte para o sensor Hall; [4] orifício de passagem da lente; [5] orifício de passagem de graxa	67

Figura 32 – Protótipo de anel de fixação impresso, com destaque para a fixação dos componentes: [1] lente fixada na câmera; [2] lente que fixada no LED; [3] ímã permanente; [4] sensor Hall	68
Figura 33 – Adaptação da câmera no anel de fixação protótipo: [1] alojamento do LED; [2] alojamento do sensor Hall; [3] alojamento do ímã permanente; [4] anel de fixação protótipo; [5] lente protótipo; [6] adaptador para lente protótipo e câmera; [7] câmera	69
Figura 34 – Demonstração da luva bipartida de aço utilizada para fixação do rolamento	70
Figura 35 – Bancada montada com o anel de fixação protótipo: [1] câmera 1 inferior esquerda; [2] cabos de ligação do sensor Hall; [3] cabo de alimentação da luz de fundo de LED; [4] orifício de saída de graxa; [5] engate rápido para graxeira; [6] câmera superior; [7] motor elétrico utilizado para a rotação das polias; [8] anel de fixação protótipo; [9] Câmera 2 inferior direita; [10] fonte de corrente, placa de ajuste de iluminação e placa de aquisição	71
Figura 36 – Local no qual foi inserida a graxa queimada: [1] orifício de entrada de graxa nova; [2] graxa degradada termicamente inserida no rolamento	72
Figura 37 – Gráfico com os dados das imagens tratadas após a inserção de graxa queimada	73
Figura 38 – Imagens adquiridas ao início e final do experimento: [1] e [3] Imagens adquiridas respectivamente pelas câmeras 1 e 2 no início do experimento [2] e [4]Imagens adquiridas respectivamente pelas câmeras 1 e 2 ao final do experimento	74
Figura 39 – Inserção de partículas metálicas na gaiola do rolamento para simular um desgaste: [1] orifício de entrada de graxa nova; [2] partículas de contaminantes inseridas no rolamento	75
Figura 40 – Gráfico com os dados adquiridos pelo sensor Hall após a adição de contaminantes, sendo que o motor foi ligado após 50 s e a estabilização para adicionar graxa nova até ocorrer a expulsão da graxa com contaminante ocorreu após 200 s	76
Figura 41 – Acúmulo de partículas metálicas em volta do ímã: [1] partículas metálicas no ímã permanente; [2] orifício de saída de graxa; [3] sensor Hall	77
Figura 42 – Gráfico adquirido do sensor Hall com uma elevada taxa de aquisição	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de estresse com as falhas possíveis	23
Tabela 2 – Correlação entre o grau NLGI e o resultado obtido com o ensaio de penetração com a graxa trabalhada	31
Tabela 3 – Contaminantes encontrados no lubrificante e sua origem	32
Tabela 4 – Tabela com as descrições de cada faixa de diferença de cor	34
Tabela 5 – Informações da especificação técnica da câmera WC045	38
Tabela 6 – Informações da especificação técnica do sensor Hall DVR5055A1	38
Tabela 7 – Informações do ímã permanente utilizado nos experimentos	38
Tabela 8 – Informações da placa de aquisição de sinais de tensão	39
Tabela 9 – Comparativo entre a densidade do fluxo magnético informada pelo fornecedor, calculado com o valor de indução remanente, e o valor medido	47
Tabela 10 – Variação percentual da tensão adquirida do sensor Hall em condições diferentes de ensaio	48
Tabela 11 – Comparativo de filtros de extração distintos utilizando como referência a maior diferença entre imagens consecutivas de um tratamento de imagens adquiridas após a degradação térmica de 160 °C	54
Tabela 12 – Demonstração das faixas de valores utilizadas em codificações CIE-LAB e nas codificações utilizadas nos experimentos	59
Tabela 13 – Distância entre cores calculadas com o uso de funções diferentes no ambiente de programação LabVIEW convertendo os valores adquiridos em RGB e convertidos para o sistema de cor CIELAB	60
Tabela 14 – Distância calculada com correção linear	61
Tabela 15 – Erros calculados em relação à câmera referência	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
FTIR	Infravermelho por Transformada de Fourier
HSL	<i>Hue-Saturation-Lightness</i>
ICC	Consórcio Internacional da Cor
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MCD	Chip Detector Magnético
NdFeB	Neodímio Ferro Boro
NLGI	Instituto Nacional de Graxas Lubrificantes
OIT	Tempo de Indução Oxidativo
PLA	Poliácido Láctico
PTFE	Politetrafluoroetileno
RGB	<i>Red-Green-Blue</i>
UV	Ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

$f(t)$	Função densidade de probabilidade
k	Parâmetro de forma
λ	Parâmetro de escala
L_{10}	Vida básica do rolamento
C_r	Carga dinâmica
P_r	Carga dinâmica equivalente
F	Intensidade de campo magnético quando há uma força atuando sobre uma carga
q	Carga
v	Velocidade da carga
θ	Ângulo formado entre o vetor da velocidade da carga e o vetor da intensidade do campo magnético
B	Intensidade do campo magnético
V_H	Tensão medida no sensor Hall
R_H	Coeficiente do sensor Hall
I	Corrente da bobina
d	Distância do sensor
V_o	Tensão de saída
V_Q	Metade da tensão de alimentação do sensor
B_d	Densidade do fluxo magnético
S	Sensibilidade especificada no modelo do sensor
S_{TC}	Fator específico do sensor
T_a	Temperatura ambiente
Δ	Diferença entre cores
L_1	Componente L da referência
a_1	Componente a da referência
b_1	Componente b da referência
L_2	Componente L da amostra
a_2	Componente a da amostra
b_2	Componente b da amostra
B_r	Indução remanente
R	Raio
L	Espessura
X	Distância entre o ponto medido e o ímã permanente
V	Valor unitário
i	Posição da linha na matriz
n	Quantidade de linhas da matriz

j Posição da coluna na matriz
 m Quantidade de colunas na matriz

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo geral	20
1.1.2	Objetivos específicos	20
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	DEFEITOS EM ROLAMENTOS	21
2.2	MÉTODOS DE MONITORAMENTO DE LUBRIFICANTES E DE LUBRIFICAÇÃO	23
2.2.1	Uso de sensores ultrassônicos e para aquisição de emissão acústica	24
2.2.2	Retirada de amostras manualmente	25
2.2.3	Uso de campo magnético	26
2.2.4	Uso de sensores ópticos	28
2.2.5	Outros	28
2.3	GRAXA	29
2.3.1	Métodos de análise de graxa	29
2.3.2	Vida útil de graxa	31
2.4	COR	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	MATERIAIS	37
3.2	MÉTODOS	38
4	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL	41
4.1	ESCOLHA DA GRAXA	41
4.2	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA PROPOSTO PARA QUALIFICAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DE GRAXA POR PARTÍCULAS	41
4.3	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE QUALIFICAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE GRAXA POR TEMPERATURA	48
4.3.1	Sistema com envelhecimento térmico	49
4.3.2	Padronização entre câmeras	56
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
5	VALIDAÇÃO E RESULTADOS	64
5.1	BANCADA EXPERIMENTAL COM MANCALIZAÇÃO SEMELHANTE A DE UM MOTOR ELÉTRICO PARA VALIDAR O MÉTODO DESENVOLVIDO	64
5.2	AVALIAÇÃO DE DEGRADAÇÃO DA GRAXA	69

5.3	AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DA GRAXA POR PARTÍCULAS METÁLICAS	71
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
6.1	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	78
6.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	80
	REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

Motores elétricos estão presentes na indústria em diversas aplicações e, segundo Becker (2017), são responsáveis por aproximadamente 30% do consumo total de energia elétrica do Brasil. Além disso, é possível encontrar máquinas similares na geração de energia elétrica em fontes de geração hidroelétricas, gás natural, eólica, biomassa, nuclear e carvão-vapor. Essas fontes juntas representam aproximadamente 92% da geração elétrica do Brasil, de acordo com o Balanço Energético Nacional (Balanço[...], 2023). Motores e geradores elétricos, na sua construção habitual, são comumente chamados de máquinas elétricas girantes.

As máquinas elétricas girantes são projetadas para ter uma longa vida útil, mas, como todo equipamento, podem ocorrer falhas nos seus componentes durante o uso. Merizalde, Hernández-Callejo e Duque-Perez (2017) apresentam uma proposta de classificação das falhas para os componentes do motor de indução separadas por efeitos mecânicos, elétricos, térmicos, climáticos, residuais, dinâmicos, de vibração, de cargas estáticas e dinâmicas. Para especificar a quantidade de falhas por componentes do motor elétrico, Bazurto, Quispe e Mendoza (2016) avaliaram informações de fabricantes, centros de reparos e estudos acadêmicos ligados ao assunto e chegaram à conclusão que os maiores responsáveis por essas falhas são: rolamentos, com 45%; estator, com 35%; rotor, com 10%; e outros, com os 10% restantes. Já o fabricante ABB não especifica a origem dos dados, mas afirma que aproximadamente 51% das falhas são causadas por rolamentos, 16% são pelo estator bobinado, 16% por condições externas, 5% pelo rotor, 2% por desacoplamento e 10% por outras fontes (Motors[...], 2015).

Devido à grande importância dos motores em máquinas e equipamentos, diversos trabalhos foram desenvolvidos para qualificar, diagnosticar e prevenir defeitos. Para verificar possíveis problemas nos rotores, Bendiabdellah, Benouzza e Toumi (2007) e Culbert e Letal (2017) trabalharam em métodos similares, analisando a corrente elétrica do motor. Jeffali *et al.* (2015), Younus e Bo-Suk Yang (2012) e Khanjani e Ezoji (2021) utilizaram a termografia para identificar de maneira não invasiva e com certa antecedência alguns desses problemas. Esses são apenas alguns exemplos de trabalhos que buscam identificar características prematuras de defeitos, prevenindo um eventual dano grave ao equipamento.

Magadán *et al.* (2023) avaliaram que os rolamentos representam o maior percentual de falhas nos motores elétricos. Para auxiliar no diagnóstico, há uma classificação feita pela Organização Internacional de Normatização (ISO, do inglês *International Organization for Standardization*) que define os tipos de falhas como: fadiga de contato, desgastes, corrosões, erosões elétricas, deformações plásticas, fraturas e rachaduras. Indiretamente, algumas falhas citadas têm como consequência o aumento da tempera-

tura, do ruído e da vibração (ISO, 2017). Nos casos de aumento de temperatura, Nunez *et al.* (2016) utilizaram a termografia para verificar as temperaturas com e sem falhas no rolamento. Utilizando medições de vibração, Brito, Lamim Filho e Christoforo (2011) verificaram os efeitos gerados pela passagem de corrente pelo eixo. O Rupf (2018) combinou os resultados obtidos com análises de medições ultrassônicas e análise de lubrificantes para correlacionar a contaminação por partículas, e o torque aplicado a um eixo de um motor com o desgaste de engrenagens e dos rolamentos de um redutor.

Para exemplificar as causas das falhas nos rolamentos, a SKF afirma, sem especificar o modelo de rolamento avaliado, que aproximadamente 36% delas têm origem na lubrificação inadequada, 34% na fadiga, 16% na montagem incorreta e 14% em contaminação (Produtos[...], 2019). Pensando nos problemas de lubrificação, Graciola e Goedtel (2011) desenvolveram um método baseado na medição da corrente elétrica e frequência rotacional para identificar o momento ideal para lubrificar os rolamentos para um modelo específico de motor, já Weidlich (2009) utilizou a medição de ultrassom para especificar quando deveria ser feita a lubrificação dos rolamentos. Outra solução possível para a falta de lubrificação é a utilização de lubrificadores automáticos, que são opções para aplicações que precisam de extrema confiabilidade e monitoramento adicional (Lubrificadores[...], 2021).

Sabendo da importância do lubrificante para o correto funcionamento do rolamento, Cann (2006) investigou a degradação da graxa com um dispositivo que simula o movimento do rolamento. Naka *et al.* (1998) investigaram e compararam as características de diversos tipos de graxa após operação em condições controladas e Rezasoltani e Khonsari (2016) estudaram os mecanismos de degradação mecânica e química das graxas para saber como estes influenciam na vida do lubrificante. Laghari, Memon e Khuwaja (2007) e Gonçalves (2009) trabalharam na análise de partículas de desgaste de óleo como uma forma de monitorar o condicionamento da máquina. Esses estudos permitem o entendimento do comportamento do processo de lubrificação e dos lubrificantes, porém, não necessariamente é possível controlar as variáveis do ambiente de aplicação e, muitas vezes, a coleta de amostras de graxa para posterior avaliação pode ser desafiadora. Adicionalmente, quando se trata de lubrificação por graxa, além da dificuldade de retirar amostras de graxa de maneira periódica do interior dos rolamentos, também existe a dificuldade de coletar a amostra da região correta, ou seja, amostras de graxa que de fato atravessaram o rolamento e participaram efetivamente do processo de limpeza e lubrificação.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho foram definidos como um objetivo geral e alguns objetivos específicos, descritos nas seções a seguir.

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver de forma teórico-experimental um método e um sistema de medição que consiga qualificar ou quantificar características de degradação térmica e contaminação da graxa, embarcado em um anel de fixação de um motor elétrico, que podem resultar em perda da função desta.

1.1.2 Objetivos específicos

- desenvolver sistema de qualificação de graxa contaminada por partículas metálicas que possa ser embarcado em um motor elétrico;
- desenvolver sistema de qualificação de cor da graxa com configurações de brilho e contraste originais de fábrica e que possa ser embarcado em um motor elétrico;
- criar amostras para validação do nível de contaminação de graxa;
- desenvolver um processo de degradação térmica de graxa para o sistema de qualificação de cor;
- realizar ensaios em ambiente de laboratório com graxa apresentando características de degradação térmica e contaminação para avaliar a resposta do sistema de medição embarcado em um anel de fixação.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está dividida em seis capítulos referentes às etapas definidas no trabalho. Apresenta-se, no Capítulo 2, a fundamentação teórica. Nesse capítulo são apresentadas as revisões de literatura com o objetivo de analisar o que já foi publicado sobre os defeitos de rolamentos, sistemas para detecção de falhas de lubrificantes, graxas e cores. No Capítulo 3, apresenta-se os materiais utilizados para os experimentos e suas especificações técnicas e os métodos utilizados para atingir o objetivo. No Capítulo 4, apresenta-se uma replicação de algumas estratégias identificadas em pesquisas do Capítulo 2 e o desenvolvimento de novos experimentos para correlacionar uma imagem com a degradação térmica de graxa, além de correlacionar um sinal de tensão com a contaminação de graxa por partículas metálicas. Para a análise de imagens, desenvolveu-se um método de degradação térmica e algoritmos para reduzir ruídos. Para a parte de contaminação, avaliou-se o comportamento do fenômeno físico e definiu-se sensores para uma instrumentação de validação. No Capítulo 5, apresenta-se o resultado da validação em bancada dos sistemas de qualificação desenvolvidos no Capítulo 4 em uma estrutura similar a uma máquina elétrica girante. Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma revisão de estudos disponíveis na literatura sobre a degradação de lubrificantes, além de defeitos em rolamentos utilizados em máquinas elétricas. Focou-se nos principais modos de falha e em técnicas de monitoramento de degradação térmica e de contaminação de lubrificantes.

2.1 DEFEITOS EM ROLAMENTOS

Diversos trabalhos foram desenvolvidos para postergar o tempo até a falha de rolamentos. A exemplo disso, Merker e Zisman (1949) trabalharam em uma solução para aumentar a vida útil de graxas utilizadas em rolamentos para aplicações de temperatura elevada como, por exemplo, mísseis guiados e aviões com velocidades supersônicas. Trata-se de aplicações que ganharam visibilidade durante a Segunda Guerra Mundial. Isso se fez necessário após as resinas empregadas como isolantes do estator bobinado, que eram o fator limitante da temperatura de aplicação de motores, serem melhoradas, aumentando, assim, a temperatura máxima suportada pelo estator bobinado e, conseqüentemente, a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias para mancais e lubrificação. O aumento de esforço de pesquisas nessa área trouxe um aumento significativo de durabilidade e redução do torque de fricção, gerando aumento de tempo de uso (LUGT, 2014). A evolução do rolamento convergiu a uma padronização nos componentes que ele possui. A exemplo disso, grande parte dos rolamentos radiais utilizam esferas ou rolos como elementos girantes entre si. Estes ficam entre pistas que acoplam as duas peças que movimentam entre si. Os componentes dos rolamentos radiais são demonstrados na Figura 1.

A vida útil de muitos componentes costuma ser estimada como o tempo até a falha. Para modelar esses sistemas, costuma-se utilizar a distribuição de Weibull, dada por:

$$f(t) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^{k-1} e^{-(t/\lambda)^k}, \text{ para } t \geq 0 \quad (1)$$

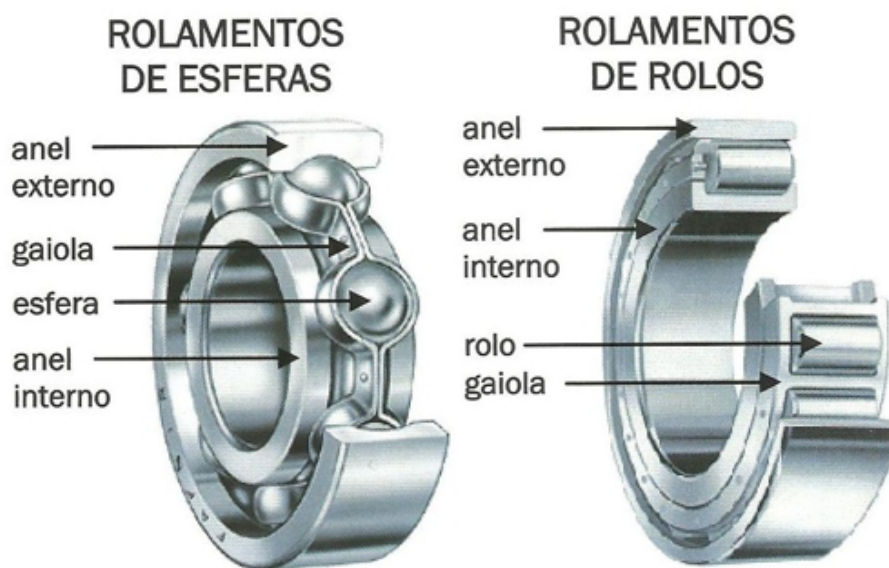
em que $f(t)$ representa a função densidade de probabilidade para a variável aleatória, k é o parâmetro de forma e λ é parâmetro de escala.

No caso do rolamento, por ser um item muito utilizado, há diversas normas e manuais de fabricantes que especificam cálculos baseados em variáveis da aplicação, mas a norma ISO (2007) especifica a seguinte equação para determinação do tempo limite de uso de um rolamento rígido de esferas para confiabilidade de 90%:

$$L_{10} = \left(\frac{C_r}{P_r} \right)^3 \quad (2)$$

em que L_{10} é a vida básica do rolamento em milhões de revoluções, C_r é carga dinâmica em newton e P_r é a carga dinâmica equivalente em newton. Há controvérsias

Figura 1 – Componentes dos rolamentos radiais de rolos e esferas



Fonte: Revedrolamentos (2023).

em relação ao uso da Equação (2), pois Campanha e Sinatora (2007) executaram ensaios em duas condições para as quais afirmam que o modelo não se aplica, por não apresentar concordância com o tempo de vida observado em campo.

Independentemente da equação utilizada, é possível especificar a vida útil de um rolamento baseado nas condições do projeto, mas as condições ambientais, de instalação e de manutenção podem gerar problemas que não necessariamente são previsíveis ou corretamente estimados. Pensando nos tipos de falhas, Merizalde, Hernández-Callejo e Duque-Perez (2017) pesquisaram diversas referências que apontam que as falhas em rolamentos representam de 13% a 69% das falhas de máquinas girantes, sendo que essas falhas podem ainda ser divididas conforme o tipo de estresse, conforme a Tabela 1

Já o fornecedor Barden separa as falhas com as possíveis causas: sobrecarga, superaquecimento, falso brinelamento, brinelamento, fadiga, reversão de carga, contaminação, falha de lubrificação, corrosão, desalinhamento, excesso de folga ou falta de folga (Bearing[...], 2008). Essas causas podem ser visualizadas a olho nu em casos nos quais ocorrem danos elevados, porém devido à dificuldade na visualização interna do rolamento, por conta da gaiola ou até mesmo da dificuldade em verificar o que ocorre dentro de uma máquina, esses diagnósticos acabam sendo feitos apenas após a desmontagem e execução de um corte no rolamento. Além dos trabalhos citados, a norma ISO 15243 fornece imagens e detalhes sobre as falhas de: fadiga, desgaste, corrosão, erosão elétrica, deformação plástica, fratura, *cracking* e suas derivações, conforme a Figura 2 (ISO, 2017). Com o uso dessas informações e imagens a identificação do

Tabela 1 – Tipos de estresse com as falhas possíveis

Tipo de estresse	Falha 1	Falha 2	Falha 3	Falha 4
Mecânico	Desalinhamento	Folga	Desgaste	-
Elétrico	Desalinhamento do rotor	Carga eletrostática	Acoplamento eletrostático	Variação de frequência
Térmico	Fricção	Ambiente	Climático	-
Ambiente	Condensação	Materiais diferentes	Superaquecimento	Pouca ventilação
Vibração e agitação	Vibração	Acoplamento com equipamento	-	-
Carga dinâmica e estática	Radial	Axial	Pré-carga	-

Fonte: Merizalde, Hernández-Callejo e Duque-Perez (2017).

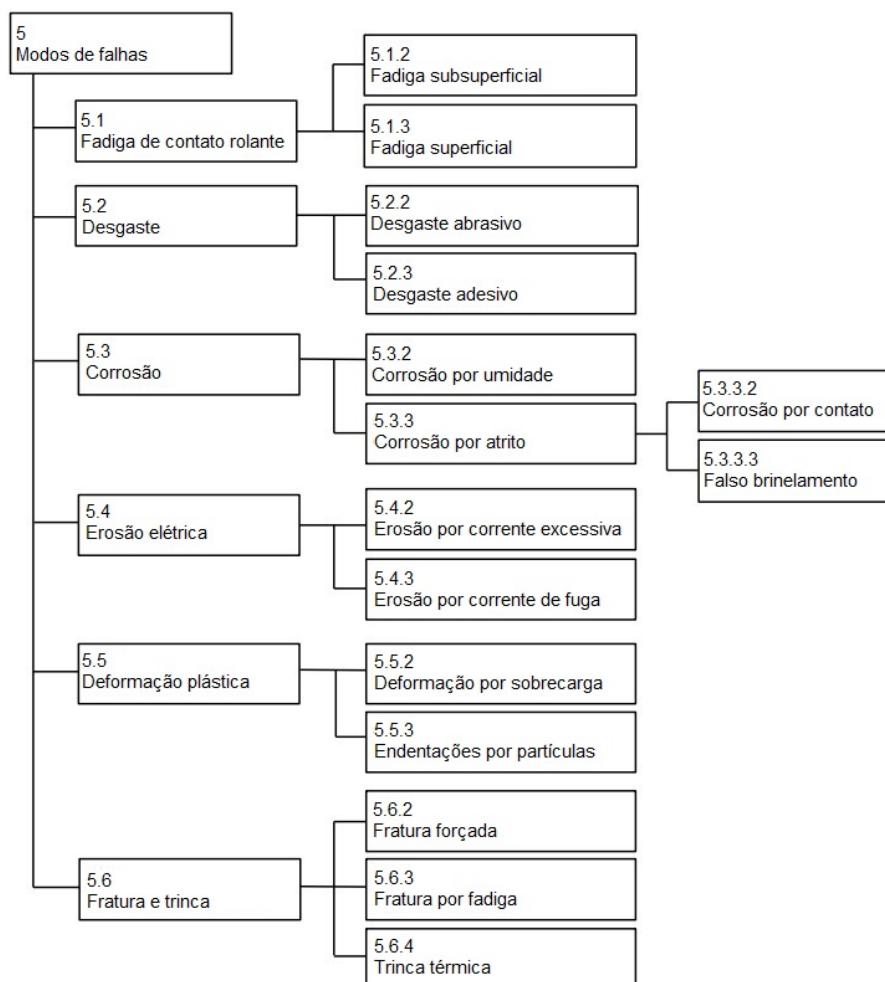
modo de falha é facilitado.

2.2 MÉTODOS DE MONITORAMENTO DE LUBRIFICANTES E DE LUBRIFICAÇÃO

Com a busca por maior tempo de vida útil, diversos trabalhos foram conduzidos com o objetivo de monitorar o comportamento de máquinas girantes. Um exemplo dos trabalhos mais antigos é o estudo feito por Maris e Kadyszewski (1987), no qual avaliou-se um protótipo utilizando o fenômeno de corrente de Foucault. Esse sistema apresentava alguns erros, mas já era um grande avanço para a época em se tratando de monitoramento de máquinas. Como exemplo de estudos mais recentes, Tchakoua *et al.* (2014) avaliaram o cenário de aerogeradores, no qual é possível obter informações importantes para o monitoramento da saúde da máquina por meio da inspeção dos lubrificantes. A importância desse monitoramento é relevante e há vários tipos de sensores utilizados para identificar partículas presentes no lubrificante.

Jia *et al.* (2022) avaliaram o desempenho de diversos métodos de monitoramento on-line com o objetivo de identificar as vantagens com sensores elétricos, ópticos, magnéticos e acústicos e a faixa de partículas que cada uma dessas técnicas poderia identificar. Em uma abordagem avaliando os custos de um problema, Trevisan (2011) comparou em sua dissertação o custo de uma manutenção gerada por um dano a um motor elétrico com o custo de manutenção preventiva dos rolamentos. Chegou-se à conclusão de que a manutenção do motor apresenta um custo maior que 600% em relação à substituição dos rolamentos em tempos apropriados. Por fim, escolheu-se os métodos de monitoramento de lubrificantes com o uso de sensores ultrassônicos, sensores para aquisição de emissão acústica, sensores magnéticos e sensores ópti-

Figura 2 – Modos de falhas em rolamentos com suas derivações



Fonte: adaptado de ISO (2017).

cos para o aprofundamento a respeito das pesquisas e técnicas utilizadas em relação ao método de coleta manual.

2.2.1 Uso de sensores ultrassônicos e para aquisição de emissão acústica

Sobre o tratamento de dados adquiridos com o uso de sensores ultrassônicos, Jia *et al.* (2022) avaliaram um sistema composto por um tubo de óleo com um emissor e receptor acústicos em lados opostos, com foco na identificação de partículas metálicas dispersas no óleo. Com esse método, foi possível estimar o tamanho das partículas e separar partículas sólidas de bolhas de gás em escoamento de óleo.

Diferente desse tipo de estudo, Wang *et al.* (2017), Miettinen (2000), entre outros trabalhos desenvolvidos com o uso de emissão acústica, utilizaram esse método para identificar o contato entre as partes metálicas, permitindo descobrir o momento ideal para efetuar a lubrificação do rolamento. Esse método é difundido mais em soluções

preventivas de sensores de maneira não invasiva devido à baixa complexidade de instalação. Porém há dificuldades na aquisição de sinais, pois a exemplo das frequências ultrassônicas, as taxas de aquisições iniciam em 500 kHz (TREVISAN, 2011).

Em outra abordagem, Miettinen e Andersson (2000) compararam os efeitos de contaminantes de materiais conhecidos misturados na graxa e verificaram que o sistema identifica a presença de contaminantes, mas sem um crescimento linear em relação ao aumento da concentração de partículas.

Em uma proposta com ensaios controlados, Elforjani (2018) executou um experimento para verificar se o método da emissão acústica é efetivo se comparado a variações de temperatura e vibração. Nesse experimento, o pesquisador utilizou rolamentos axiais com pouca graxa e aplicou diferentes cargas em baixa rotação. Nos ensaios, a emissão acústica apresentou antecipadamente uma variação no sinal em relação aos outros métodos, sendo que em seguida ocorreu um aumento de vibração. Em comparação similar, mas com o foco na aplicação de contaminantes, Tandon, Ramakrishna e Yadava (2007) avaliaram que a emissão acústica é mais eficiente se comparada a outros métodos como vibração, corrente, entre outros.

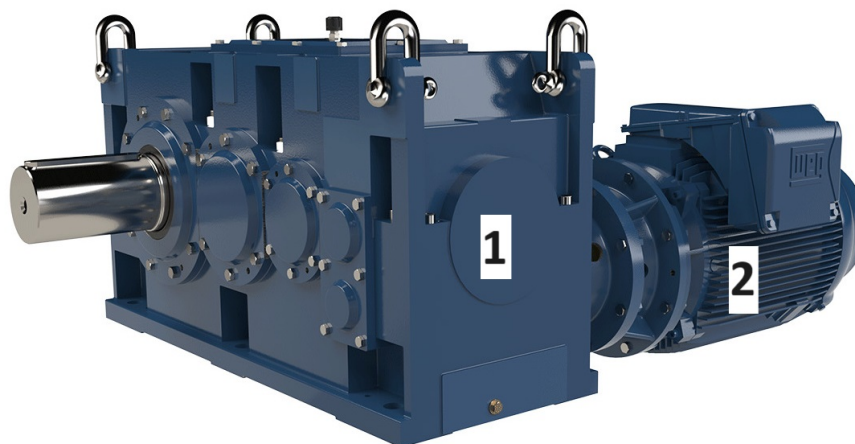
2.2.2 Retirada de amostras manualmente

O método de retirada de amostras de maneira manual é utilizado para monitorar a qualidade da graxa em motores elétricos, porém há a necessidade de extrair a amostra, o que tipicamente exige o desligamento da máquina. Isso ocorre pois os motores elétricos podem estar acoplados em outros mecanismos, o que torna difícil o acesso ao rolamento para a retirada de uma amostra de graxa, sem gerar uma parada da máquina. A exemplo desses mecanismos, há os redutores acoplados em motores, que geralmente geram restrição de acesso ao rolamento dianteiro, conforme a Figura 3.

Esse processo de retirada é considerado um método off-line. É utilizado em diversas áreas de manutenção de equipamentos como, por exemplo, na aviação e em equipamentos militares. Há um benefício ao analisar o lubrificante, pois, em seu estudo, Vähöja (2006) identificou algumas características nos óleos referentes aos desgastes de metais e partículas sólidas.

As retiradas manuais de amostras de lubrificantes para inspeção são previstas em normas, conforme um estudo feito por Kowalik, II e Janosky (2016). Um exemplo dessas normas é especificada pela Associação Americana para Testes e Materiais (ASTM, do inglês *American Society for Testing and Materials*), que descreve os instrumentos necessários para coleta e os procedimentos para tipos específicos de amostras (ASTM, 2019b). Além dos procedimentos descritos em normas, há kits de análise de graxa, como, por exemplo, o kit SKFTKGT do fornecedor SKF, que possui dispositivos e procedimento para a retirada de graxa, com ou sem acesso ao rolamento. Além disso,

Figura 3 – Motor com redutor: [1] Redutor; [2] Motor elétrico



Fonte: adaptado de HELIMAX... (s.d.).

fornecedores oferecem dispositivos para possíveis ensaios simplificados que podem ser executados ainda em campo (Kit[...], 2009).

2.2.3 Uso de campo magnético

O uso do campo magnético é aplicado em diversos métodos como, por exemplo, o uso de ímãs permanentes para acumular partículas metálicas (MCD, do inglês *Magnetic Chip Detector*). Neste método, as partículas ferrosas são atraídas para o MCD e ficam acumuladas até a retirada para a avaliação com microscópio. Com algumas características das partículas, é possível identificar a origem do desgaste, separando o que foi gerado por fadiga ou desgaste abrasivo (RAADNUI, s.d.). Há outros modelos de MCD que possuem um circuito eletrônico interno. Estes fecham um contato mecânico quando há o acúmulo de partículas metálicas entre dois ímãs permanentes (MAGNETIC... , 2023). Outros dispositivos que utilizam ímãs permanentes são os ferrógrafos analíticos, que possuem lâminas que ficam inclinadas sobre diferentes intensidades de campo magnético, as quais filtram proporcionalmente as partículas (BERNARDES, 2011). Essas técnicas são as mais difundidas, pois há limitações técnicas no monitoramento de partículas por conta da falta de resolução e de confiabilidade das medições em outras propostas alternativas, além de dificuldades com a miniaturização dos sistemas de medição (WU, T. *et al.*, 2013).

Em uma pesquisa genérica, Jia *et al.* (2022) avaliaram diversas características de sensores para monitoramento de desgaste e chegaram à conclusão de que a utilização do campo magnético para esse tipo de investigação pode apresentar uma boa propriedade anti-interferência, alta estabilidade térmica e alta confiabilidade.

Uma das possibilidades de uso do campo magnético é o uso de bobinas. Yu

Wu *et al.* (2016) utilizaram a variação da indutância de uma bobina e conseguiram identificar partículas com diâmetro de 20 μm e com um conceito de bobinas duplas, conseguiram identificar partículas com diâmetro a partir de 5 μm . Em uma pesquisa semelhante, mas utilizando um núcleo de ferrite, Zhu, Zhong e Zhe (2017) foram capazes de detectar partículas maiores que 11 μm em um diâmetro de passagem de lubrificante de 1 mm. A detecção de partículas pequenas possibilita a identificação de um estágio inicial de um desgaste, porém se limita a partículas ferromagnéticas.

Outra solução é a utilização de um sensor Hall comercial. Neste conceito, Inthawatkul, Witsarut Sriratana e Sutham Sathamsakul (2017) utilizaram a intensidade do campo magnético adquirida por um sensor Hall. Para essa proposta, os autores utilizaram uma montagem na qual o sensor Hall ficou separado da região de contaminantes por uma bobina que gerou o campo magnético. Os resultados obtidos demonstraram uma relação aparentemente linear entre a tensão de saída e o valor percentual de contaminantes, sendo que para correlacionar esses valores utilizaram a Equação (3)

$$F = qvB \sin \theta \quad (3)$$

em que F é a intensidade de campo magnético quando há uma força atuando sobre uma carga, q é a carga, v é a velocidade da carga, θ é o ângulo formado entre o vetor da velocidade da carga e o vetor da intensidade do campo magnético e B é a intensidade do campo magnético. Para converter a intensidade do campo magnético em tensão adquirida na saída do sensor Hall, utilizou-se a Equação (4):

$$V_H = \frac{R_H}{d} IB, \quad (4)$$

em que V_H é a tensão medida no sensor Hall, R_H é o coeficiente do sensor Hall, I é a corrente da bobina e d é a distância do sensor.

Com uma proposta semelhante, mas com o uso de um ímã permanente, Chaiyachit *et al.* (2012) obtiveram resultados semelhantes e identificaram que a viscosidade do óleo não influenciava na medição. Em uma abordagem com o mesmo tipo de sensor, S. Sathamsakul, W. Sriratana e L. Sriratana (2020) montaram uma estrutura na qual o sensor Hall ficou posicionado entre o tubo de passagem de partículas metálicas e uma bobina que gerou um campo magnético. Em ambas as pesquisas, as variações de tensão de saída do sensor Hall foram proporcionais à quantidade de contaminantes, até o momento em que ocorre a saturação do campo magnético. Há diversas vantagens no uso de sensores Hall, como a alta durabilidade, a alta velocidade de operação, a alta repetibilidade e uma ampla faixa de temperatura de uso (HALL. . . , 2023). Algumas opções comerciais fornecem ampla gama de informações disponibilizadas pelos fabricantes como, por exemplo, a da DRV5055. . . (2021), na qual a tensão de saída do sensor é proporcional à resposta magnética. A correlação pode ser obtida pela

Equação (5):

$$V_o = V_Q + B_d(S(1 + S_{TC}(T_a - 25))), \quad (5)$$

em que V_o é a tensão de saída, V_Q é metade da tensão de alimentação do sensor, B_d é a densidade do fluxo magnético, S é a sensibilidade especificada no modelo do sensor, S_{TC} é um fator específico do sensor e T_a é a temperatura ambiente.

2.2.4 Uso de sensores ópticos

A avaliação de lubrificantes com o uso de sensores ou dispositivos ópticos é difundida em métodos on-line ou off-line. Isso porque as amostras de contaminantes obtidas nos ensaios permitem um diagnóstico preciso sobre a morfologia das partículas. Com esse diagnóstico é possível identificar a origem destas, como válvulas ou selantes (VÄHÄOJA, 2006).

Os procedimentos off-line costumam ser feitos com o uso de microscópios, mas há estudos para a implementação de diagnósticos com sistemas on-line. Em uma avaliação genérica de métodos para monitoramento on-line, TongHai Wu *et al.* (2013) consideraram muito encorajante o uso da combinação de imagens e sensores magnéticos para a detecção de partículas, pois seria possível avaliar a distribuição e a cor das partículas. Em uma pesquisa a respeito de sensores para a identificação de desgaste, Jia *et al.* (2022) afirmaram que o estudo de imagens pode ser utilizado com uma medição da variação na transmissão de luz, podendo detectar partículas opacas maiores que 4 μm . Há outras alternativas com o uso desse tipo de sensor como, por exemplo, a combinação de várias câmeras para a reconstrução de partículas tridimensionalmente (WU, H. *et al.*, 2016).

Outro potencial que pode ser explorado é a variação na iluminação com o uso de luzes ultravioletas, microondas, infravermelho entre outras combinações para se obter o melhor resultado (JIA *et al.*, 2022). Sabendo da importância do uso de imagens, Shirata (2013), Toru Takahashi (2007), Takuya Shirata (2014), entre outros inventores com patentes depositadas, trabalharam em conceitos diferentes com o objetivo de diagnosticar lubrificantes.

2.2.5 Outros

Há outras alternativas que podem ser utilizadas para o monitoramento de lubrificação, mas não foram incluídas neste trabalho por conta do entendimento de que apresentam características particulares da aplicação, ou pela dificuldade de implementação. A exemplo dessas, são as medições de filmes de lubrificante com o uso da medição de capacitância.

Bader *et al.* (2017) avaliaram o efeito da capacitância do rolamento com cargas e temperaturas diferentes, com o objetivo de comparar o impacto dessas no filme de lu-

brificante. Dessa forma é possível estimar quando há a necessidade de lubrificar. Além deste, Joshi (2019) buscou caracterizar eletricamente o rolamento, Adabi *et al.* (2008) buscaram avaliar os danos ao rolamento com a medição de capacitância, e Bubert, Zhang e De Doncker (2017) modelaram e mediram a capacitância do rolamento.

As propostas que consideraram o rolamento como um componente elétrico são interessantes e promissoras, porém os problemas das correntes parasitas estudados por Brito, Lamim Filho e Christoforo (2011), e os efeitos gerados pelo chaveamento dos motores elétrico com inversores no rolamento, avaliados pelo Li *et al.* (2014), podem gerar resultados indesejáveis no processo de medição de capacitância.

2.3 GRAXA

A graxa é um lubrificante utilizado na indústria que apresenta níveis mais baixos de atrito se comparados a um óleo (LUGT, 2014). É composta por um agente espessante e um lubrificante líquido (LUGT, 2009). Há diversos tipos de agente espessante como a poliureia, complexo de lítio, argila, lítio, entre outros e esses espessantes são combinados com óleos do tipo mineral e sintético (ENCONTRE. . . , 2020). Essa combinação, permite que seja criado um filme fino de lubrificante entre os elementos de contato e reduza o atrito e desgaste (LUGT, 2014). Além desses componentes há a possibilidade de inclusão de aditivos, com o objetivo de complementar o lubrificante com funções de anti-oxidação, melhora de funções para extrema pressão, entre outros (MANG; DRESEL, 2007).

Segundo Lugt (2014), o primeiro desafio no desenvolvimento de graxas é desenvolver um lubrificante que irá possuir uma longa vida e poderá ser utilizado em ambientes severos. A exemplo disso, uma pesquisa feita em assistências técnicas de máquinas elétricas no Vale de Cauca, Colômbia, verificou que dos motores encaminhados para manutenção por conta de defeitos, a falha por contaminação foi a maior causadora em motores de corrente contínua e a segunda maior causadora em motores de corrente alternada (BAZURTO; QUISPE; MENDOZA, 2016).

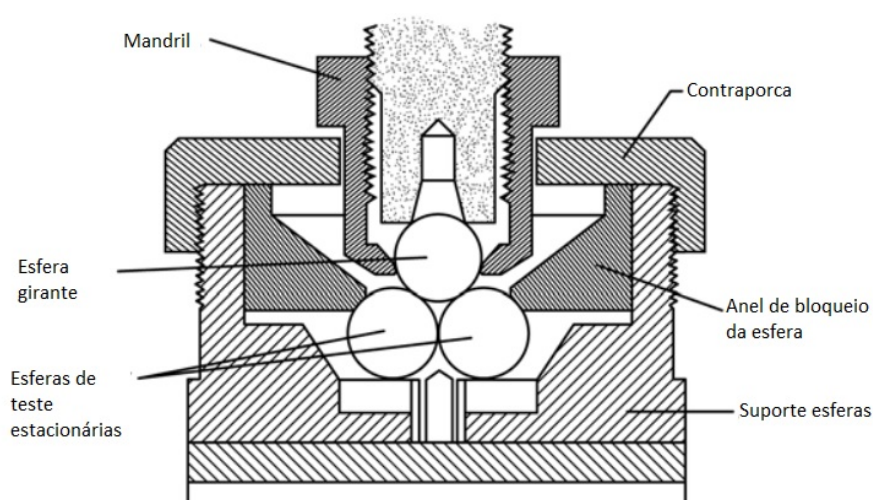
2.3.1 Métodos de análise de graxa

Os estudos de graxa são extremamente importantes para conseguir verificar o desempenho e a qualidade do lubrificante. Os fornecedores costumam detalhar algumas informações na folha de especificação, mas as condições de aplicação são definidas pelo fornecedor do rolamento ou da máquina. Para auxiliar nos diagnósticos, a norma SAE (2005), desenvolvida para veículos pesados, apresenta mais de 30 normas para ensaios, com as descrições de cada aplicação SAE (2005). É especificado que as propriedades da graxa são separadas em: consistência, textura e estrutura, estabilidade estrutural, estabilidade mecânica, viscosidade aparente, ponto de gota, re-

sistência à oxidação, proteção contra a fricção e ao desgaste, proteção contra corrosão, separação de óleo, cor e fluxo.

Para o desgaste, o método de quatro-esferas torna-se uma opção eficaz, pois a avaliação de desgaste é feita de forma visual com o uso de esferas metálicas padronizadas. Neste método o lubrificante é aplicado em esferas metálicas, sendo que uma esfera é girante e três esferas ficam paradas, conforme a Figura 4. É utilizada por norma uma temperatura conhecida, velocidade controlada e força constante para padronizar a condição de desgaste (ASTM, 2015).

Figura 4 – Detalhes construtivos para máquina de ensaio de quatro-esferas



Fonte: adaptado de ASTM (2015).

Para definir a consistência da graxa, executa-se um ensaio com um *penetro-meter*, que avalia a capacidade de penetração de um cone padrão em uma amostra conhecida de graxa (ASTM, 2021). Esta pode ser trabalhada para alterar sua consistência (ASTM, 2018). Com o resultado da penetração da graxa trabalhada, é possível identificar qual o grau de consistência (NLGI, do inglês *National Lubricating Grease Institute*) da graxa, conforme a Tabela 2.

Para definir a temperatura na qual a graxa passa de um estado plástico para um estado líquido, executa-se o ensaio de ponto de gota. Esse teste consiste em uma amostra de graxa colocada em um recipiente suspenso aquecido a um banho de óleo. Avalia-se então a temperatura na qual ocorre a queda de uma gota do fundo do recipiente. Esse é chamado de ponto de gota da graxa (ASTM, 2020b).

Para identificar a resistência do lubrificante em relação à oxidação, executa-se um ensaio em ambiente selado com temperatura controlada. Com as condições definidas, avalia-se a queda de pressão no ambiente controlado (ASTM, 2019c). Outro ensaio que avalia a oxidação é o ensaio de tempo de indução de oxidação. Neste

Tabela 2 – Correlação entre o grau NLGI e o resultado obtido com o ensaio de penetração com a graxa trabalhada

Grau NLGI	ASTM Penetração Trabalhada 25 °C
000	445-475
00	400-430
0	355-385
1	310-340
2	265-295
3	220-250
4	175-205
5	130-160
6	85-115

Fonte: adaptado de MOBIL... (2015).

também é aplicado condições controladas de pressão e temperatura, mas a variação é definida pelo fluxo de calor medido pelo equipamento (ASTM, 2022a).

Para o estudo de separação de óleo, a norma ASTM (2020a) define a tendência de separação do óleo da graxa armazenada. Já a ASTM (2022b) define a separação de óleo em elevada temperatura e a ASTM (2019a) especifica um ensaio para determinar a separação de óleo com elevadas forças centrífugas.

Outra investigação possível do lubrificante é a utilização da espectrometria infravermelha pela transformada de Fourier (FTIR, do inglês *Fourier-transform infrared spectroscopy*). Com esse método é possível avaliar a oxidação de hidrocarbonetos e componentes à base de petróleo (ASTM, 2022c). Para complementar a importância deste método, Garry e Bowman (2007) utilizaram o FTIR para separar diferentes parâmetros de óleo e identificaram diferenças significativas entre uma amostra nova e uma amostra utilizada. Com amostras de graxa, Jiabao, Yanhai e Jinyong (2015) avaliaram a degradação térmica de uma graxa de Lítio 12-hidroxiestearato na temperatura de 120 °C. Para essa temperatura as amostras foram separadas em intervalos de degradação de 2 h, 4 h, 8 h e 24 h e posteriormente foram feitas diversas avaliações. As amostras degradadas apresentaram perda de massa e variação nas características da fibra, mas sem variações significativas nos resultados do FTIR, pois se esperavam novos picos entre 1715 cm⁻¹ e 1736 cm⁻¹. A expectativa no aparecimento de uma banda nessas regiões ocorreu, pois geralmente estas estão associadas a formações de compostos de oxidação de graxa (HUANG *et al.*, 2016).

2.3.2 Vida útil de graxa

Os modelos de vida útil da graxa são, em sua grande maioria, empíricos e desenvolvidos por fabricantes de rolamentos. Estes utilizam máquinas R0F, R2F e FE9 para criar uma distribuição de densidade de probabilidade Weibull e estimam a vida útil (LUGT, 2009). Essas máquinas permitem a execução de ensaios com condições

de força, de rotação e de temperatura em um tempo conhecido, mas os danos gerados nas condições de uso podem reduzir significativamente o tempo de uso de uma graxa.

Um desses danos ocorre durante o uso ou armazenamento, visto que a graxa oxida e isso reduz a sua vida útil. Embora a formação de óxidos de metal na superfície do mancal possa auxiliar na redução do atrito, a oxidação da graxa pode gerar ácidos que consomem os aditivos e degradam o espessante (LUGT, 2014).

O ambiente também é um fator que contribui significativamente na vida útil da graxa. Isso porque a temperatura acelera a degradação desta. Pode consumir os aditivos, decompor termicamente, oxidar e por conseguinte pode gerar uma falha no mancal (LIMA, 2009). Além da temperatura, um ambiente que contamina o lubrificante pode gerar incompatibilidade química com os componentes da graxa. Isso pode causar uma falha na lubrificação, acelerando o desgaste no mancal e aumentando a temperatura (Barden Precision Bearings, 2008)(BEARING. . . , 2008). O fornecedor Mobil disponibiliza informações da origem dos contaminantes para auxiliar no diagnóstico, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Contaminantes encontrados no lubrificante e sua origem

Contaminante	Origem
Silicone	Pasta abrasiva, selante ou anti-espuma
Boro	Anti-congelante ou aditivo de óleo
Sódio	Anti-congelante ou aditivo de óleo
Potássio	Anti-congelante ou aditivo de óleo
Ácido	Degradação do óleo
Oxidação	Degradação térmica do óleo
Água	Anti-congelante, processo com água ou condensação
Glicol	Anti-congelante
Combustível	Sistema de combustão
Fuligem	Combustão incompleta ou vazamento de gás
Cloro	Água do mar ou gás de aterro
Prata	Rolamento ou bucha ou aditivo de óleo
Manganês	Elementos de turbina a gás

Fonte: adaptado de Mobil[...] (2015).

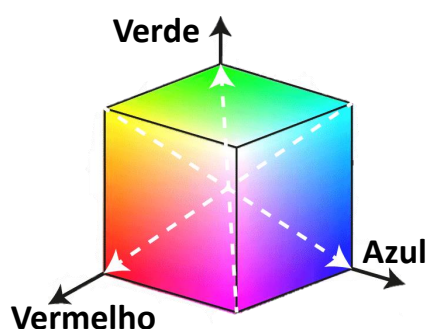
Há também o efeito mecânico do meio, que é o cisalhamento da graxa. Este afeta a graxa, pois danifica o espessante, o que pode compactar a fibra e dispersar o óleo (SALOMONSSON; STANG; ZHMUD, 2007).

2.4 COR

A cor é uma característica que é utilizada uma vez que o ser humano consegue visualmente separar a qualidade de alimentos, definir o clima, entre outras diversas situações da rotina. A cor tem o poder de impressionar, expressar e de construir. Com o uso da colorimetria, é possível comparar cores e utilizar a informação para o propósito desejado (AZEVEDO; CONCI, 2003). Segundo Liu e Jing-Yu Yang (2008), pesquisado-

res apresentam algoritmos para extração das cores, textura, entre outras informações, sendo que, dentre essas, a técnica de histograma é a mais utilizada devido à simplicidade do uso. Para classificar as cores, diversos sistemas foram criados com o objetivo de correlacionar variáveis combinadas e cores. Um dos espaços de cor mais conhecido é o RGB, no qual as cores primárias são as cores aditivas vermelhas (R, do inglês *red*), verdes (G, do inglês *green*) e azuis (B, do inglês *blue*) e são separadas em um subespaço, conforme a Figura 5.

Figura 5 – Sistema de cor RGB



Fonte: adaptado de Aguirre-Pablo *et al.* (2017).

Dentre as opções do espaço RGB, há variantes com características específicas como, por exemplo, o ISO RGB, sRGB, ROMM RGB, ADOBE RGB 98, Apple RGB entre outros (SÜSTRUNK; BUCKLEY, R.; SWEN, 1999). Já no espaço de cor CIE-LAB, que é padronizado pela Comissão Internacional de Iluminação, há um sistema cartesiano no qual os valores para claro e escuro são representados pela variável L , o vermelho pela variável $+a$, o verde pela variável $-a$, o amarelo pela variável $+b$, o azul pela variável $-b$ e o diagrama espacial é representado conforme a Figura 6 (LY *et al.*, 2020).

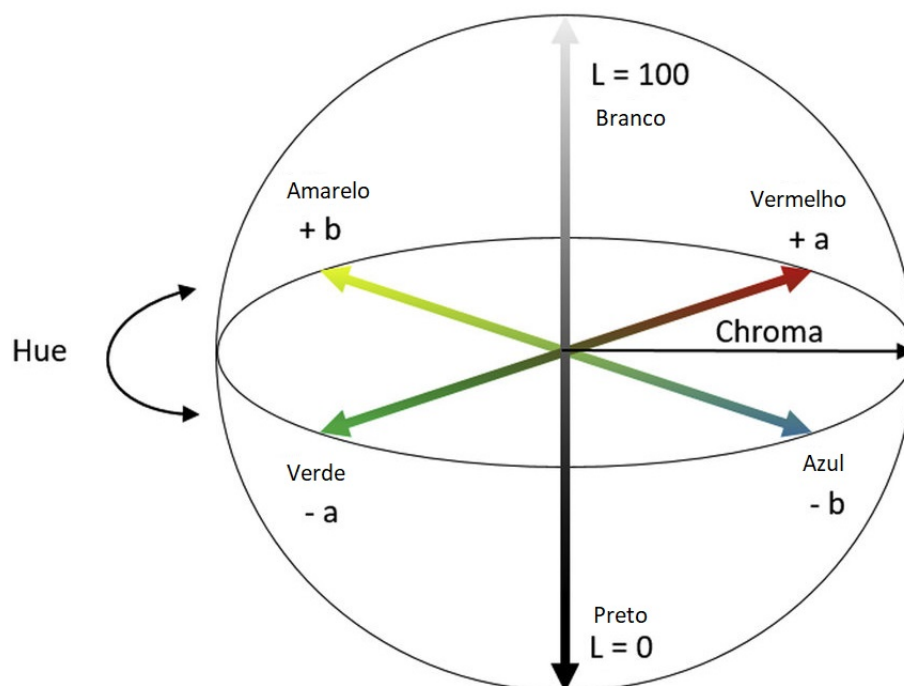
Pelo fato deste espaço possuir intensidade desacoplada da cromaticidade e mudanças de tonalidades lineares, é possível calcular a diferença entre cores utilizando a Equação (6) (PHUANGSAIJAI; JAKMUNEE; KITTIWACHANA, 2021).

$$\Delta E = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} \quad (6)$$

em que Δ é a diferença entre cores, L_1 é o valor L da referência, a_1 é o valor a da referência, b_1 é o valor b da referência, L_2 é o valor L da amostra, a_2 é o valor a da amostra, b_2 é o valor b da amostra (EQUAÇÕES... , 2022). Com os valores obtidos de ΔE é possível definir se a diferença de cores é significativa ou não, conforme a 4.

Há diversos outros espaços de cor como *Munsell Color SystPem*, XYZ, HSV, HUE, CIELUV, entre outros que utilizam outros parâmetros para quantificar os elementos de cores definidos (AZEVEDO; CONCI, 2003). Sabendo das variações entre

Figura 6 – Sistema de cor CIELAB



Fonte: adaptado de Ly *et al.* (2020).

Tabela 4 – Tabela com as descrições de cada faixa de diferença de cor

Faixa de cor	Descrição
Entre 0 e 1	O observador não nota a diferença
Entre 1 e 2	Apenas observadores experientes conseguem notar a diferença
Entre 2 e 3,5	Um observador inexperiente pode notar a diferença
Entre 3,5 e 5	Há uma diferença clara entre as cores
Maior que 5	O observador nota que são cores diferentes

Fonte: adaptado de Mokrzycki e Tatol (2011).

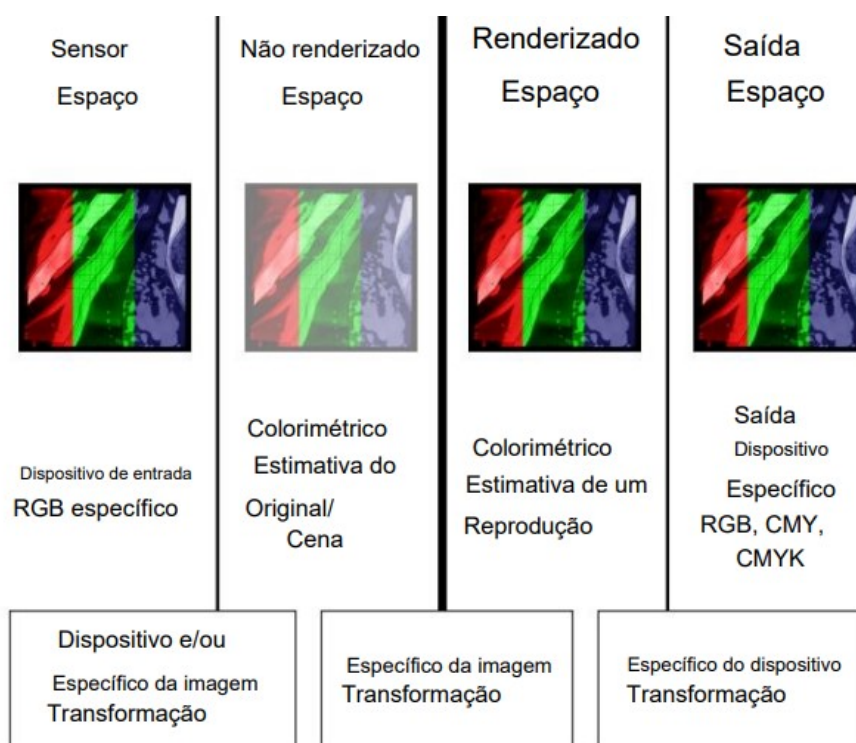
métodos, Paula Filho e Tusset (2009) combinaram as características de algumas variáveis do RGB, HSV, CIELUV e XYZ para conseguir diferenciar cores de algumas espécies de árvores em uma floresta. O uso da cor, além de simples, permitiu uma boa delimitação entre espécies florestais.

Já Esteller e Lannes (2005) utilizaram o espaço de cor CIELAB para classificar características de panificação, o que demonstra a diversidade de aplicabilidade de cores em tratamentos de imagens. Outras estratégias são os usos de colorímetros que utilizam filtros de cores para detectar a influência de cada cor e o uso de espectrofotômetro que utiliza um monocromador para avaliar os espectros da luz em comprimentos de ondas conhecidos (LY *et al.*, 2020). Além do uso de hardwares específicos, há softwares como o LabVIEW *Vision Development Module*, que permitem a utilização de filtros para cores, combinações de filtros, operações matemáticas e tratamento de

histogramas para implementar o tratamento de imagens (IMAGE... , 2022).

Com os diversos tipos de sensores e dispositivos de registro de imagens, algumas complicações surgiram no processo de demonstração da cor. Isso porque há dispositivos que adquirem imagens com cores específicas e a variação de características e de tecnologias possibilita com que diferentes dispositivos reproduzam cores de formas diferentes. Para resolver esse problema, há a necessidade de um gerenciamento de cores, visto que há o espaço de conexão entre perfis de cor que convertem a imagem do dispositivo de entrada em saída. O Consórcio Internacional da Cor (ICC) especifica o CIELAB ou o CIE XYZ (HOLDSCHIP; MARAR, 2007). A Figura 7 demonstra como o fluxo da conversão ocorre com um objetivo de acabamento colorimétrico. No caso do colorimétrico, há uma aproximação de cores que estão fora do espaço de cor do destino (HOLDSCHIP; MARAR, 2007).

Figura 7 – Exemplo do fluxo de conversão de cor com objetivo de acabamento colorimétrico



Fonte: adaptado de Sússtrunk, Robert Buckley e Swen (1999).

Além da variação entre a entrada e a saída, há as variações entre os sensores com especificações similares. Estes podem possuir sensibilidades espectrais distintas, dados de linearização diferentes e alterações na captura de iluminação que geram um espaço RGB com origem despadronizado (SÛSSTRUNK; BUCKLEY, R.; SWEN, 1999). O não conhecimento de qual sensor que será utilizado e qual espaço de cor

resulta em modelos de cores diferentes, fatores importantes nos estudos de cores (PHUANGSAIJAI; JAKMUNEE; KITTIWACHANA, 2021).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados desenvolvimento do aparato experimental e as etapas dos ensaios.

3.1 MATERIAIS

Para adquirir imagens, utilizaram-se câmeras digitais que capturassem imagens coloridas, com baixo custo e leves para permitir que fossem embarcadas em um motor. Como resultado definiu-se o uso da câmera WC045, conforme a Figura 8.

Figura 8 – Câmera WC045 utilizada para captura de imagens coloridas



Fonte: próprio autor.

Esta possui especificação definida na Tabela 5. Esse modelo permite a alteração das variáveis de brilho, gamma, saturação, contraste e hue por software, sendo que as outras variáveis são ajustadas automaticamente pelo hardware da câmera.

Tabela 5 – Informações da especificação técnica da câmera WC045

Informação	Descrição
Marca	Multilaser
Modelo	WC045
Peso do produto	85 g
Conexão	USB
Tipo de foco	manual
Resolução de imagem	16 Megapixel
Campo de visão	95°

Fonte: adaptado de Webcam [...] [s.d.].

O sensor Hall utilizado para identificar o nível de contaminantes foi o modelo DVR5055A1 com as características descritas na Tabela 6.

Tabela 6 – Informações da especificação técnica do sensor Hall DVR5055A1

Informação	Mínimo	Máximo
Faixa de medição	-21 mT	+21 mT
Tensão de alimentação	-4,5 V	+5,5 V
Tensão de saída	-0,3 V	Tensão de alimentação + 0,3 V
Temperatura de operação	-40 °C	+125 °C

Fonte: adaptado de DVR5055[...] (2021).

O ímã permanente utilizado foi um modelo comercial com as especificações descritas na Tabela 7.

Tabela 7 – Informações do ímã permanente utilizado nos experimentos

Informação	Descrição
Formato	Disco
Diâmetro	8 mm
Altura	3 mm
Força de tração vertical	1100 g
Campo magnético na distância de 0 mm	3630 G
Grade Magnética	N35

Fonte: adaptado de Ficha [...] (2023).

A tensão de saída gerada pelo sensor Hall foi adquirida por um módulo de aquisição de sinais NI-9239 com especificações descritas na Tabela 8

3.2 MÉTODOS

Essa seção tem como objetivo apresentar as principais atividades realizadas no presente trabalho. Para a qualificação de graxa com o uso da cor separaram-se as

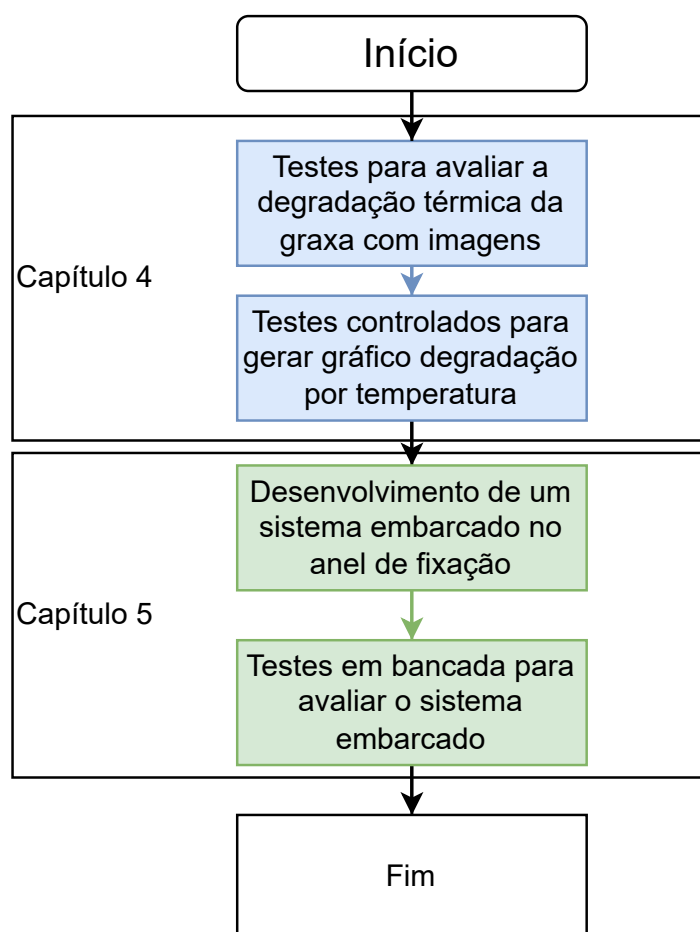
Tabela 8 – Informações da placa de aquisição de sinais de tensão

Informação	Mínimo
Resolução	24 bits
Faixa de tensão adquirida	10,0 V
Taxa de aquisição de sinais	51,2 kHz
Número de canais de entrada de sinais	4

Fonte: adaptado de NI-9239[...] (2023).

etapas em um fluxograma demonstrado na Figura 9.

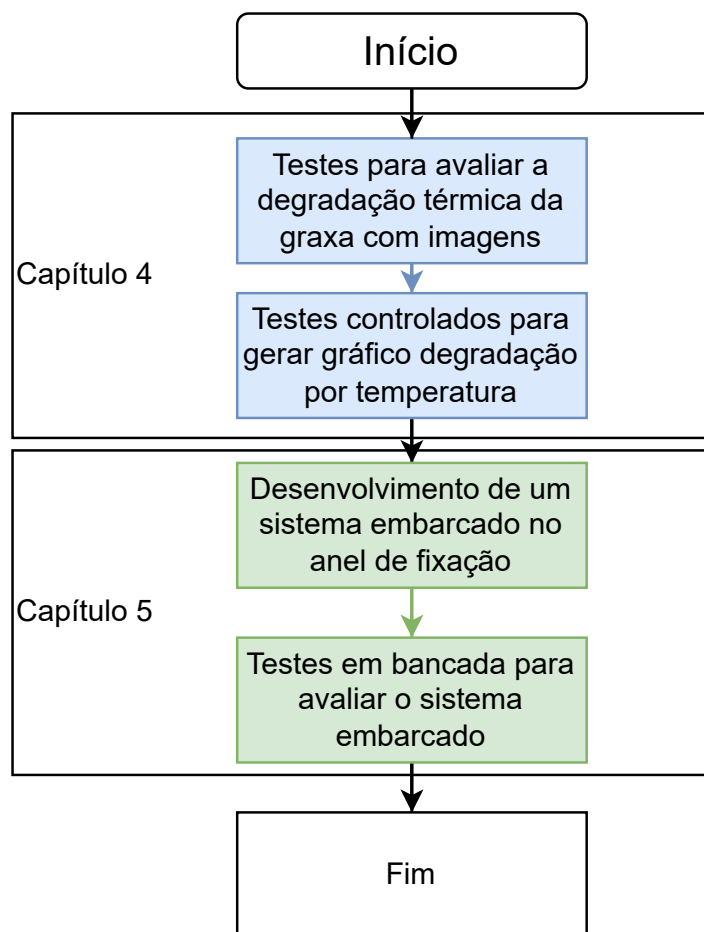
Figura 9 – Conceito da bancada que será utilizada para validar o experimento em condições de mancalização semelhantes a um motor elétrico



Fonte: próprio autor.

Para a qualificação da graxa contaminada com partículas metálicas, separaram-se as etapas em um fluxograma demonstrado na Figura 10.

Figura 10 – Conceito da bancada que será utilizada para validar o experimento em condições de mancalização semelhantes a um motor elétrico



Fonte: próprio autor.

4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

Este capítulo tem por objetivo apresentar as avaliações experimentais executadas para desenvolver o método de qualificação de graxa. Os critérios utilizados para a definição da graxa utilizada nos ensaios são apresentados na Seção 4.1. Os ensaios para quantificar os contaminantes metálicos são apresentados na Seção 4.2. Na Seção 4.3, é descrita a proposta de envelhecimento térmico da graxa com o objetivo de efetuar uma avaliação qualitativa da graxa. Por fim, as considerações finais são apresentadas na Seção 4.4.

4.1 ESCOLHA DA GRAXA

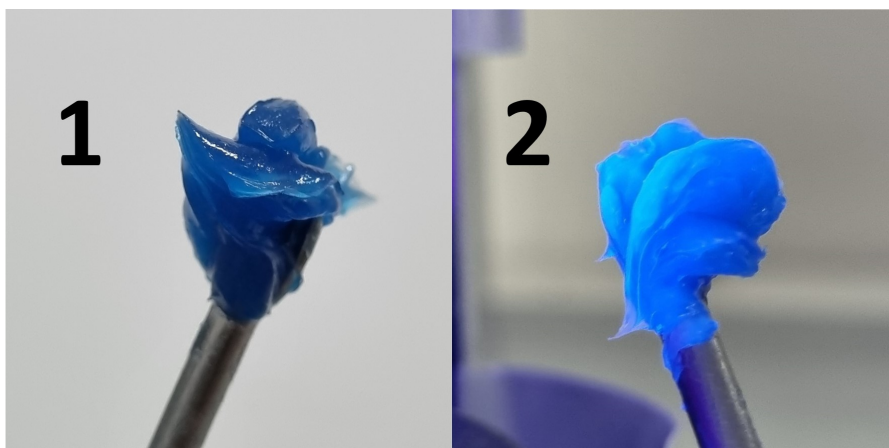
Para desenvolver um sistema de qualificação, avaliou-se a disponibilidade de diferentes graxas para o ensaio, bem como as características de cada uma. Dentre as graxas disponíveis, foram descartadas aquelas com grafite, com espessante de sabão de lítio na cor branca e com politetrafluoretileno (PTFE). As características opacas desses lubrificantes inviabilizariam o seu uso no experimento por necessitarem de uma potência elevada de iluminação e uma distância pequena entre a lente da câmera e a fonte de iluminação. Avaliou-se, também, uma graxa com espessante sintético e coloração vermelha, mas devido ao grau NLGI elevado, forças de grande magnitude eram necessárias para gerar a movimentação da mesma no aparato de ensaio, o que também inviabilizaria o seu uso no experimento em bancada proposto no Capítulo 5. Por fim, utilizou-se uma graxa de poliureia com grau NLGI entre 2 e 3, que atendeu os requisitos desejáveis. Essa graxa possui uma coloração azul e translúcida, conforme a foto apresentada na Figura 11.

Além de essa graxa atender aos requisitos, ela possui um alto volume de utilização em motores industriais, o que contribui para a aplicabilidade dos conceitos desenvolvidos neste trabalho em futuros projetos de desenvolvimento industrial. Outro atributo identificado nela foi a fluorescência, conforme ilustrado na Figura 11, na qual a graxa é iluminada por uma lâmpada de ultravioleta A. Essa característica foi identificada durante um experimento executado em bancada para validar o comportamento de cada graxa em relação à variação do espectro e da potência de iluminação.

4.2 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA PROPOSTO PARA QUALIFICAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DE GRAXA POR PARTÍCULAS

As contaminações de lubrificantes foram avaliadas em diversos estudos, com a finalidade de definir o tipo de contaminante, a quantidade de partículas ou o tamanho delas. Esta Seção tem o propósito de relatar os experimentos realizados para identificar a influência de uma quantidade de partículas metálicas e a densidade do

Figura 11 – Graxa de poliureia: [1] graxa nova com luz branca ; [2] graxa nova com iluminação de luz ultravioleta A



Fonte: próprio autor.

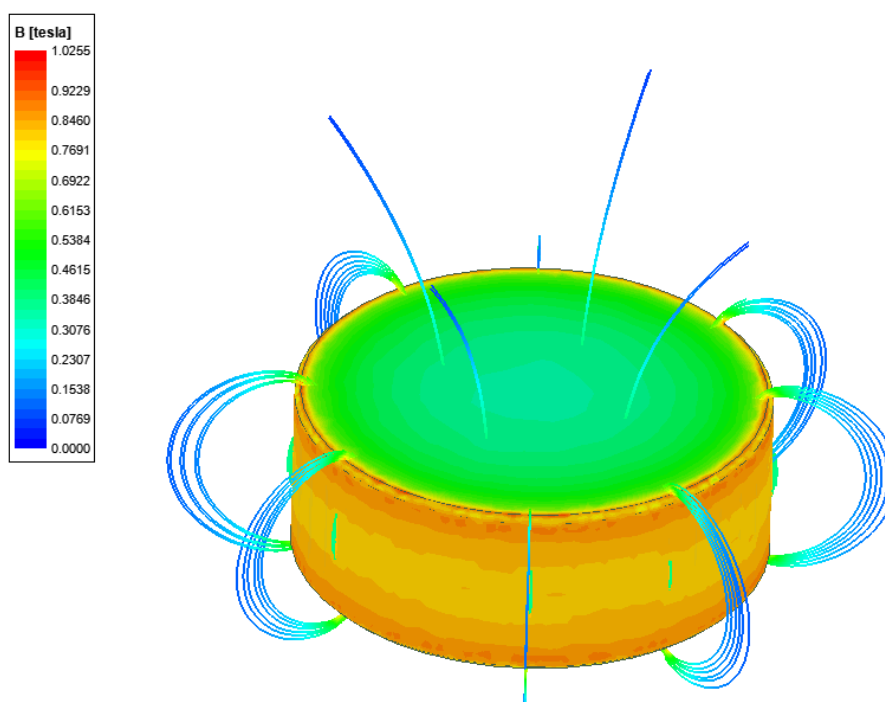
fluxo magnético medida com um sensor Hall. O resultado desta etapa foi aplicado para definir os elementos empregados em uma bancada que possui uma mancalização similar àquela empregada em um motor elétrico. Para implementar esse conceito em uma bancada, e idealizando a implementação embarcada deste sensor em um produto, será especificado um sensor Hall de baixo custo. Este será posicionado em frente a um ímã permanente e entre eles será feita a qualificação de contaminação por partículas metálicas.

A primeira etapa foi a descoberta da resolução necessária para um sistema de medição conseguir discretizar uma quantidade conhecida de partículas em uma distância definida. Para isso, preparou-se um experimento com ímãs permanentes de neodímio ferro boro (NdFeB) em formato de disco, com diâmetro de 8 mm e espessura de 3 mm. Para definir a posição do sensor Hall, utilizou-se a simulação do ímã da Figura 12 para avaliar a região de concentração do campo magnético. A partir da avaliação, escolheu-se o centro do diâmetro como referência de centralização dos sensores Hall devido à baixa variação observada nessa região.

Para garantir que o fenômeno físico avaliado apresente um comportamento similar ao encontrado em um rolamento, foram utilizados fragmentos do mesmo material empregado na pista externa do rolamento 6314 da fabricante SKF. Para preparar a amostra, inicialmente usinou-se a pista externa com fresa de metal duro para retirada de cavacos pequenos. Com o cavaco separado, utilizou-se um almofariz com pistilo para triturar as partículas, conforme ilustrado na Figura 13, e obteve-se um pó fino que foi utilizado para todos os experimentos.

Para medir a densidade do fluxo magnético no experimento, utilizou-se um gaussímetro modelo MAGNET-PHYSIK FH 51 com uma ponta de prova com sensor Hall mo-

Figura 12 – Simulação do ímã com um software para identificar o comportamento do fluxo magnético



Fonte: próprio autor.

delo MAGNET-PHYSIK FH 54. Esses foram fixados em um protótipo impresso em três dimensões em ácido polilático (PLA), conforme ilustrado na Figura 14, e neste utilizou-se um recipiente também impresso com capacidade para um volume de 251,2 mm³ de graxa.

Para entender qual é a faixa de medição e o efeito na densidade do fluxo magnético de uma quantidade conhecida de contaminantes, foram inseridos quatro volumes conhecidos de contaminantes no recipiente com graxa. Com esses valores conhecidos, mediu-se em cada inserção o valor de densidade do fluxo magnético obtido com o gaussímetro e os resultados são apresentados na Figura 15, que demonstram um comportamento linear da densidade do fluxo magnético em relação ao percentual de contaminantes da amostra.

Em outro experimento, fixou-se o sensor em um traçador de altura para conseguir avaliar a densidade do fluxo magnético em distâncias conhecidas. Com as duas informações juntas, foi possível escolher um sensor adequado para os experimentos. Os ensaios foram feitos em sete distâncias e, em todos os casos, posicionou-se a ponta de prova centralizando o sensor com o ímã permanente. As distâncias avaliadas vão de 2 mm a 14 mm, com intervalos de 2 mm. Esse intervalo foi definido para conhecer o comportamento entre a ponta de prova com o sensor Hall e o ímã permanente. Foram avaliadas duas amostras de ímãs e verificou-se que o comportamento é similar

Figura 13 – Preparo das partículas metálicas

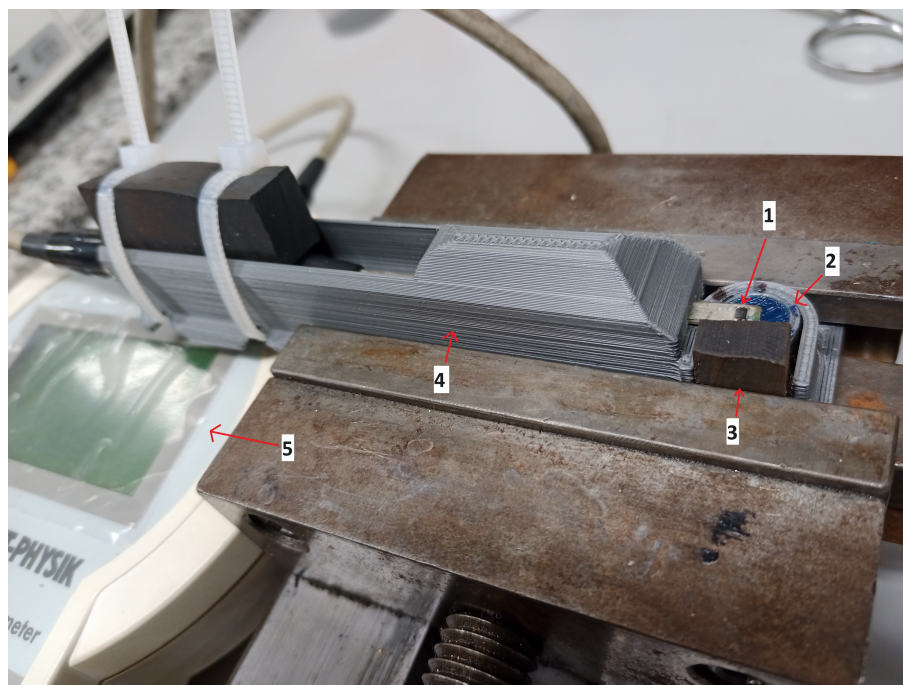


Fonte: próprio autor.

entre elas, conforme os dados plotados na Figura 16.

Para comparar o que foi medido em relação com o que era esperado, utilizaram-se os valores de campo magnético fornecidos pelo fabricante (FICHA. . . , 2023). Esperava-se o valor de especificação de 202 mT na distância de 2 mm, mas os valores medidos estavam abaixo do especificado. Devido ao fato do fornecedor não apresentar um relatório que especificasse os detalhes da origem da informação, optou-se por avaliar algumas amostras e compará-las em relação ao esperado, com objetivo de entender se havia alguma variação significativa entre as amostras no lote de ímãs disponíveis. Para comparar os ímãs permanentes executou-se um experimento para identificar a

Figura 14 – Dispositivo para o ensaio inicial com partículas: [1] ponta de prova com o sensor Hall; [2] volume impresso com ímã permanente e graxa; [3] borracha para fixação do volume impresso; [4] dispositivo para fixação do volume e ponta de prova; [5] gaussímetro



Fonte: próprio autor.

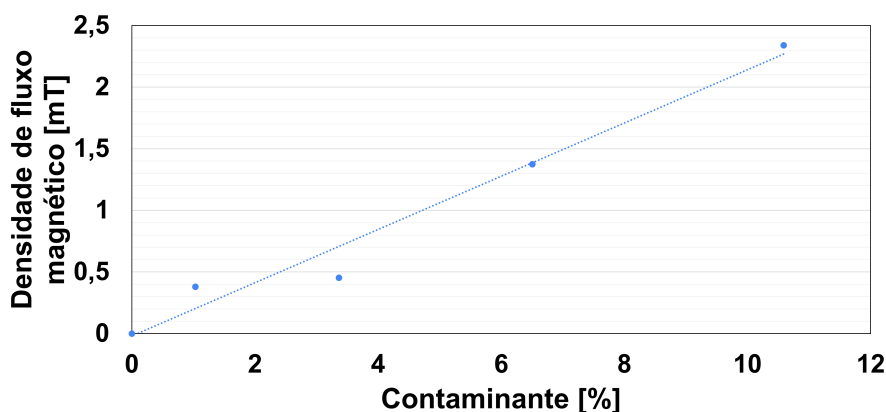
indução remanente com o uso de um fluxímetro EF-14 e da bobina de Helmholtz MS-210 da MAGNET-PHYSIK. Com a indução remanente é possível calcular a densidade do fluxo magnético para uma distância conhecida. A média encontrada do lote de ímãs permanentes foi de 1,05 mT, sendo que o valor máximo medido foi de 1,08 mT e o valor mínimo foi de 0,97 mT. Utilizando a Equação (7) (MAGNETICS, 2017)

$$B(X) = \frac{B_r}{2} \left[\frac{L + X}{\sqrt{R^2 + (L + X)^2}} - \frac{X}{\sqrt{R^2 + X^2}} \right], \quad (7)$$

em que B_r é a indução remanente, R é o raio, L é a espessura e X é a distância entre o ponto medido e o ímã permanente, calcularam-se os valores para as mesmas distâncias empregadas anteriormente, de 0 mm, 2 mm e 8 mm. Essas foram comparadas em relação à medição obtida na Figura 16. A variação entre o valor medido e o valor calculado chega a ser superior a 30% em alguns pontos, mas a curva possui uma similaridade de forma em relação aos dados experimentais, o que auxilia nas estimativas de densidade do fluxo magnético em relação a uma distância conhecida, conforme a Tabela 9.

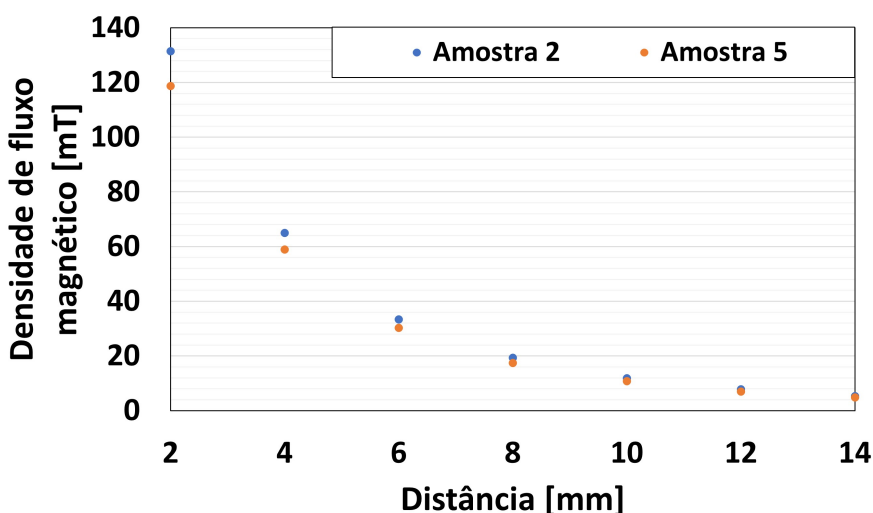
Com base nos valores obtidos, pode-se inferir que a melhor distância para ser empregada para medição é próxima de 2 mm, por possuir a maior variação de densi-

Figura 15 – Relação entre contaminante e densidade do fluxo magnético



Fonte: próprio autor.

Figura 16 – Experimento comparando distância e densidade do fluxo magnético



Fonte: próprio autor.

dade do fluxo magnético por distância. Entretanto, a escolha desse valor inviabilizaria a proposta de utilização de uma peça impressa para fixação dos elementos, pois o orifício seria muito pequeno para expulsão de graxa e a pressão interna danificaria a peça. Com base no resultado obtido, optou-se pela escolha de um sensor de efeito Hall linear radiométrico modelo Texas Instruments DRV5055A1. Esse sensor possui faixa de medição de 21 mT, o que exige o emprego de distâncias maiores ou iguais a 8 mm entre o ímã permanente e o sensor, para que a saída não sature.

Para a segunda etapa, utilizou-se o sensor definido para o estudo da estabilidade térmica com objetivo de garantir que a influência da temperatura não seria superior à influência de contaminantes metálicos. É sabido que o ímã permanente

Tabela 9 – Comparativo entre a densidade do fluxo magnético informada pelo fornecedor, calculado com o valor de indução remanente, e o valor medido

[Origem do valor]	Distância:0 mm [mT]	Distância:2 mm [mT]	Distância:8 mm [mT]
Fabricante	363,0	202,0	27,4
Medido ímã 2	-	131,4	19,3
Cálculado ímã 2	323,5	179,9	24,5
Medido ímã 5	-	118,7	17,4
Cálculado ímã 5	291,1	161,9	22,0

Fonte: próprio autor.

sofre variação do campo magnético e que o sensor possui um aumento na incerteza de medição com a variação de temperatura. Para o ensaio de estabilidade térmica, utilizou-se uma estufa comercial e montou-se uma placa de circuito impresso com três unidades do sensor escolhido e três ímãs permanentes. Nessa montagem, cada um dos ímãs permanentes ficou montado de frente para um sensor Hall a uma distância de aproximadamente 10 mm. Utilizou-se a placa de circuito impresso pela facilidade em brasar os sensores e garantir que todos usem a mesma fonte de alimentação. O circuito montado do sistema de medição ficou projetado para atender os requisitos do fabricante do sensor. Nessa montagem, utilizou-se uma placa intermediária com capacitores de desacoplamento de 10 nF com o propósito de fornecer energia local com a menor indutância possível. Os valores de saída dos transdutores foram adquiridos com uma placa de aquisição de tensão NI-9239. Para esse experimento, foram empregadas as temperaturas de 30 °C, 50 °C e 70 °C. Escolheu-se a temperatura mínima de 30 °C devido à dificuldade em se controlar a temperatura em um ambiente sem aquecimento. Adicionalmente, foram preparados dois envelopes com níveis de contaminantes com uma quantidade de massa não controlada que foram inseridos entre o sensor e o ímã, sendo que o nível 1 possuía uma quantidade inferior de contaminantes em relação ao nível 2. O resultado obtido nessa análise inicial é que a temperatura afeta as medições, porém a variação gerada pela inclusão de contaminantes é superior à variação gerada pela temperatura, conforme o aumento percentual apresentado na Tabela 10. Para obter esses valores, utilizou-se condição do conjunto limpo na temperatura de 30 °C como referência. Com os conjuntos limpos, há uma variação mínima entre a temperatura de referência e a temperatura de 50 °C. Na temperatura de 70 °C, há um aumento expressivo mas é menor do que o valor gerado pela inserção de contaminantes. Com a aplicação de contaminantes, percebe-se um efeito inverso ao observado para o sensor limpo, ou seja, ocorre uma redução na densidade do fluxo magnético medida com o aumento de temperatura.

Tabela 10 – Variação percentual da tensão adquirida do sensor Hall em condições diferentes de ensaio

Sensor + ímã permanente	Temperatura:30 °C [%]	Temperatura:50 °C [%]	Temperatura:70 °C [%]
Conjunto 1 Limpo	Referência 1	0,14	0,69
Conjunto 1 Nível 1	2,11	1,68	1,48
Conjunto 1 Nível 2	4,45	3,99	3,70
Conjunto 2 Limpo	Referência 2	0,03	0,68
Conjunto 2 Nível 1	1,84	1,52	1,54
Conjunto 2 Nível 2	2,22	1,85	1,64
Conjunto 3 Limpo	Referência 3	0,01	0,59
Conjunto 3 Nível 1	1,73	1,42	1,34
Conjunto 3 Nível 2	2,05	1,68	1,43

Fonte: próprio autor.

4.3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE QUALIFICAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE GRAXA POR TEMPERATURA

Com o objetivo de desenvolver um sistema de qualificação de degradação térmica de graxa com o uso de cores, compacto e de baixo custo, que possa ser incorporado a rolamentos de motores elétricos, iniciou-se o estudo avaliando a alteração da coloração da graxa durante a degradação térmica. Considerou-se a proposta de um sistema de baixo custo para o trabalho visando a implementação em um produto.

Para a primeira proposta, utilizou-se o sensor de cor TCS230 com aquisição realizada por uma placa de desenvolvimento Arduino UNO. Porém, identificou-se a falta de repetibilidade dos resultados em testes de bancada utilizando padrões de cores impressos. O problema de repetibilidade foi observado mesmo em leituras consecutivas sem alteração do ambiente, que também apresentaram variações consideráveis.

Para a segunda proposta, utilizou-se uma câmera Multilaser WC045, que é um modelo de câmera de baixo custo, compacta e leve, logo não requer uma estrutura de fixação que suporte massas elevadas. Além disso, o hardware permite uma fácil integração com um computador, por se tratar de um dispositivo *plug and play* e possuir compatibilidade com o ambiente de programação LabVIEW. Outro benefício da utilização desse modelo de câmera é a lente com ajuste manual, que permite alterar a distância focal e, por conseguinte, adiciona flexibilidade à montagem que envolve a câmera e o objeto do qual se deseja adquirir a imagem. É sabido que, além de baixa resolução, uma câmera acessível pode apresentar menor gama de cores e recursos limitados, logo desenvolveram-se alguns experimentos com condições contorno controlada para testar a câmera e o efeito da degradação da graxa.

De modo a obter um bom aproveitamento da resolução disponível na câmera sem gerar risco de dano ao equipamento devido ao aumento de temperatura ou con-

tato da lente com o lubrificante, foi realizada uma avaliação de viabilidade para definir a melhor maneira de adquirir as imagens da graxa. Para esse modelo de câmera, não há lentes intercambiáveis ou qualquer tipo de prolongador óptico, então avaliou-se a possibilidade de utilização de fibra óptica ou um bastão de vidro. Para o primeiro ensaio em bancada, a fibra óptica apresentou um desempenho satisfatório com a comparação visual da cor adquirida pela câmera e da cor utilizada como referência. Nesse ensaio utilizou-se o modelo FRR4-6G4L-G WEG, que possui característica construtiva difuso coaxial, ou seja, composta por uma fibra central e outras fibras menores em volta dessa fibra central, o que permite utilizar a iluminação nas fibras externas e aquisição de imagens na fibra interna. No entanto, no segundo ensaio, ao posicionar a fibra em contato com a graxa e aplicar um aumento de temperatura, verificou-se incompatibilidade química entre as partes, resultando na degradação da fibra, o que inviabilizou o seu uso para esse propósito. Como alternativa executou-se os mesmos experimentos com um bastão de vidro maciço de borossilicato com 8 mm de diâmetro utilizado em laboratórios de química. O bastão foi adaptado artesanalmente para virar uma lente. Para garantir uma característica translúcida e sem grandes deformações visíveis, executou-se um preparo das faces e um polimento em cada face com pasta diamantada, conforme a Figura 17. Os resultados foram satisfatórios em ambos os ensaios e não houve incompatibilidade química com a graxa, o que viabilizou a continuidade dos ensaios utilizando o bastão de vidro adaptado como lente.

Para validação do experimento, foram desenvolvidos protótipos com o objetivo de fixar a câmera com a lente e, após esse processo, fixá-los em componentes similares aos de um motor elétrico. Optou-se pela utilização de protótipos impressos em PLA devido à facilidade no desenvolvimento e baixo custo. Essa opção permitiu o desenvolvimento rápido de componentes com baixa massa e sem risco de dano ao sistema de medição. Todos os protótipos foram impressos em uma impressora 3D Ender 3 Pro.

4.3.1 Sistema com envelhecimento térmico

Para conhecer o comportamento da degradação da graxa em um período elevado, desenvolveu-se um experimento com um invólucro metálico com o aquecimento controlado, conforme mostra a Figura 18. Para controle térmico desse sistema, utilizou-se um controlador Novus N1100 e, paralelamente, utilizou-se um software desenvolvido em LabVIEW para aquisição de imagens e monitoramento de temperatura com o módulo de aquisição de temperatura Yokogawa MV1000.

Com o objetivo de identificar as alterações de coloração da graxa em um período de tempo, fixou-se a temperatura em 110 °C por duas semanas. A iluminação do sistema era composta por dois LEDs de 1 W, sendo que um deles possuía a coloração branca, com cor dada em escala de temperatura de aproximadamente 4000 K, e o

Figura 17 – Polimento do bastão de vidro para que ele possa ser empregado como uma lente

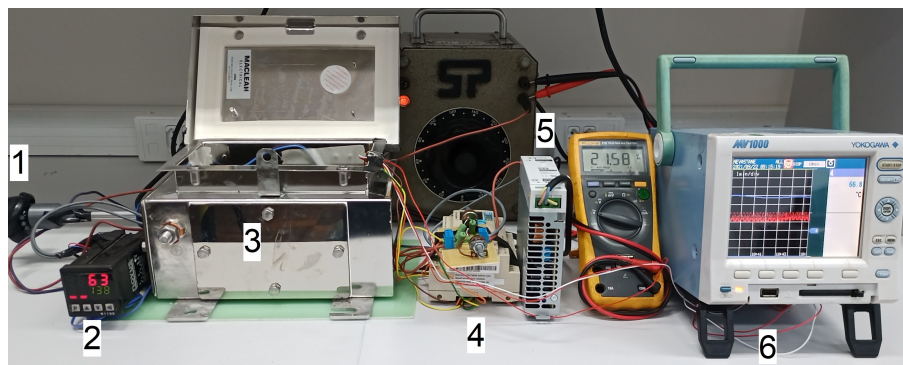


Fonte: próprio autor.

outro atendia o espectro ultravioleta, com comprimento de onda de 425 nm. Utilizou-se um LED com o espectro ultravioleta para identificar se a fluorescência da graxa de poliureia atenderia os requisitos necessários para qualificar a degradação térmica. A aquisição de imagens foi feita de maneira alternada, sendo que um controlador lógico programável modelo CLIC02 alternou a fonte de alimentação de cada LED e o software adquiria a imagem após o tempo de assentamento da condição de iluminação. Ao verificar os resultados obtidos, constatou-se que, após três dias, a fluorescência desaparece, porém a coloração da graxa no espectro visível não é significativamente alterada, conforme mostra a Figura 19. Apesar de a alteração no espectro ultravioleta (UV) estar associada com o uso da graxa, a temperatura do ensaio foi mantida dentro da faixa de uso especificada pelo fabricante da graxa, logo a perda da fluorescência não representa a degradação da graxa e não pode ser usada como indicativo de degradação.

Com os resultados obtidos no ensaio descrito anteriormente, optou-se pelo uso do LED de coloração branca e desenvolveu-se um novo experimento, com o objetivo

Figura 18 – Bancada de ensaios de degradação térmica para avaliação inicial: [1] câmera com adaptação e lente protótipo; [2] controlador de temperatura da estrutura; [3] estrutura metálica com um resistor de aquecimento; [4] controlador de chaveamento de iluminação com temporização; [5] variador de tensão para os resistores; [6] sistema de monitoramento e registro de temperatura



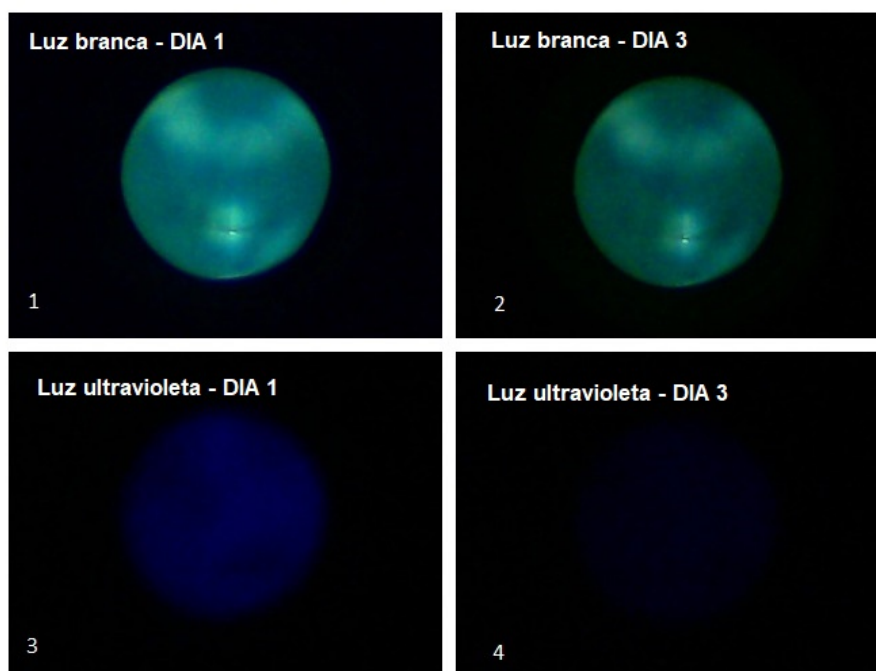
Fonte: próprio autor.

de implementar as lições aprendidas. Para esse ensaio, definiu-se o tempo fixo de sete dias para a aquisição de imagens, pois identificou-se comportamento estável após esse período, ou seja, não ocorre uma variação significativa na degradação com temperatura depois de passado esse período. Para o aquecimento utilizou-se uma estufa comercial para garantir a repetibilidade do processo, pois o primeiro conceito não apresentou uma isolamento térmica adequada. Para o tratamento de imagens, utilizou-se um algoritmo de qualificação desenvolvido e validado no conceito anterior. Esse algoritmo foi desenvolvido com o objetivo de dispensar o uso de técnicas para identificar geometrias das lentes, reduzir significativamente a interferência de erros aleatórios gerados pela câmera e reduzir o efeito de bolhas e bordas. Um desses erros aleatórios foi identificado em imagens consecutivas em um curto espaço de tempo e sem condições de ensaio que justificassem a alteração de coloração da imagem, conforme ilustra a sequência de imagens apresentada na Figura 20.

Para o desenvolvimento desse algoritmo, testou-se a combinação de diversos filtros para extração de planos, com o uso do aplicativo *NI Vision Assistant* disponível no pacote de visão computacional do ambiente de programação LabVIEW. Ao aplicar um filtro de extração de plano em uma imagem colorida com 24 bits, há como saída uma imagem em uma escala de cinza com 8 bits, conforme o exemplo da Figura 21.

Com a extração de um plano, converteu-se a imagem em uma matriz com valores na escala de 8 bits. Para a conversão de um plano da imagem em um valor

Figura 19 – Comparativo entre imagens adquiridas durante dois períodos do experimento: [1] e [3] imagens da graxa com a luz branca e luz negra, respectivamente, no início do experimento; [2] e [4] Imagens da graxa com a luz branca e luz negra, respectivamente, no final do experimento com a temperatura de 110 °C



Fonte: próprio autor.

Figura 20 – Exemplo de variação gerada pela mesma câmera demonstrada por meio de imagens de uma amostra de graxa adquiridas a cada dois minutos sem nenhum efeito externo ou alteração por conta do ambiente



Fonte: próprio autor.

unitário, aplicou-se a Equação (8):

$$V = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m (255 - a(ij)), \quad (8)$$

em que V é o valor unitário, i é a posição da linha na matriz, n é a quantidade de linhas da matriz, j é a posição da coluna na matriz, m é a quantidade de colunas na matriz e $a(ij)$ representa cada elemento da matriz na posição de linha i e coluna j . A curva de cada tratamento foi normalizada individualmente, de modo a levar o maior valor de

Figura 21 – Exemplo de extração de plano de cores vermelho, verde e azul respectivamente utilizando a biblioteca de extração de planos do software Labview



Fonte: adaptado de NI (2017).

V à unidade. A configuração que apresentou melhor resultado foi a combinação da operação de cor *Not Or* com a cor preto antes da extração do plano de luminosidade do espaço tonalidade, saturação e brilho (HSL, do inglês *hue, saturation and lightness*). O objetivo do uso da operação *Not Or* com a cor preto é reduzir a influência de bolhas e bordas, que tornam o pixel mais claro na imagem. Logo, a influência da coloração da graxa fica destacada na imagem, o que reduz o ruído. Ao utilizar a extração do plano de luminosidade, há também um efeito na variação dos valores de cada pixel, proporcional ao comportamento da degradação da graxa. Esse mesmo efeito não ocorre com a utilização de planos RGB, pois, durante a degradação térmica da graxa de poliureia, há uma transição de cores iniciada com a cor azul claro, seguida de uma coloração verde escuro, que passa por um tom de marrom até escurecer por completo. Os efeitos dessa combinação são demonstrados na Tabela 11.

Com o método definido, desenvolveu-se um aparato para que fosse possível garantir a repetibilidade do processo de aquisição de imagens dentro da estufa, sem que houvesse contato entre o LED e o ambiente interno. Para isso, prototipou-se artesanalmente uma lente curva, de forma a criar uma condição similar ao conceito aplicado na primeira proposta de bancada utilizando um bastão de vidro. Adicionalmente, desenvolveu-se um tubo externo ao vidro, o qual garante melhor repetibilidade da espessura de graxa a ser analisada. Esse sistema está apresentado na Figura 22.

Mesmo com esses procedimentos, foram constatadas pequenas variações na imagem e, por conseguinte, instalou-se um potenciômetro na alimentação elétrica do

Tabela 11 – Comparativo de filtros de extração distintos utilizando como referência a maior diferença entre imagens consecutivas de um tratamento de imagens adquiridas após a degradação térmica de 160 °C

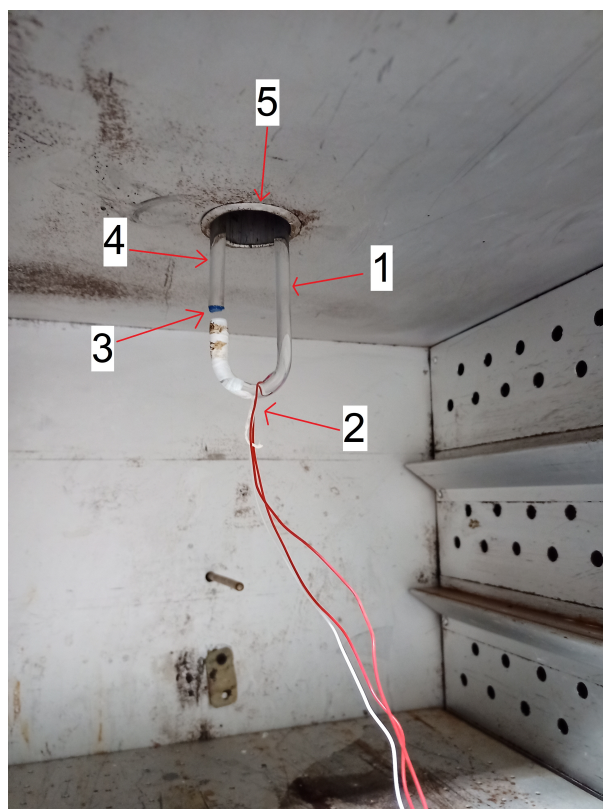
Opções de plano de extração no software	Diferença entre imagens [%]
Proposto	0,09
HSI	0,84
HSV	0,67
HUE	0,90
HSL Luminance	0,12

Fonte: próprio autor.

LED para que fosse possível efetuar ajustes na intensidade luminosa. Para que fosse possível criar uma superfície de resposta adequada ao experimento, foram executados diversos ensaios variando a temperatura de 100 °C até 160 °C, com intervalos de 10 °C. Esses dados foram tratados, normalizados e avaliados com uma variação percentual, sendo a graxa nova considerada como 100%, conforme o gráfico plotado na Figura 23. Este gráfico tem o objetivo de mostrar de maneira visual a degradação térmica das amostras em temperaturas distintas. Percebe-se que os ensaios executados acima da temperatura limite de especificação do fabricante apresentam uma alteração mais rápida de coloração, o que leva à conclusão de que, na prática, a graxa utilizada em um rolamento pode ser degradada termicamente caso ocorra um aumento repentino de temperatura, mesmo que este tenha ocorrido em um intervalo curto de tempo.

A partir dos resultados, foram identificadas curvas coerentes com os resultados adquiridos no primeiro experimento, com a bancada inicial de degradação térmica, o que reforça o potencial do método desenvolvido para o sistema de qualificação da degradação térmica de graxa de poliureia. Isso indica a possibilidade de desenvolver um sistema capaz de correlacionar a alteração da coloração da graxa com um estágio de degradação e estimar o tempo necessário para atingir um nível crítico. Para confirmar a degradação, foram realizados ensaios de tempo de oxidação induzida (OIT, do inglês *oxidation induction time*) em uma amostra de graxa nova do mesmo lote utilizado durante os experimentos e em uma amostra de graxa obtida após o ensaio proposto em 160 °C. O ensaio para determinar o OIT consiste em expor a graxa a uma atmosfera oxidativa sob elevada temperatura, sendo que o experimento é considerado concluído quando é observada uma transição exotérmica associada à oxidação da graxa. Conforme os resultados apresentados na Figura 24, é possível verificar que o tempo para a oxidação da amostra de graxa nova é de, aproximadamente, 155 min, enquanto o tempo para a oxidação da amostra de graxa degradada com o experimento proposto é de, aproximadamente, 35 min. A oxidação de uma graxa é uma função da temperatura do ensaio e dos aditivos presentes na sua composição, sendo que uma

Figura 22 – Preparo artesanal do vidro para execução do experimento dentro de uma estufa mantendo a característica de montagem do primeiro ensaio: [1] vidro curvo prototipado; [2] sensor de temperatura extra utilizado para conferir a temperatura especificada na estufa e a temperatura interna; [3] amostra de graxa na face inferior da lente; [4] lente acoplada na câmera



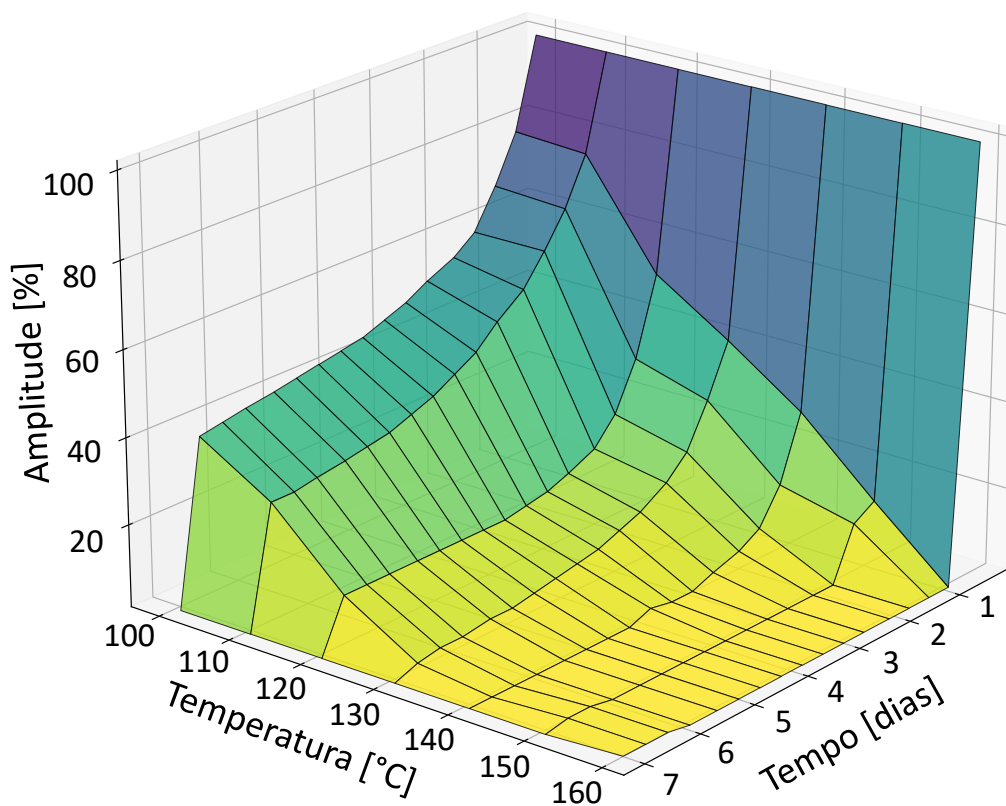
Fonte: próprio autor.

graxa previamente degradada termicamente terá um tempo para a oxidação menor do que uma graxa nova, visto que os seus aditivos já foram em parte consumidos.

Além dessas análises, foram realizadas análises de FTIR em uma amostra nova, uma amostra obtida após o ensaio de 100 °C e uma amostra obtida após o ensaio de de 160 °C. No espectro da amostra submetida a uma temperatura de 160 °C, foi evidenciado o aparecimento de uma banda na região de 1718 cm⁻¹, a qual está normalmente associada à formação de compostos de oxidação da graxa, conforme discutido na Seção 2.3.1.

Os resultados obtidos nos ensaios normalizados mostram que amostras para as quais o método proposto indicou degradação estavam mesmo degradadas. Isso mostra potencial para aplicação do método baseado em cor para caracterização do estado de degradação da graxa.

Figura 23 – Curvas de degradação no tempo com temperaturas específicas demonstrando que uma graxa nova possui o valor de amplitude de 100%

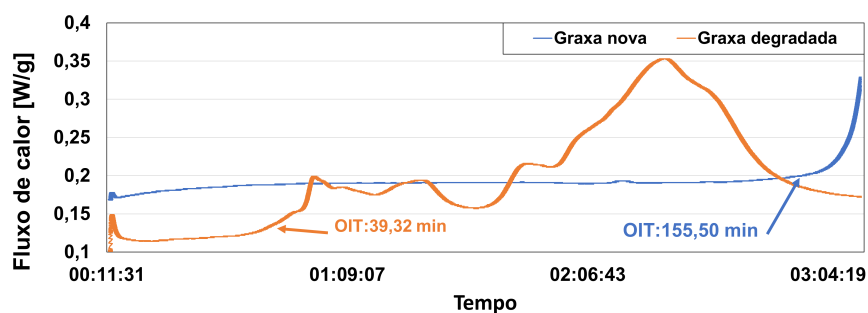


Fonte: próprio autor.

4.3.2 Padronização entre câmeras

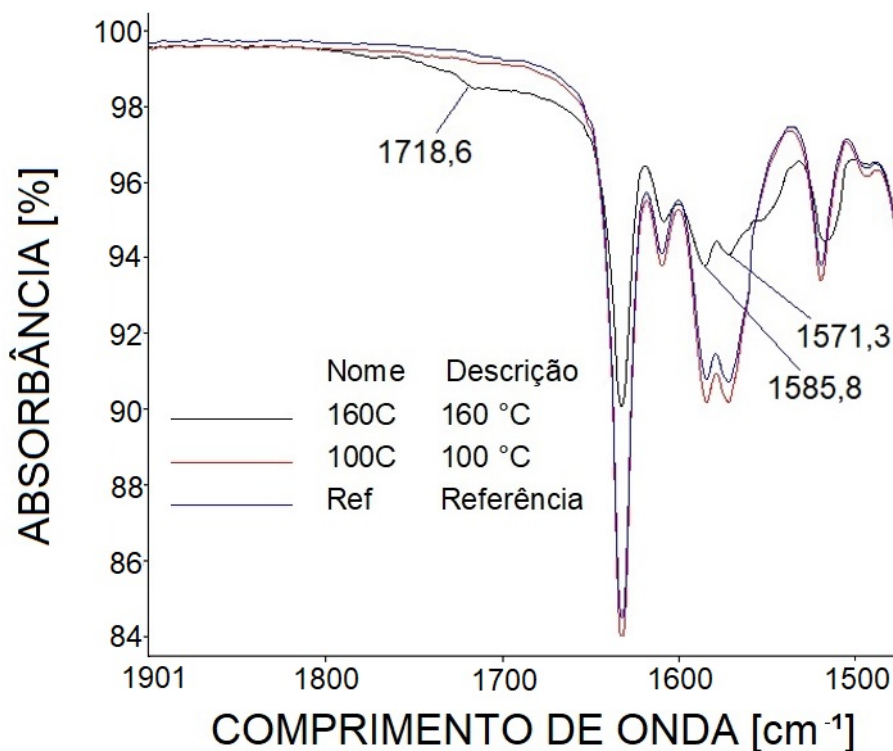
Com o processo de degradação de graxa definido e com as amostras degradadas e novas validadas como estando efetivamente nesses estados por meio do emprego de métodos utilizados em normas de avaliação de graxa, estudou-se um

Figura 24 – Ensaio de tempo de indução oxidativo com amostras de graxa nova e degradada



Fonte: próprio autor.

Figura 25 – Ensaio de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier com amostras de graxa nova, operada em uma condição de degradação lenta e degradada



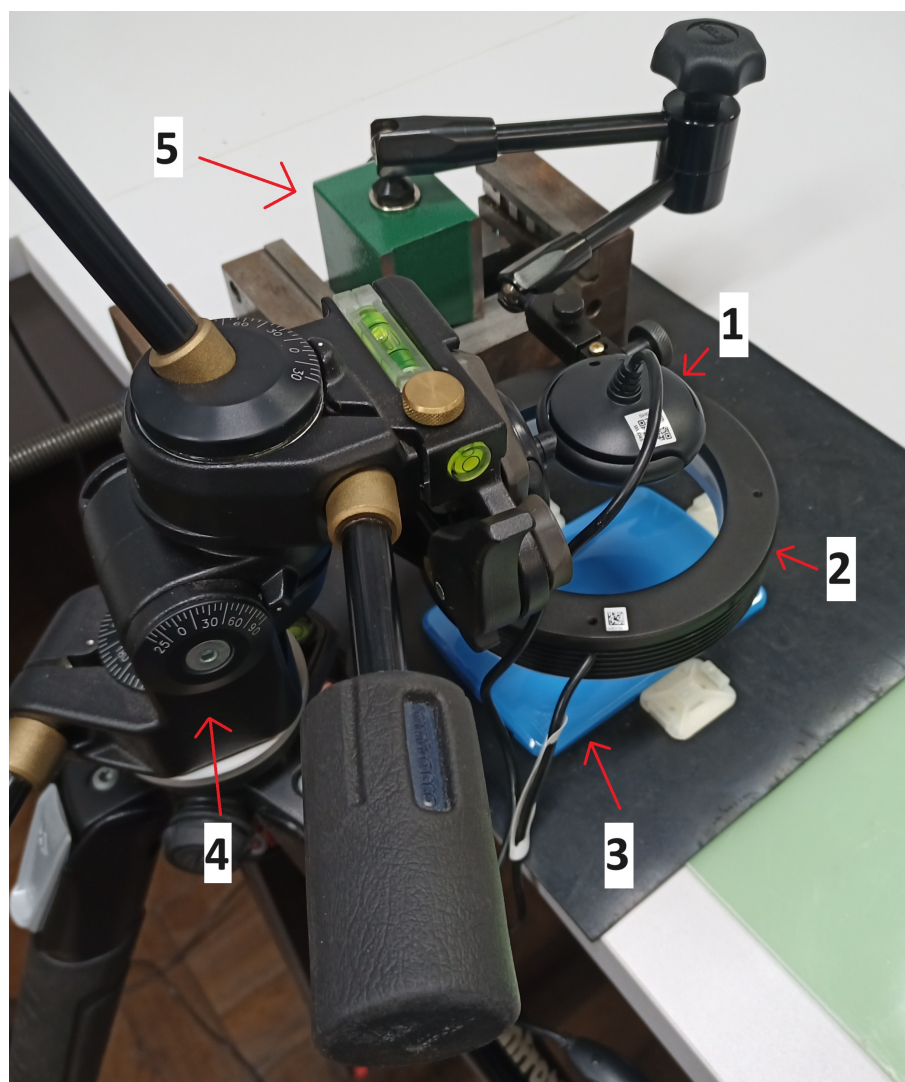
Fonte: próprio autor.

método de padronização entre as imagens adquiridas pela câmera utilizada no experimento da Subseção 4.3.1 e qualquer outra câmera que venha a substituí-la no futuro. O estudo foi realizado especificamente para outras duas câmeras, que foram utilizadas na montagem final do protótipo, em experimento descrito no Capítulo 5. Para este estudo, optou-se por não utilizar as configurações internas do hardware da câmera, como por exemplo o brilho e a saturação, que muitas vezes não podem ser alterados de forma livre pelo usuário em câmeras de menor custo. O objetivo dessa escolha é entender qual o erro entre câmeras se houver apenas correções e ajustes feitos com o uso de software.

Para entender qual o processo que apresenta a menor diferença entre câmeras, foram adquiridas imagens com cores conhecidas e foram calculadas as diferenças entre cores com a Equação (6). Foram utilizadas amostras nas cores vermelho, verde, amarelo e azul e essas foram medidas na escala CIELAB pelo espectrofotômetro X-Rite CI7600. Nesse equipamento, utiliza-se uma lâmpada padrão D65 embutida. Utilizou-se uma lâmpada com coloração similar em condições controladas para adquirir imagens semelhantes às adquiridas pelo espectrofotômetro, conforme a Figura 26. Para essa montagem, fixou-se a iluminação em uma distância aproximada de 20 cm das amostras

e fixaram-se as câmeras individualmente em um engate rápido de um tripé para facilitar a troca de câmeras sem alterar a posição das amostras e da iluminação. O foco da câmera foi ajustado manualmente no início do ensaio e a distância entre a amostra e a câmera foi de aproximadamente 25 cm.

Figura 26 – Ensaio com estrutura fixa para garantir a aquisição de imagens de amostras: [1] câmera; [2] LED branco em formato de anel; [3] amostra de cor; [4] tripé; [5] base magnética com braço articulado para fixação do LED



Fonte: próprio autor.

Para executar esse experimento, foi necessário converter as imagens adquiridas em RGB para CIELAB. Para facilitar o tratamento dos dados recortou-se um retângulo de aproximadamente 8500 pixels do centro da imagem adquirida e utilizou-se a média dos valores RGB adquiridos. O corte foi necessário para descartar o reflexo do LED. Para a conversão dos valores em CIELAB, utilizou-se o programa *LAB Conversion.vi* indicado pelo fornecedor do ambiente de programação LabVIEW (RGB. . . , 2019). Neste,

há a conversão de RGB para XYZ, seguida da conversão de XYZ para CIELAB. Também utilizou-se, a título de comparativo, a função nativa do módulo *Vision Development* para a conversão dos valores. Quanto a conversão de valores, há diversas codificações de CIELAB que apresentam diferentes valores de L, A e B, mas nas bibliotecas utilizadas, por utilizarem uma conversão de RGB para CIELAB, os valores são truncados com alteração de faixa, conforme alguns exemplos demonstrados na Tabela 12.

Tabela 12 – Demonstração das faixas de valores utilizadas em codificações CIELAB e nas codificações utilizadas nos experimentos

Codificações	L	L	A	A	B	B
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
TIFF – CIELAB	0,0	+100,0	-128,0	+127,0	-128,0	+127,0
JPX – CIELAB	0,0	+100,0	-85,0	+85,0	-75,0	+125,0
Vision Development	0,0	+255,0	-86,2	+98,2	-107,9	+94,5
Lab Conversion	0,0	+100,0	-86,2	+98,3	-108,9	+94,5

Fonte: adaptado de (BUCKLEY, R. R.; GIORGIANNI, 2015).

Após o tratamento dos dados, calcularam-se as diferenças entre os valores convertidos pelas duas funções em relação ao valor referência, que foi adquirido pelo espectrofotômetro. Os resultados obtidos foram separados em colunas, conforme a Tabela 13. As diferenças entre as duas funções foram significativas, sendo que a função *LAB Conversion.vi* apresentou a menor diferença em relação ao valor de referência. Assim, optou-se por utilizar essa função nas conversões.

Para tentar reduzir a diferença entre cores, aplicou-se uma correção linear. Para essa correção, criaram-se funções para os valores L, A e B de cada imagem adquirida pelas câmeras com referência aos valores adquiridos pelo espectrofotômetro. Com os valores corrigidos compararam-se os resultados das distâncias antes e depois da correção, conforme a Tabela 14. A média das distâncias foi reduzida, mas a imagem adquirida pela câmera, referente à cor amarela, aumentou a diferença, o que indica que, mesmo que o espaço de cor CIELAB possua mudanças de tonalidades lineares, as câmeras podem ter características individuais que não permitem uma correção linear em relação a um padrão. Essas variações de cores dos padrões podem ser visualizadas na Figura 27, que representa a média dos valores RGB obtidos dos 8500 pixels.

Como os erros obtidos ainda foram elevados e o que interessa para a aplicação não é a obtenção da cor exata, mas que o resultado obtido na etapa de caracterização possa ser replicado, avaliaram-se os cálculos entre os valores das imagens das câmeras utilizadas e os valores das imagens da câmera de referência utilizada no experimento de degradação. Para comparar os efeitos gerados após o filtro proposto

Tabela 13 – Distância entre cores calculadas com o uso de funções diferentes no ambiente de programação LabVIEW convertendo os valores adquiridos em RGB e convertidos para o sistema de cor CIELAB

Câmera	Cor da amostra	Distância calculada a biblioteca <i>LAB Conversion</i>	Função <i>Vision Development</i>
1	Amarelo	44,4	155,2
1	Azul	24,8	134,6
1	Verde	26,9	134,9
1	Vermelho	26,0	81,5
2	Amarelo	49,8	154,8
2	Azul	19,3	143,9
2	Verde	10,0	145,6
2	Vermelho	19,1	91,1
Ref	Amarelo	49,3	157,8
Ref	Azul	75,9	105,2
Ref	Verde	26,1	132,7
Ref	Vermelho	45,4	134,6
Média		34,7	131,0

Fonte: próprio autor.

Figura 27 – Imagens dos padrões adquiridas pelas câmeras e tratadas para representar a cor média

Câmera referência cor amarelo	Câmera referência cor azul	Câmera referência cor verde	Câmera referência cor vermelho
Câmera 1 cor amarelo	Câmera 1 cor azul	Câmera 1 cor verde	Câmera 1 cor vermelho
Câmera 2 cor amarelo	Câmera 2 cor azul	Câmera 2 cor verde	Câmera 2 cor vermelho

Fonte: próprio autor.

na Subseção 4.3.1, efetuou-se também o cálculo da distância após o filtro. Com isso, a Equação (6) é simplificada de forma que apenas a variável L é utilizada, conforme a Equação (9):

$$\Delta E = \sqrt{(L_1 - L_2)^2}, \quad (9)$$

em que ΔE é a diferença entre cores, L_1 é o valor da componente L da referência e L_2 é o valor da componente L da amostra. Os resultados estão apresentados na Tabela 15 e reforçam que mesmo com condições similares de aquisição de imagens,

Tabela 14 – Distância calculada com correção linear

Câmera	Cor do padrão	Distância calculada com a biblioteca <i>LAB Conversion</i>	Distância calculada com a correção linear
1	Amarelo	44,4	31,1
1	Azul	24,8	14,2
1	Verde	26,9	8,4
1	Vermelho	26,0	28,8
2	Amarelo	49,8	29,8
2	Azul	19,3	11,4
2	Verde	10,0	11,7
2	Vermelho	19,1	18,9
Ref	Amarelo	49,3	61,2
Ref	Azul	75,9	69,5
Ref	Verde	26,1	15,8
Ref	Vermelho	45,4	30,3
Média		34,7	27,6

Fonte: próprio autor.

as imagens adquiridas são visivelmente diferentes. Nos dados filtrados, a redução é significativa, mas torna-se praticamente imperceptível apenas na cor amarelo.

Tabela 15 – Erros calculados em relação à câmera referência

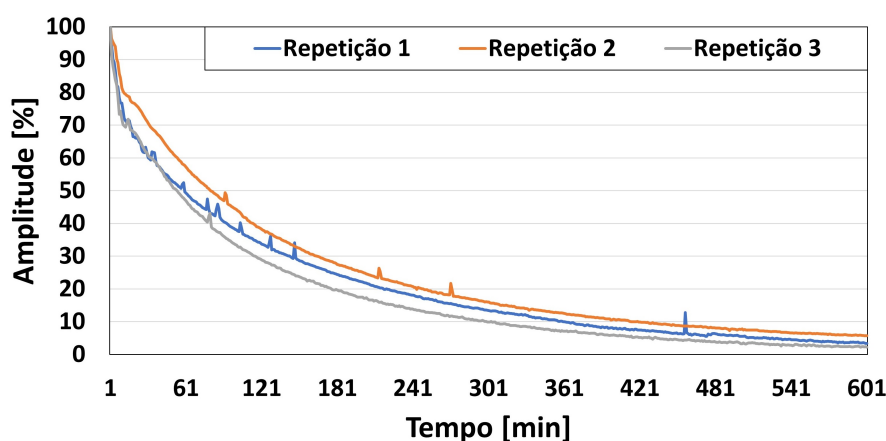
Câmera	Cor do padrão	Erro calculado com as imagens dos padrões	Erro calculado com as imagens tratadas dos padrões
1	Amarelo	6,1	1,9
1	Azul	54,5	13,3
1	Verde	3,5	1,7
1	Vermelho	50,5	27,2
2	Amarelo	4,0	2,9
2	Azul	65,4	18,2
2	Verde	16,5	10,7
2	Vermelho	59,4	22,8
Média		32,5	12,3

Fonte: próprio autor.

Em resumo, os valores convertidos apresentaram diferenças perceptíveis em relação à referência e em relação às amostras medidas com um equipamento profissional. Para fins comparativos, calculou-se também a diferença entre uma imagem adquirida de uma graxa nova e uma de uma graxa degradada termicamente na temperatura de 160 °C e o resultado foi de 32,5, ou seja, sem ajustes de hardware, a diferença entre imagens da mesma amostra adquirida por diferentes câmeras pode

ser superior à própria variação gerada pela degradação térmica. Para garantir que os resultados de diferentes câmeras sejam similares, optou-se por definir um valor mínimo com uma imagem adquirida com a iluminação de LED apagada e, após esse processo, adquiriu-se uma imagem com a iluminação acesa para gerar a referência para normalizar os dados adquiridos durante o ensaio. Para confirmar a efetividade dessa proposta, aplicou-se esse método no tratamento dos dados adquiridos de três amostras de graxas degradadas na temperatura de 160 °C. Conforme a Figura 28, foi possível identificar uma variação pequena no comportamento da curva durante o processo de degradação, mas após o período de degradação de 10 h a variação entre amostras reduz significativamente, ficando inferior a 4%.

Figura 28 – Comparativo de três degradações térmica da graxa degradadas na temperatura de 160 °C sendo que considerou-se 100% a amostra de graxa nova



Fonte: próprio autor.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao início deste capítulo, descreveu-se a escolha da graxa utilizada no experimento com as suas características. Em seguida, apresentaram-se os experimentos executados para definir a instrumentação necessária e o método para a qualificação da graxa contaminada por partículas. Na sequência, foram apresentados os experimentos executados para o desenvolvimento do processo de aquisição de imagens e o método utilizado para a degradação térmica da graxa.

Com os ensaios executados para a qualificação de contaminação de graxa por partículas, foi possível selecionar um sensor Hall adequado para os experimentos utilizando o ímã permanente disponível. Os resultados validaram que sistema sofre variação com a temperatura, mas esta é inferior à variação gerada pela inserção de contaminantes. O tamanho e o custo dos sensores são bem atrativos se comparados

a um gaussímetro comercial, utilizado para a validação do experimento e definição da faixa de medição do sensor.

Os protótipos e o algoritmo desenvolvidos nos experimentos iniciais, para o entendimento do comportamento da degradação térmica da graxa, foram também empregados nos experimentos seguintes, realizados em estufa. A utilização de uma lente protótipo de vidro maciça resolveu o problema de compatibilidade química enfrentado pela fibra óptica e não houve danos em função da variação térmica. Os resultados obtidos com a degradação da graxa em estufa permitiram a geração de um gráfico de três dimensões, que demonstra a aceleração da degradação térmica com o aumento de temperatura. Nos experimentos executados para correlacionar o resultado gerado pela câmera referência com outras câmeras, não foi possível gerar um ajuste de imagens de modo que imagens adquiridas por câmeras diferentes apresentassem distâncias menores que 5 no sistema CIELAB. Com poucos valores adquiridos dos padrões de cores, não foi possível gerar uma função de correção que compensasse a variação de cada câmera. Com a última proposta de ajustar o valor mínimo com a luz de LED apagada, obteve-se um resultado que valida a implementação deste método em uma aplicação utilizando a câmera referência. Não foi possível aplicar o método com outras câmeras e essa proposta não permite que uma câmera seja trocada no meio de um ensaio sem que ocorra o processo de aplicação de graxa nova com e sem iluminação. Além das alternativas propostas, há outra que é a repetição dos ensaios executados em estufa com cada câmera, mas não havia disponibilidade de recursos para a repetição do mesmo, pois são necessários no mínimo 56 d para gerar todos os pontos das curvas.

Em resumo, os resultados obtidos permitem a implementação das soluções no experimento proposto no Capítulo 5. As oportunidades destacadas sobre o efeito da temperatura no sensor Hall e na correlação entre câmeras serão descritas como oportunidades em trabalhos futuros.

5 VALIDAÇÃO E RESULTADOS

Este capítulo representa a avaliação experimental do método adotado, com o objetivo de validar os conceitos do Capítulo 4 em uma bancada que reproduza características de mancalização similares a um motor elétrico. O funcionamento da bancada, o desenvolvimento do anel de fixação protótipo e as adaptações necessárias para instalação do sistema de monitoramento e qualificação de graxa são descritos na Seção 5.1. Os métodos utilizados e os resultados obtidos com o sistema de qualificação de graxa por meio de cor, processamento de dados e método de obtenção de imagens estão descritos na Seção 5.2. Os instrumentos de medição, o processo de aquisição de dados, as especificações e os resultados obtidos para a qualificação de graxa com contaminantes por meio de campo magnético são descritos na Seção 5.3. Por fim, as considerações finais são apresentadas na Seção 5.4.

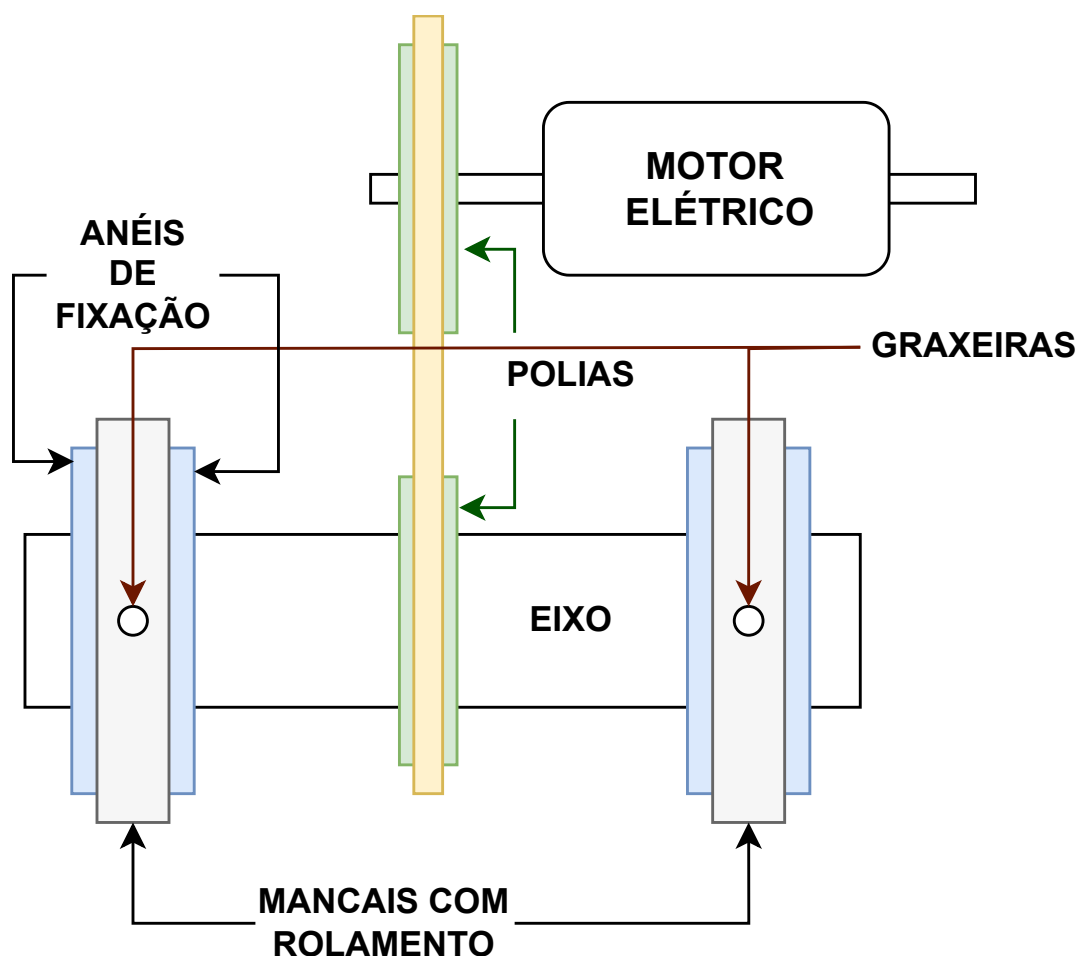
5.1 BANCADA EXPERIMENTAL COM MANCALIZAÇÃO SEMELHANTE A DE UM MOTOR ELÉTRICO PARA VALIDAR O MÉTODO DESENVOLVIDO

Para executar ensaios de desgaste em rolamentos e emular condições de lubrificação em motores elétricos em ensaios controlados, foi desenvolvida uma bancada experimental. Para garantir uma operação semelhante àquela observada na prática, a bancada era composta por dois mancais adaptados, sendo que cada mancal fixava um rolamento SKF 6314 e dois anéis de fixação modelo WEG para carcaças 225 da linha W22. O rolamento 6314 possui carga estática de 68 kN e carga dinâmica de 111 kN (Rolamentos[...], 2015). Para permitir a rotação do eixo, foram acopladas polias a um motor elétrico e o controle de velocidade foi feito com o uso de um inversor de frequência, conforme a 29.

Com projetos semelhantes, Van Hooreweder *et al.* (2010) e Saruhan *et al.* (2014) utilizaram bancadas acopladas diretamente a motores elétricos menores para validar falhas de rolamentos e desbalanceamentos. Essas montagens com rolamentos menores citadas nesses trabalhos apresentam menor custo de implementação, mas inviabilizam os ensaios com lubrificação propostos neste trabalho. Isso ocorre pois grande parte dos motores pequenos utilizam rolamentos blindados e esses possuem lubrificação interna aplicada pelo fabricante. No caso da bancada desenvolvida neste trabalho, foram empregados rolamentos de motores maiores, que não são blindados. Para garantir a pressão axial no rolamento, adicionou-se mola de pré-carga no mancal traseiro, do mesmo modelo utilizado em motores da linha W22 do fabricante WEG. Em ambos os mancais, foram empregados rolamentos novos para garantir que o efeito gerado pelo desgaste dos rolamentos não interferisse nos resultados dos ensaios.

O anel de fixação empregado no motor considerado como referência para o projeto da bancada, possui um canal para escoamento de graxa. Para o motor, a lubrifi-

Figura 29 – Conceito da bancada que será utilizada para validar o experimento em condições de mancalização semelhantes a um motor elétrico

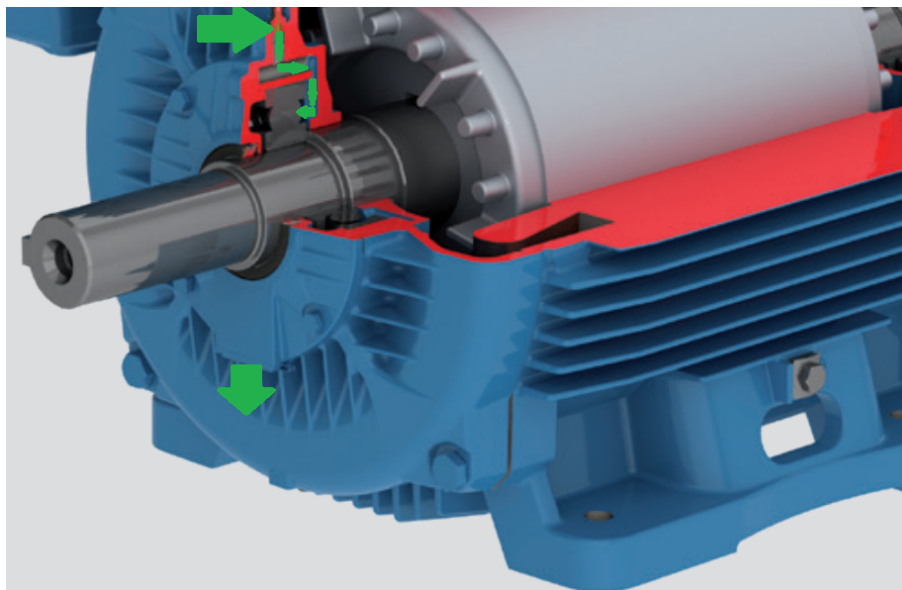


Fonte: próprio autor.

cação do mancal ocorre quando a aplicação da graxa é feita no engate para a graxeira. Quando ocorre esse processo, há o deslocamento da graxa para a parte interna do anel de fixação e a graxa entra em contato com o rolamento para a lubrificação. Ao encher o volume, ocorre a expulsão da graxa acumulada no canal de saída, conforme ilustra a Figura 30. Embora essa expulsão de graxa ocorra naturalmente durante o processo de lubrificação, é conhecido o fato de que o excesso de graxa gera um aumento de temperatura.

O anel de fixação padrão da Figura 30 possui apenas uma saída de graxa e é fabricado de ferro fundido, o que pode gerar uma influência no resultado da medição com os sensores magnéticos e alto custo de usinagem em relação a prototipagem de um novo modelo utilizando a impressão 3D. Para viabilizar o desenvolvimento de um anel de fixação com características construtivas específicas, optou-se por desenvolver

Figura 30 – Fluxo da graxa no anel de fixação



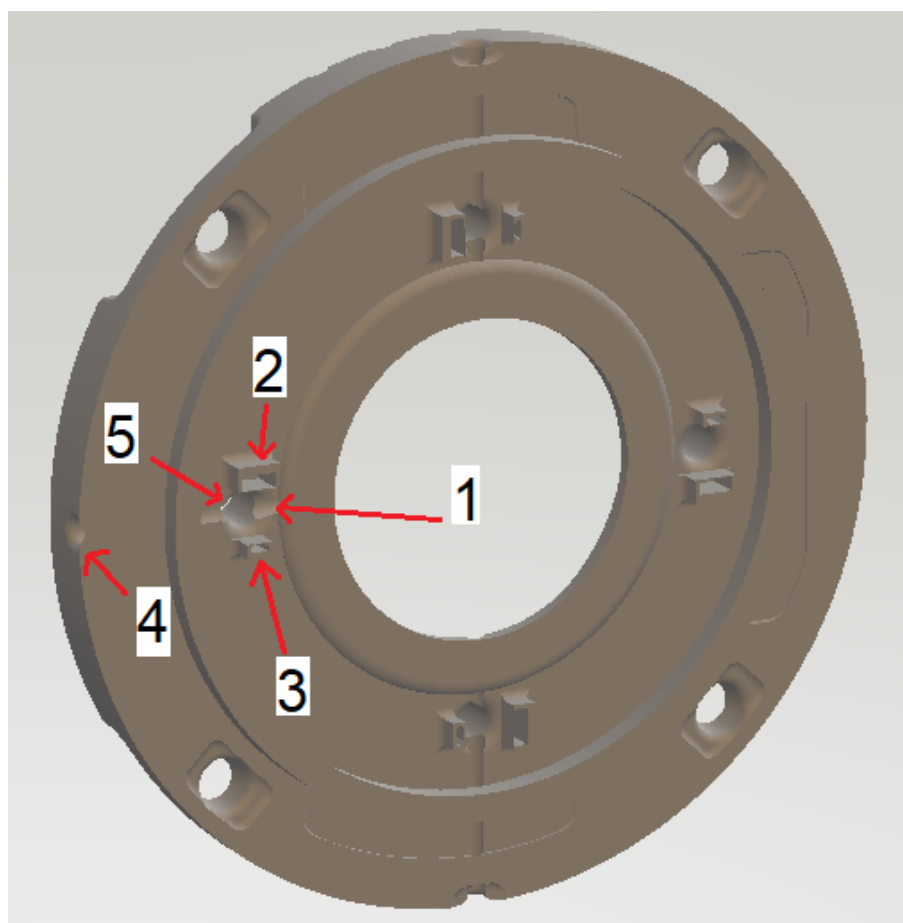
Fonte: adaptado de (W22. . . , 2022).

e utilizar um anel protótipo impresso em PLA. É sabido que isso limitará a condição do ensaio devido à temperatura de transição vítrea do PLA, que está na faixa dos 60 °C (SANTANA *et al.*, 2018). Quanto à geometria, alterou-se o canal de saída de graxa para quatro orifícios circulares na parte frontal do anel de fixação, e criaram-se suportes para os sensores, para os ímãs permanentes e para as lentes, conforme a Figura 31. Com as alterações feitas, é possível efetuar medições muito próximas da gaiola do rolamento sem gerar risco de colisão.

Para definir o posicionamento relativo entre cada um dos ímãs permanentes e os sensores Hall, foram empregadas as informações obtidas no ensaio de distância apresentado na Figura 16(Seção 4.2), resultando em uma distância próxima a 8 mm. Para a parte de qualificação da graxa com câmera, optou-se novamente por afastar a câmera do anel de fixação, com emprego de lentes planas feitas com cilindros de vidro. Foram confeccionadas seis lentes com vidros cilíndricos de 4 mm de diâmetro, separadas em três pares. Definiram-se três pares pois, não há espaço na bancada para fixar uma lente com câmera na parte inferior do anel de fixação. Os três pares de cilindros de vidro foram cortados com um disco diamantado, na sequência executou-se um processo de acabamento com lixas 400 e 1200, respectivamente, e depois foi realizado um polimento com pasta diamantada, repetindo o mesmo processo utilizado na Seção 4.3. Os pares foram utilizados entre a graxa e a câmera e entre a graxa e o LED, mantendo o mesmo conceito dos experimentos de validação.

Adicionou-se um canal circular no anel de fixação com o objetivo de fixar os pares de lente de maneira concêntrica. Para fixar a lente no anel de fixação, utilizou-se

Figura 31 – Conceito do anel de fixação desenvolvido para fixar o sensor Hall, ímãs permanentes e lentes utilizadas: [1] orifício para a fixação do LED; [2] suporte para o ímã permanente; [3] suporte para o sensor Hall; [4] orifício de passagem da lente; [5] orifício de passagem de graxa



Fonte: próprio autor.

resina epóxi, conforme ilustrado na Figura 32, que também apresenta o esquema de fixação empregado para os ímãs permanentes e para os sensores Hall.

A adaptação da lente na câmera foi feita com o desenvolvimento de um protótipo impresso em PLA, conforme ilustrado na Figura 33. Para a luz de fundo, utilizou-se um LED branco de 5 mm no fundo cujo brilho foi ajustado manualmente por meio de um potenciômetro em série com a alimentação.

O eixo foi acoplado a um motor trifásico WEG W22 Plus de 9,2 kW por meio de polias e controlado por um inversor de frequência modelo CFW11 BRCFW110088T 4SZ, com especificação programada de rotação mínima de 5 Hz. Para os ensaios, utilizou-se a menor rotação para manter a temperatura baixa, por conta do material utilizado no anel de fixação e para reduzir a influência de temperatura no sensor Hall. A rotação baixa pode não representar a condição do motor elétrico trifásico comum, que possui rotação nominal assíncrona de 60 Hz, mas há diversos geradores

Figura 32 – Protótipo de anel de fixação impresso, com destaque para a fixação dos componentes: [1] lente fixada na câmera; [2] lente que fixada no LED; [3] ímã permanente; [4] sensor Hall



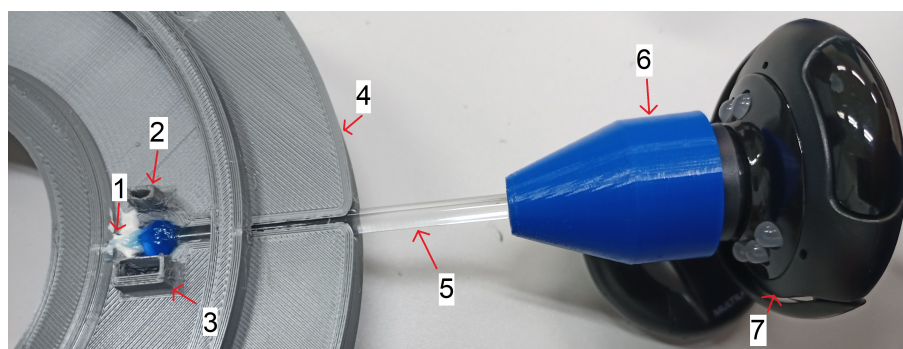
Fonte: próprio autor.

e redutores grandes que operam em rotações baixas. A escolha também é suportada pelo experimento feito por Elforjani (2018), no qual percebe-se que o uso de uma rotação baixa não é impeditivo de dano ou falha em um mancal. Os resultados obtidos pela qualificação de graxa não se alteram em rotações elevadas, porém, se houver um aumento de temperatura acima das condições testadas, sugere-se que seja avaliada a necessidade do uso de um sistema para compensação de temperatura.

Os mancais foram projetados para serem semelhantes ao mancal de motor elétrico, mas com maior flexibilidade de montagem que um mancal real. Para a bancada, utilizou-se uma luva bipartida em aço com diâmetro interno atendendo as especificações do fabricante do rolamento, mas com a possibilidade de desmontagem do rolamento sem o uso de ferramentas específicas, conforme a Figura 34.

A parte superior da luva possui orifício de passagem de graxa similar ao do motor com carcaça 225 e as furações de passagem do parafuso são similares às utilizadas na tampa dianteira do motor. Fixou-se o rolamento na parte dianteira do motor entre as luvas, seguidas do anel de fixação original traseiro e o anel de fixação dianteiro

Figura 33 – Adaptação da câmera no anel de fixação protótipo: [1] alojamento do LED; [2] alojamento do sensor Hall; [3] alojamento do ímã permanente; [4] anel de fixação protótipo; [5] lente protótipo; [6] adaptador para lente protótipo e câmera; [7] câmera



Fonte: próprio autor.

protótipo, conforme a Figura 35. Houve a necessidade de utilização de abraçadeiras para organizar os cabos e não gerar risco de dano para a instrumentação por conta da vibração da bancada.

Para reduzir o tempo de ensaio, adicionou-se graxa nova até garantir que todos os orifícios internos ficassem preenchidos e ocorresse a expulsão natural da graxa. Durante esse processo de lubrificação houve um dano na câmera superior em função da limitação do espaço.

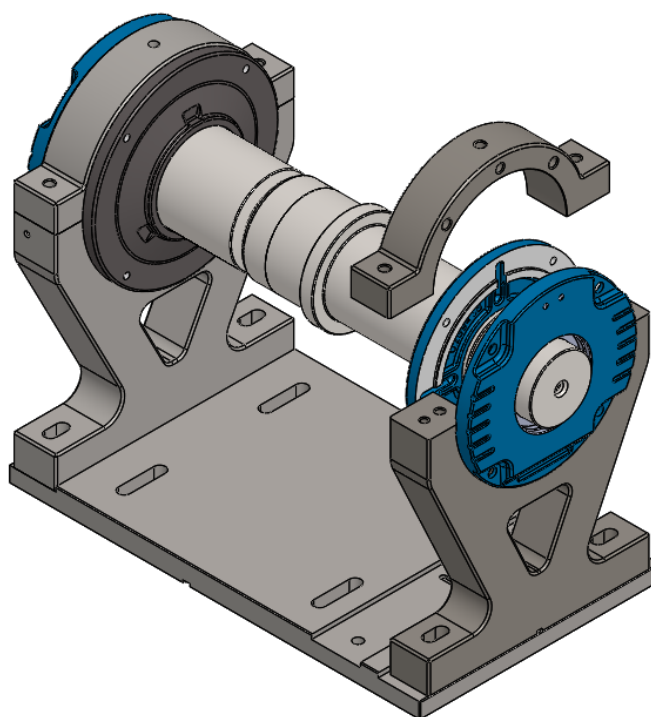
5.2 AVALIAÇÃO DE DEGRADAÇÃO DA GRAXA

Para avaliação da degradação, utilizou-se o mesmo modelo de câmera utilizado para os ensaios relatados na Seção 4.3. Com a graxa com aspecto e cor de nova, ajustou-se o potenciômetro do LED e obteve-se uma imagem semelhante àquela utilizada na avaliação de degradação por temperatura. As câmeras utilizadas são do mesmo modelo, mas por serem unidades diferentes, aplicou-se as correções desenvolvidas na Seção 4.3.1. Com o sistema ajustado, foram adquiridas imagens para criar uma referência de coloração da graxa nova.

Para criar a característica de coloração similar àquela apresentada pela graxa oxidada, adicionou-se 20 g de graxa que foi exposta a uma temperatura de 200 °C por seis horas. Como resultado, obteve-se uma graxa escura, com aspecto queimado e característica opaca. Inseriu-se a graxa degradada em três pontos da gaiola do rolamento com o sistema parado, conforme a Figura 36, e iniciou-se a aquisição de imagens, seguida da partida do motor elétrico.

Após esse processo, iniciou-se a aplicação de graxa nova com uma graxeira manual com o objetivo de reproduzir o processo de lubrificação que ocorre conforme

Figura 34 – Demonstração da luva bipartida de aço utilizada para fixação do rolamento



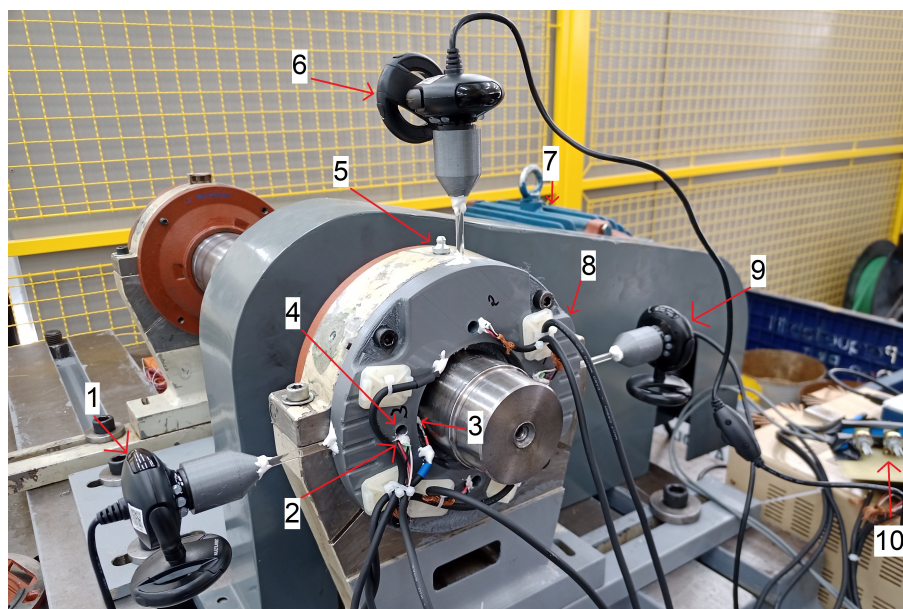
Fonte: próprio autor.

as especificações do fabricante. Durante esse processo houve um dano na câmara superior, que foi removida. Esse processo foi repetido até ocorrer a variação nas imagens adquiridas. Quando ocorreu a variação, continuou-se a aplicação de graxa até ocorrer um assentamento das características da imagem, conforme o gráfico das imagens tratadas da Figura 37. Nesta é possível identificar que no início do experimento os valores tratados estão próximos de 100%, que é equivalente a graxa nova e após 100 s ocorre a primeira variação que é equivalente ao momento de identificação da degradação térmica da graxa que passa pela câmara 1. Após a marcação de 150 s há mais uma identificação da degradação da graxa feita pela câmara 1 seguida da degradação da graxa que foi identificada pela câmara 2. Pelo teste ser acelerado, essa alteração em um curto período seria equivalente a uma degradação térmica com temperaturas superiores a 160 °C, que demonstra que há falhas graves no funcionamento desse mancal.

Os dados tratados refletem as identificações visuais das imagens adquiridas, nas quais permitem a classificação do momento que a graxa está nova e no momento que a graxa está degradada termicamente, conforme a Figura 38.

Os resultados das aquisições e tratamento de imagens utilizando o algoritmo

Figura 35 – Bancada montada com o anel de fixação protótipo: [1] câmera 1 inferior esquerda; [2] cabos de ligação do sensor Hall; [3] cabo de alimentação da luz de fundo de LED; [4] orifício de saída de graxa; [5] engate rápido para graxeira; [6] câmera superior; [7] motor elétrico utilizado para a rotação das polias; [8] anel de fixação protótipo; [9] Câmera 2 inferior direita; [10] fonte de corrente, placa de ajuste de iluminação e placa de aquisição



Fonte: próprio autor.

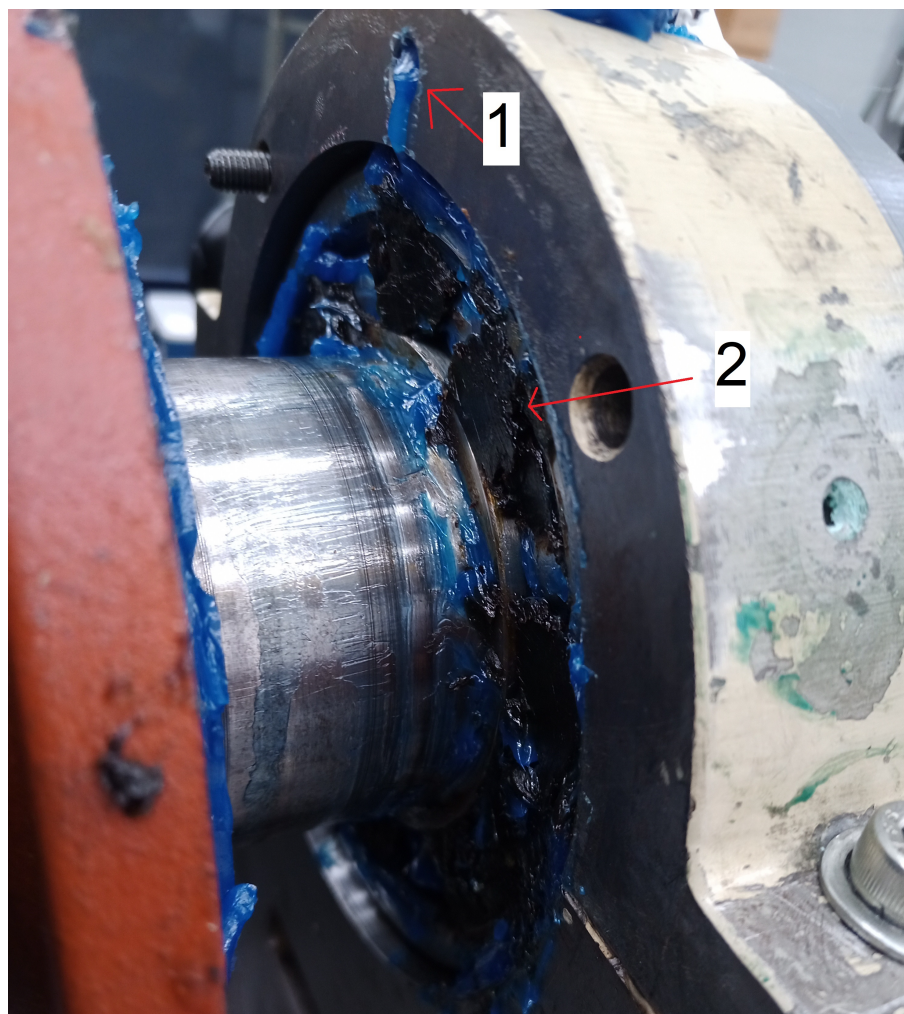
conseguiram quantificar a degradação rápida, e possibilita gerar um aviso de graxa degradada ou um alerta de degradação do lubrificante utilizando valores predefinidos. A velocidade que essa transição de cor ocorreu não permitiu a correlação dos dados adquiridos com as curvas geradas em estufa.

Com o uso do anel de fixação protótipo esperava-se que a graxa saísse nos orifícios, porém houve um vazamento de graxa na folga existente entre o diâmetro interno do anel e o diâmetro externo do eixo. Esse efeito ocorreu pois se aumentou a folga do diâmetro interno do anel de fixação em aproximadamente 1 mm, com o objetivo de compensar erros dimensionais devido ao fato de a peça não ter sido impressa em impressora de alta precisão. O efeito deste no escoamento de graxa foi um atraso na identificação da contaminação de graxa pelo sistema de qualificação proposto. Era possível identificar a olho nu a coloração da graxa escura, mas a câmera não havia reconhecido a contaminação, pois ela não havia atingido a região de identificação.

5.3 AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DA GRAXA POR PARTÍCULAS METÁLICAS

Para a avaliação da contaminação da graxa por partículas metálicas, utilizou-se o mesmo modelo de sensor Hall empregado nos ensaios da Seção 4.2 com a

Figura 36 – Local no qual foi inserida a graxa queimada: [1] orifício de entrada de graxa nova; [2] graxa degradada termicamente inserida no rolamento



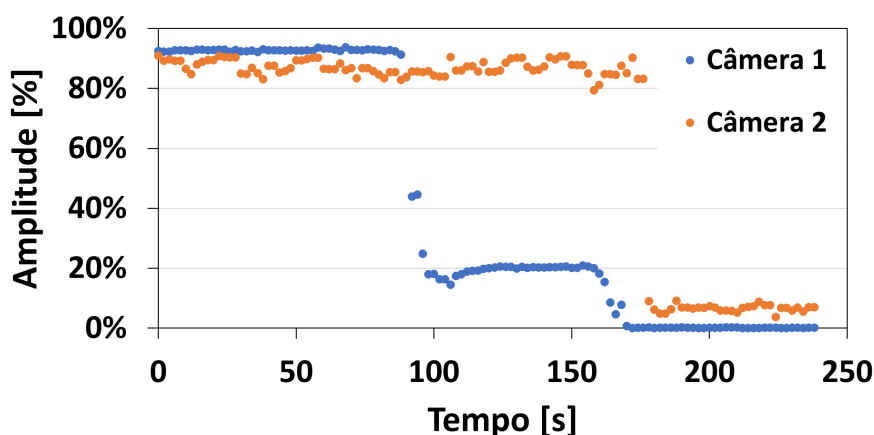
Fonte: próprio autor.

especificação de alimentação informada na folha de especificação. Para alimentação de tensão, utilizou-se a saída fixa de uma fonte linear Instrutherm FA-3030 e, para adquirir os dados, utilizou-se um módulo de aquisição de tensão NI-9239.

Para simular a contaminação da graxa por partículas metálicas, preparou-se aproximadamente 2,8g de contaminante de pista externa de rolamento. Com o objetivo de obter o mesmo resultado do experimento com a graxa queimada, inseriu-se o material dentro da gaiola do rolamento em três espaços internos, conforme apresentado na Figura 39. Após essa inserção, adicionou-se graxa por cima para tentar forçar o caminho dos contaminantes pelo rolamento, direcionando-os para a saída no anel de fixação.

Após esse processo, iniciou-se a aquisição dos sinais, seguida pela partida do motor, que ocorre aproximadamente no ponto de 50 s da Figura 40. Executou-se um

Figura 37 – Gráfico com os dados das imagens tratadas após a inserção de graxa queimada



Fonte: próprio autor.

zeramento no gráfico para que o momento da partida do motor representasse um valor de densidade do fluxo magnético de 0 mT. Durante o funcionamento da bancada, havia um risco de dano ao rolamento por conta da alta concentração de partículas sólidas inseridas. Para minimizar o risco de um travamento ou falha prematura, executou-se o experimento rapidamente. Após um aparente assentamento no sinal adquirido próximo ao ponto de 200 s, repetiu-se o processo de adição de graxa pela graxeira até identificar uma expurga significativa de graxa pelo orifício e um possível novo assentamento no sinal adquirido dos sensores, a partir do ponto 280 s.

Foi possível identificar variações de densidade do fluxo magnético na faixa de 0,01 mT até 0,32 mT em todos os sensores a partir do ponto de 250 s, que imaginou-se inicialmente refletir a detecção de contaminantes na saída de graxa. Para confrontar os dados adquiridos com o nível de contaminação, interrompeu-se o de lubrificação e desligou-se o motor. Após, retirou-se o anel de fixação protótipo para a análise visual da distribuição de graxa com o objetivo de identificar se houve alguma lacuna em aberto ou alguma região sem graxa. Aparentemente, toda a região estava preenchida de graxa e sem uma diferenciação visual entre as saídas de graxa associadas a cada sensor.

Para verificar qual o motivo pelo qual os sinais adquiridos apresentaram variação na medição, retirou-se a graxa que estava entre cada um dos pares de sensor Hall e ímã permanente. Identificou-se que nas proximidades dos sensores 1 e 3, houve acúmulo de partículas metálicas em volta dos ímãs permanentes, conforme ilustrado na Figura 41, que explica o aumento da densidade do fluxo magnético ilustrado no gráfico a partir do ponto 250 s. Durante a partida do motor, há uma variação gerada por conta da influência da gaiola do rolamento, o que reduziu a densidade do fluxo

Figura 38 – Imagens adquiridas ao início e final do experimento: [1] e [3] Imagens adquiridas respectivamente pelas câmeras 1 e 2 no início do experimento [2] e [4] Imagens adquiridas respectivamente pelas câmeras 1 e 2 ao final do experimento



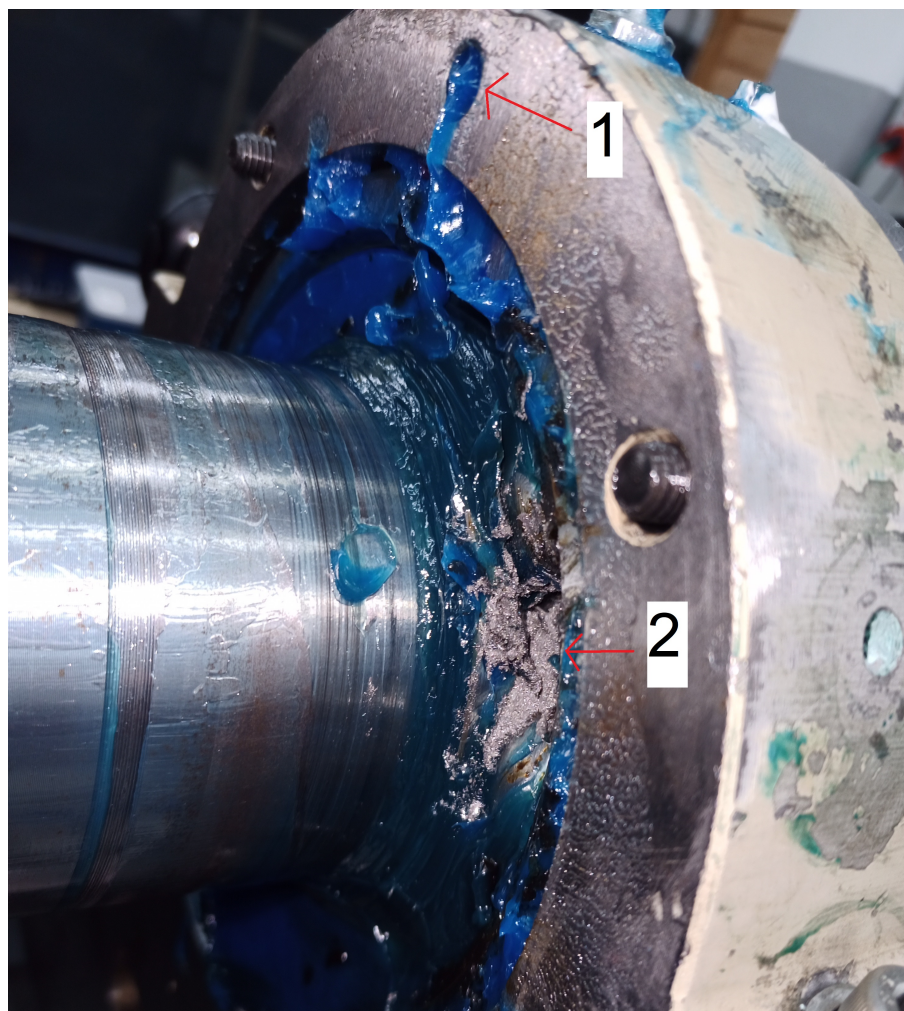
Fonte: próprio autor.

magnético em alguns pontos. Já no sensor 1, houve um comportamento diferenciado pois, provavelmente, a gaiola do rolamento estava alinhada e houve um afastamento do sistema de medição em relação ao rolamento. Logo, com a saída da graxa e a variação gerada com a rotação do rolamento gerou um efeito contrário ao gerado nos outros sensores que estavam desalinhados. Com a fixação das partículas no ímã permanente, houve um efeito de aumento da densidade do fluxo magnético, pois as mesmas foram magnetizadas e houve um aumento na concentração do campo magnético no sentido do sensor Hall.

Esperava-se uma possível variação de medição gerada pela alteração das propriedades da graxa ao ser inserido o pó metálico. Entretanto, não se esperava que houvesse um acúmulo significativo de partículas metálicas ao redor dos ímãs permanentes. Com esse efeito, haverá a necessidade de efetuar a limpeza dos sensores quando houver quando um acúmulo excessivo de partículas metálicas, que por conseguinte geram a saturação do mesmo, conforme identificado na Seção 2.2.3.

Além dos dados obtidos, adquiriram-se sinais do sensor Hall com uma elevada taxa de aquisição, conforme a Figura 42. Com isso foi possível identificar uma variação senoidal ocasionada pela passagem da gaiola pelo sensor Hall, que reforça a explicação apresentada da variação encontrada no sensor 1 na Figura 41.

Figura 39 – Inserção de partículas metálicas na gaiola do rolamento para simular um desgaste: [1] orifício de entrada de graxa nova; [2] partículas de contaminantes inseridas no rolamento



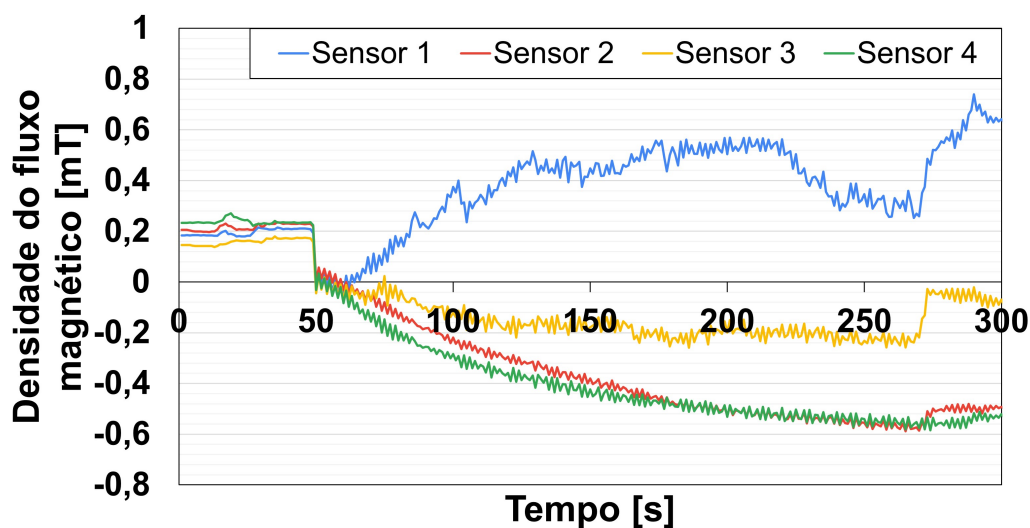
Fonte: próprio autor.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao início deste capítulo, foram descritos a bancada que foi utilizada para o experimento, a instrumentação necessária e os protótipos utilizados para fixação dos sensores. Em seguida, definiram-se os processos utilizados para cada validação das duas propostas de qualificação.

Identificou-se, com o auxílio dos gráficos, que ambos os sistemas de qualificação foram capazes de distinguir variações quando houve a inserção de contaminantes. As câmeras utilizadas conseguiram identificar uma variação significativa na cor que chegou a bloquear a iluminação. Os sensores Hall sofreram variações por conta da proximidade com a gaiola do rolamento. Recomenda-se utilizar o sistema em uma região que não sofra influência da movimentação do rolamento ou implementar um

Figura 40 – Gráfico com os dados adquiridos pelo sensor Hall após a adição de contaminantes, sendo que o motor foi ligado após 50 s e a estabilização para adicionar graxa nova até ocorrer a expulsão da graxa com contaminante ocorreu após 200 s

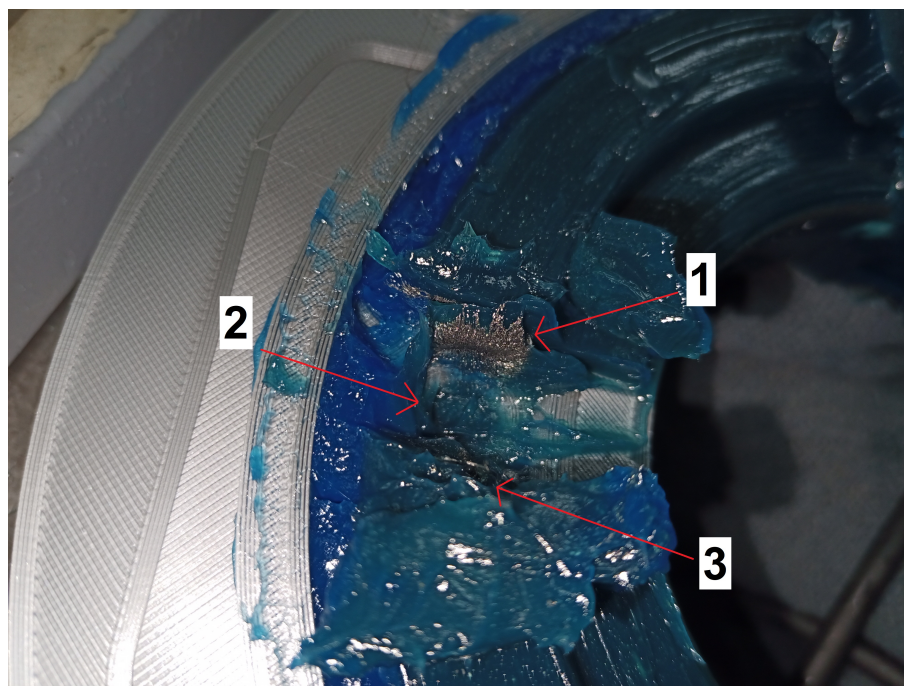


Fonte: próprio autor.

filtro no sinal, pois o desgaste do rolamento é lento e as influências geradas pela rotação são proporcionais à frequência rotacional. Outro detalhe que deve ser levado em consideração em situações em que o sensor fique próximo à gaiola do rolamento é a não utilização de valores do sistema parado como referência, pois a gaiola pode influenciar no diagnóstico de problemas.

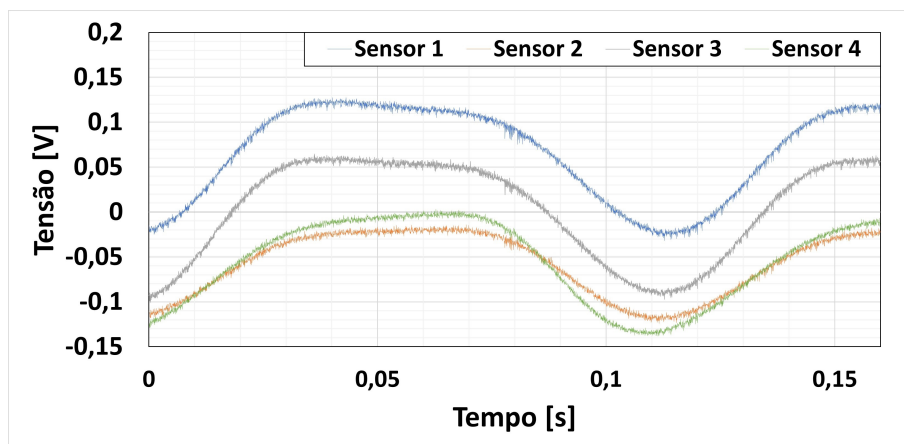
Em resumo, os resultados obtidos conseguiram distinguir características da graxa nova e da graxa com o contaminante proposto. As descobertas destacadas nos resultados obtidos podem ser utilizadas para melhorar o experimento proposto neste capítulo e desenvolver outras pesquisas ou produtos.

Figura 41 – Acúmulo de partículas metálicas em volta do ímã: [1] partículas metálicas no ímã permanente; [2] orifício de saída de graxa; [3] sensor Hall



Fonte: próprio autor.

Figura 42 – Gráfico adquirido do sensor Hall com uma elevada taxa de aquisição



Fonte: próprio autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal explorar e desenvolver um sistema de medição protótipo que possibilite qualificar a graxa de poliureia por meio da degradação térmica ou a contaminação por partículas metálicas. Os experimentos realizados visaram analisar a degradação térmica da graxa com o uso de imagens adquiridas e a contaminação por partículas metálicas, avaliando as características em ambiente controlado e em uma bancada que simula um motor elétrico. Esses fazem parte dos objetivos geral e específicos que foram atingidos conforme os resultados demonstrados no Capítulo 4 e Capítulo 5. As principais conclusões são apresentadas na Seção 6.1 e as sugestões para trabalhos futuros são apresentadas na Seção 6.2, com o objetivo de possibilitar a continuidade do estudo.

6.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

As principais conclusões relacionadas à qualificação de graxa de poliureia com o uso imagens são:

- a) o método para degradar a graxa em ambiente controlado com temperaturas específicas se mostrou eficaz e pode possibilitar o uso em outros lubrificantes;
- b) a câmera utilizada para validar o método foi de baixo custo com uma baixa qualidade do sensor, logo as variações geradas pelas características técnicas de ajuste automático entre imagens capturadas do mesmo objeto nas mesmas condições podem prejudicar a análise dos dados;
- c) o posicionamento da lente da câmera deve ficar o mais próximo possível das partes móveis do rolamento para que seja possível identificar a graxa no momento que ela é expulsa das partes móveis;
- d) o efeito dinâmico da graxa pode fazer com que a graxa seja expulsa para uma região diferente da região da lente, mas a graxa está sempre em movimentação, o que fará que a identificação da graxa degradada ocorra em um intervalo muito inferior ao intervalo de coleta ou de lubrificação que pode chegar a 20 000 h;
- e) a degradação térmica da graxa de poliureia em condições normais de aplicação é lenta e com pouca variação na coloração;
- f) observou-se uma diferença entre cores significativas entre as imagens adquiridas dos padrões de cores pelo espectrofotômetro e pelas câmeras empregadas. Era sabido que a qualidade da câmera prejudicaria o comparativo entre elas e a não alteração de variáveis do hardware limitou a possibilidade de redução de variação;

- g) a utilização de lentes artesanais de vidro atendeu os requisitos de compatibilidade com a graxa, permitiu o uso de solventes para a limpeza e permitiu o reconhecimento de cores;
- h) a utilização de fibra óptica não foi possível por conta do ambiente agressivo mas pode se tornar viável se for aplicada em locais protegidos com baixa temperatura;
- i) por fim, o resultado para qualificar a graxa foi efetivo e comprovado em bancada, o que demonstra que a baixa qualidade da câmera não prejudica significativamente a análise do fenômeno físico.

As principais conclusões relacionadas a qualificação de graxa de poliureia por contaminação de partículas metálicas com o uso de sensor Hall são:

- a) o efeito avaliado nos experimentos iniciais com a graxa em condição estática e as partículas metálicas empacotadas comprovou a eficácia do sistema de medição na detecção de partículas. Entretanto, durante a validação em bancada com as partículas metálicas misturadas na graxa e com escoamento da mistura, houve acúmulo de partículas no ímã permanente, o que gerou uma variação no resultado da medição em relação ao valor esperado;
- b) a resposta linear na detecção do percentual de partículas metálicas identificada na pesquisa bibliográfica se repetiu no experimento desenvolvido;
- c) a posição de fixação do sistema de medição é uma condição essencial para garantir que a medição da concentração de partículas metálicas ocorra com eficácia, pois é necessário que ocorra medição da liberação de partículas sólidas na graxa;
- d) as esferas e a gaiola podem influenciar na aquisição dos dados conforme demonstrado na Figura 42;
- e) a influência de componentes metálicos e a dificuldade em conseguir ímãs permanentes pequenos de procedência confiável dificultaram a execução de experimentos. Não foi gerada uma correlação direta entre a quantidade de partículas e a densidade do fluxo magnético nos testes em bancada, porém era visível que a maior variação de densidade do fluxo magnético ocorreu nos ímãs permanentes que tiveram o maior acúmulo de partículas, conforme demonstrado na Figura 41;
- f) por fim, o resultado obtido na detecção de partículas atendeu os objetivos e apresentou uma configuração de instrumentação de fácil implementação para a análise de partículas metálicas on-line.

6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

As dificuldades encontradas e os conhecimentos adquiridos durante a execução desta dissertação permitem propor sugestões de trabalhos com o objetivo de auxiliar na continuidade dessa linha de pesquisa.

A primeira sugestão é implementar ajustes das variáveis do hardware da câmera com o objetivo de reduzir as variações encontradas entre câmeras. Com isso será possível calcular qual a menor diferença entre imagens adquiridas entre câmeras diferentes de padrões de cores.

A segunda sugestão é a utilização de colorímetros profissionais ou a combinação de câmeras para visão computacional com iluminação específica para cor. Isso possibilitará o ajuste de variáveis do hardware para que as imagens adquiridas de um mesmo padrão apresentem baixa variação.

A terceira sugestão é a de adaptar uma câmera colorida que apresente uma alta resolução em um microscópio que consiga adquirir imagens com qualidade do fluxo de graxa. Com este conjunto sugere-se desenvolver um sistema de aquisição de imagens similar à proposta de detector de partículas de desgaste apresentada por Jia *et al.* (2022). A combinação da câmera colorida com o microscópio possibilitaria a reprodução do estudo da qualificação de graxa por degradação térmica combinado a uma análise de partículas que passam em frente a lente. Com as imagens das partículas adquiridas com a resolução e qualidade adequada, pode-se tentar implementar as lógicas de programação desenvolvidas nas pesquisas executadas para obter o diagnósticos de falhas com a análise da morfologia das partículas.

A quarta é a combinação de câmeras monocromáticas com iluminações especiais que atuam em faixas de espectros específicos. O objetivo desta seria tentar obter diagnóstico preciso de desgaste sem a necessidade da utilização de tratamento de dados elevados.

A quinta sugestão é a avaliação da incerteza de medição dos métodos desenvolvidos.

A última sugestão é isolamento das linhas laterais e traseiras de campo magnético do ímã permanente de modo que a fixação de partículas ocorra apenas na face frontal do ímã. Com isso, pode-se tentar correlacionar a densidade do fluxo magnético com a quantidade massa de partículas de contaminantes metálicos em um protótipo funcional.

REFERÊNCIAS

ABB. **Motors don't just fail...do they?** A guide to preventing failure. [S./], 2015.

Disponível em: https://new.abb.com/docs/librariesprovider53/about-downloads/motors_ebook.pdf?sfvrsn=4. Acesso em: 25 fev. 2021.

ADABI, Jafar; ZARE, Firuz; LEDWICH, Gerard; GHOSH, Arindam; LORENZ, Robert D. Bearing damage analysis by calculation of capacitive coupling between inner and outer races of a ball bearing. *In: IEEE. 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference. [S.l.: s.n.], 2008. P. 903–907.*

AGUIRRE-PABLO, Andres; ALARFAJ, Meshal; LI, Erqiang; HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, José Federico; THORODDSEN, Sigurdur. Tomographic Particle Image Velocimetry using Smartphones and Colored Shadows. **Scientific Reports**, v. 7, p. 3714, jun. 2017.

ALEPHGRAPHICS. **Equações CIE E* (diferença de cor)**. [S./], 2022. Disponível em: <https://www.alephgraphics.com.br/equacoes-cie-%5C%CE%B4e-diferenca-de-cor/>. Acesso em: 2 jul. 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING e MATERIALS. **ASTM D1742-20:2020**: Standard Test Method for Oil Separation from Lubricating Grease During Storage. Pennsylvania, USA, jun. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING e MATERIALS. **ASTM D1831-18:2018**: Standard Test Methods for Roll Stability of Lubricating Grease. Pennsylvania, USA, jul. 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING e MATERIALS. **ASTM D217-21a:2021**: Standard Test Methods for Cone Penetration of Lubricating Grease. Pennsylvania, USA, dez. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING e MATERIALS. **ASTM D2266-01:2015**: Standard Test Method for Wear Preventive Characteristics of Lubricating Grease (Four-Ball Method). Pennsylvania, USA, jun. 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING e MATERIALS. **ASTM D4425-19:2019**: Standard Test Method for Oil Separation from Lubricating Grease by Centrifuging (Koppers Method). Pennsylvania, USA, jul. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING e MATERIALS. **ASTM D5483-21:2022**: Oxidation Induction Time of Lubricating Greases by Pressure Differential Scanning Calorimetry. Pennsylvania, USA, jan. 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING e MATERIALS. **ASTM D566-20:2020**: Standard Test Method for Dropping Point of Lubricating Grease. Pennsylvania, USA, jun. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING e MATERIALS. **ASTM D6184-22:2022**: Standard Test Method for Oil Separation from Lubricating Grease (Conical Sieve Method). Pennsylvania, USA, dez. 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING e MATERIALS. **ASTM D7414-22:2022**: Standard Test Method for Condition Monitoring of Oxidation in In-Service Petroleum and Hydrocarbon Based Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry. Pennsylvania, USA, out. 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING e MATERIALS. **ASTM D7718-11:2019**: Standard Practice for Obtaining In-Service Samples of Lubricating Grease. Pennsylvania, USA, jul. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING e MATERIALS. **ASTM D942-19:2019**: Standard Test Method for Oxidation Stability of Lubricating Greases by the Oxygen Pressure Vessel Method. Pennsylvania, USA, dez. 2019.

AZEVEDO, Eduardo; CONCI, Aura. **Computação gráfica: teoria e prática**. [S.l.]: Elsevier, 2003.

BADER, N; FURTMANN, A; TISCHMACHER, H; POLL, G. Capacitances and lubricant film thicknesses of grease and oil lubricated bearings. *In*: STLE Annual Meeting & Exhibition. [S.l.: s.n.], 2017.

BARDEN PRECISION BEARINGS. **Bearing failure: Causes and cures**. [S.l.], 2008.

BAZURTO, Alvaro Jose; QUISPE, Enrique Ciro; MENDOZA, Rosaura Castrillon. Causes and failures classification of industrial electric motor. *In*: IEEE. 2016 IEEE ANDESCON. [S.l.: s.n.], 2016. P. 1–4.

BECKER, Pablo Borges. **Troca de motores como indutora de competitividade na indústria brasileira**. [S.l.: s.n.], 2017.

- BENDIABDELLAH, Azzedine; BENOZZA, Nourredine; TOUMI, Djillali. Cage motor faults detection algorithm using speed estimation and current analysis. **Acta Electrotechnica et Informatica**, v. 7, n. 2, p. 1–6, 2007.
- BERNARDES, Yuri de Andrade. **A importância da técnica ferrográfica no monitoramento do desgaste da máquina**. 2011. Centro Universitário do Sul de Minas.
- BRITO, Jorge Nei; LAMIM FILHO, Paulo Cezar Monteiro; CHRISTOFORO, André Luis. Estudo de falhas em rolamentos provenientes de tensões e correntes parasitas utilizando o sensor Shaft Probe. **Revista Vértices**, v. 13, n. 3, p. 143–156, 2011.
- BUBERT, Andreas; ZHANG, Jiakun; DE DONCKER, Rik W. Modeling and measurement of capacitive and inductive bearing current in electrical machines. *In*: IEEE. 2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP). [S.l.: s.n.], 2017. P. 1–6.
- BUCKLEY, Robert R; GIORGIANNI, Edward J. CIELAB for color image encoding (CIELAB, 8-bit; domain and range, uses). **Encyclopedia of color science and technology**, Springer New York, NY, v. 14, n. 1, p. 1–9, 2015.
- CAMPANHA, Marcos Vilodres; SINATORA, Amilton. **Estudo sobre a vida útil de rolamentos fixos de uma carreira de esferas**. [S.l.: s.n.], 2007.
- CANN, PM. Grease degradation in a bearing simulation device. **Tribology International**, Elsevier, v. 39, n. 12, p. 1698–1706, 2006.
- CHAIYACHIT, C; SATTHAMSAKUL, S; SRIRATANA, W; SUESUT, T. Hall effect sensor for measuring metal particles in lubricant. *In*: INTERNATIONAL Multi Conference of Engineers and Computer Scientists. [S.l.: s.n.], 2012. P. 894–897.
- CULBERT, Ian; LETAL, John. Signature analysis for online motor diagnostics: Early detection of rotating machine problems prior to failure. **IEEE Industry applications magazine**, IEEE, v. 23, n. 4, p. 76–81, 2017.
- ELFORJANI, Mohamed. Diagnosis and prognosis of slow speed bearing behavior under grease starvation condition. **Structural Health Monitoring**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 17, n. 3, p. 532–548, 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2023: Ano base 2022**. [S.l.]: EPE, 2023. https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_Sintese_2023_PT.pdf.

ESTELLER, Mauricio Sergio; LANNES, Suzana Caetano da Silva. Parâmetros complementares para fixação de identidade e qualidade de produtos panificados. **Food Science and Technology**, SciELO Brasil, v. 25, p. 802–806, 2005.

EXXON MOBIL CORPORATION. **Mobil Industrial: Product Guide**. [S.l.], 2015. Disponível em: <https://cdn.lubefinder.net/media/attachments/m/o/mobil-industrial-product-guide-2015.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2023.

GARRY, Michael C; BOWMAN, John. FT-IR analysis of used lubricating oils—general considerations. **Thermo Fisher Scientific**, 2007.

GONÇALVES, Valdeci Donizete. **Desenvolvimento de um sistema de análise de imagem para quantificação do tamanho e distribuição de partículas de desgaste**. 2009. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista (Unesp).

GRACIOLA, Clayton Luiz; GOEDEL, Alessandro. Classificador neural aplicado na análise da lubrificação dos rolamentos de um motor de indução, 2011.

GRUPOMULTI. **WEBCAM STANDARD 480P 30FPS LED NOTURNO C/ BOTÃO SNAPSHOT MICROFONE CONEXÃO USB PRETO - WC045**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://suporte.multilaser.com.br/produtos/webcam-standard-480p-led-noturno-mic-pto-wc045>.

HOLDSCHIP, Rodrigo; MARAR, João Fernando. Importância do gerenciamento de cores para o design gráfico, 2007.

HONEYWELL INTERNATIONAL INC. **Hall Effect Sensing and Application**. [S.l.: s.n.], 2023. <http://denethor.wlu.ca/pc300/projects/sensors/hallbook.pdf>. Acessado: (07/10/2023).

HUANG, Lu; GUO, Dan; CANN, PM; WAN, George TY; WEN, Shizhu. Thermal oxidation mechanism of polyalphaolefin greases with lithium soap and diurea thickeners: effects of the thickener. **Tribology Transactions**, Taylor & Francis, v. 59, n. 5, p. 801–809, 2016.

IMASHOP. **Ficha técnica**. [S.l.: s.n.], 2023. <https://www.imashop.com.br/ima-neodimio-n35-disco-8x3-mm-forca-aprox-1-1kg-d0803p/p>. Acesso em: 16 jun. 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 281:2007**: Rolling bearings - Dynamic load ratings and rating life. Geneva, CH, fev. 2007.

INTHAWATKUL, Itti; SRIRATANA, Witsarut; SATTHAMSAKUL, Sutham. Measurement of metal particles in oil lubricant using hall effect sensor under temperature conditions. *In*: IEEE. 2017 56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE). [S.l.: s.n.], 2017. P. 731–735.

ISO. **ISO 15243: Rolling bearings - Damage and Failures - Terms, characteristics and causes**. Standard. Geneva, CH, mar. 2017.

JEFFALI, Faouaz; KIHHEL, BEL; NOUGAOUI, Abdelkarim; DELAUNOIS, Fabienne. Monitoring and diagnostic misalignment of asynchronous machines by infrared thermography. **Journal of Materials and Environmental Science**, v. 6, n. 4, p. 1192–1199, 2015.

JIA, Ran; WANG, Liyong; ZHENG, Changsong; CHEN, Tao. Online wear particle detection sensors for wear monitoring of mechanical equipment-A review. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, 2022.

JIABAO, Pan; YANHAI, Cheng; JINYONG, Yang. Effect of heat treatment on the lubricating properties of lithium lubricating grease. **RSC Advances**, Royal Society of Chemistry, v. 5, n. 72, p. 58686–58693, 2015.

JOSHI, Abhishek. **Electrical Characterisations of Bearings**. 2019. Tese (Doutorado) – Chalmers University of Technology.

KHANJANI, Majid; EZOJI, Mehdi. Electrical fault detection in three-phase induction motor using deep network-based features of thermograms. **Measurement**, Elsevier, v. 173, p. 108622, 2021.

KOWALIK, Gretchen; II, LLA; JANOSKY, Richard. Advancements in grease sampling and analysis using simple screening techniques. **MRG Navigator**, 2016.

LAGHARI, Mohammad S; MEMON, Qurban A; KHUWAJA, Gulzar A. Knowledge based wear particle analysis. **International Journal of Computer and Information Engineering**, v. 1, n. 12, p. 4115–4119, 2007.

LI, Zhen; MA, Xiping; DONG, Kaisong; SHEN, Weicheng; ZHAO, Wei. Study and discussion on the problems of shaft voltage and bearing current in wind power generation system. *In*: 2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. [S.l.: s.n.], 2014. P. 1696–1700.

LIMA, Lenilde Mérgia Ribeiro. **Estudo da degradação térmica oxidativa de graxas lubrificantes**. 2009. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Paraíba João Pessoa.

LIU, Guang-Hai; YANG, Jing-Yu. Image retrieval based on the texton co-occurrence matrix. **Pattern Recognition**, Elsevier, v. 41, n. 12, p. 3521–3527, 2008.

LUGT, Piet M. A review on grease lubrication in rolling bearings. **Tribology Transactions**, Taylor & Francis, v. 52, n. 4, p. 470–480, 2009.

LUGT, Piet M. **Grease lubrication in rolling bearings**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014.

LY, Bao Chau K; DYER, Ethan B; FEIG, Jessica L; CHIEN, Anna L; DEL BINO, Sandra. Research techniques made simple: cutaneous colorimetry: a reliable technique for objective skin color measurement. **Journal of Investigative Dermatology**, Elsevier, v. 140, n. 1, p. 3–12, 2020.

MAGADÁN, Luis; SUÁREZ, Francisco J; GRANDA, Juan C; DELACALLE, Francisco J; GARCIÉA, Daniel F. A Robust health prognostics technique for failure diagnosis and the remaining useful lifetime predictions of bearings in electric motors. **Applied Sciences**, MDPI, v. 13, n. 4, p. 2220, 2023.

MAGNETICS, SDM. **The Magnetic Field Strength of Permanent Magnet**. [S.l.: s.n.], 2017. Disponível em: <https://www.magnet-sdm.com/2017/08/01/magnetic-field-strength-permanent-magnet/>. Acesso em: 16 jun. 2023.

MANG, Theo; DRESEL, Wilfried. **Lubricants and lubrication**. [S.l.]: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2007.

MARIS, Pierre; KADYSZEWSKI, R. **Improved quantitative debris monitoring capability**. [S.l.], abr. 1987.

MERIZALDE, Yuri; HERNÁNDEZ-CALLEJO, Luis; DUQUE-PEREZ, Oscar. State of the art and trends in the monitoring, detection and diagnosis of failures in electric induction motors. **Energies**, MDPI, v. 10, n. 7, 2017.

MERKER, RL; ZISMAN, u WA. Extreme temperature lubricating greases. **Industrial & Engineering Chemistry**, ACS Publications, v. 41, n. 11, p. 2546–2551, 1949.

MIETTINEN, Juha. **Condition monitoring of grease lubricated rolling bearings by acoustic emission measurements**. 2000. Tese (Doutorado) – Tampere University of Technology.

MIETTINEN, Juha; ANDERSSON, Peter. Acoustic emission of rolling bearings lubricated with contaminated grease. **Tribology International**, Elsevier, v. 33, n. 11, p. 777–787, 2000.

MOBIL. **Encontre uma graxa industrial Mobil™ para cada aplicação**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.mobilindustrial.com.br/media/3500/mobil-tabela-de-graxas2020.pdf>.

MOKRZYCKI, Wojciech; TATOL, Maciej. Color difference Delta E - A survey. **Machine Graphics and Vision**, v. 20, p. 383–411, abr. 2011.

NAKA, Michiharu; ITO, Hiroyuki; KOIZUMI, Hideki; SUGIMORI, Yôichirô. Effects of urea grease composition on the seizure of ball bearings. **Tribology Transactions**, v. 41, n. 3, p. 387–391, 1998.

NI. **How to extract color planes and grayscale images using LabVIEW and VDM: Code and Documents**. [S.l.: s.n.], 2017. Disponível em:

<https://forums.ni.com/t5/Example-Code/How-to-extract-color-planes-and-grayscale-images-using-LabVIEW/ta-p/3493017>. Acesso em: 20 abr. 2017.

NI. **Image Processing with NI Vision Development Module**. [S.l.: s.n.], 2022.

Disponível em:

<https://www.ni.com/pt-br/shop/data-acquisition-and-control/add-ons-for-data-acquisition-and-control/what-is-vision-development-module/image-processing-with-ni-vision-development-module.html>. Acesso em: 2 jul. 2023.

NI. **NI-9239 Specifications**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em:

<https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-9239-specs/page/specs.html>.

NI. **RGB to CIE L*a*b Conversion**. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z000000g2P2SAI&l=pt-BR>.

Acesso em: 2 jul. 2023.

NUNEZ, JAR; VELAZQUEZ, LM; HERNANDEZ, LAM; TRONCOSO, RJR; OSORNIO-RIOS, RA. Low-cost thermographic analysis for bearing fault detection on induction motors. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v. 75, n. 2, p. 412–415, 2016.

PAULA FILHO, Pedro Luiz de; TUSSET, Ângelo Marcelo. Análise de cor para o reconhecimento de espécies florestais. **Ágora: revista de divulgação científica**, v. 16, 2esp., p. 330–341, 2009.

PHUANGSAIJAI, Nutthatida; JAKMUNEE, Jaroon; KITTIWACHANA, Sila. Investigation into the predictive performance of colorimetric sensor strips using RGB, CMYK, HSV, and CIELAB coupled with various data preprocessing methods: a case study on an analysis of water quality parameters. **Journal of Analytical Science and Technology**, v. 12, n. 1, p. 1–16, 2021.

RAADNUI, Surapol. Magnetic chip detector(MCD) wear particle analysis. Acessado: (13/09/2023).

REVEDROLAMENTOS. **Rolamentos**. [S.l.: s.n.], set. 2023.

<https://revedrolamentos.com.br/copia-produtos-1>. Acessado: (13/09/2023).

REZASOLTANI, Asghar; KHONSARI, Michael M. On monitoring physical and chemical degradation and life estimation models for lubricating greases. **Lubricants**, MDPI, v. 4, n. 3, p. 34, 2016.

RUPF, Mario Guilherme Silva. **Análise de desgaste do sistema de engrenagem/rolamento de um redutor via inspeção vibracional e por ultrassom**. [S.l.: s.n.], 2018.

SALOMONSSON, Linda; STANG, Gunnar; ZHMUD, Boris. Oil/thickener interactions and rheology of lubricating greases. **Tribology Transactions**, Taylor & Francis, v. 50, n. 3, p. 302–309, 2007.

SANTANA, Leonardo; ALVES, Jorge Lino; SABINO NETTO, Aurélio da Costa; MERLINI, Claudia. Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, 2018.

SARUHAN, Hamit; SARIDEMIR, S; QICEK, A; UYGUR, I. Vibration analysis of rolling element bearings defects. **Journal of applied research and technology**, v. 12, n. 3, p. 384–395, 2014.

SATTHAMSAKUL, S.; SRIRATANA, W.; SRIRATANA, L. Empirical study on influences of electromagnetic field on Hall Effect sensor for analysing oil lubricant deterioration. *In*: IOP PUBLISHING, 1. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. [S.l.: s.n.], 2020. v. 895, p. 012015.

SHIRATA, Takuya. **Schmieröl-verschleissensor**. Europa, 9 out. 2013. EP2647978A1.

SKF. **Kit de Teste para Graxa SKF: TKG T 1**. [S.l.], 2009. Disponível em: https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d196800a283e/pdf_preview_medium/0901d196800a283e_pdf_preview_medium.pdf. Acesso em: 22 jun. 2023.

SKF. **Lubrificadores automáticos por ponto único eletromecânicos: SKF system 24**. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://www.skf.com/br/products/lubrication-management/lubricators/electro-mechanical-single-point-automatic-lubricators/>. Acesso em: 27 jun. 2021.

SKF. **Produtos SKF para Manutenção e Lubrificação: Prolongando o ciclo da vida útil dos rolamentos**. Prolongando o ciclo da vida útil dos rolamentos. [S.l.], 2019. Disponível em: https://www.skf.com/binaries/pub45/Images/0901d19680063bd7-03000_PTBR_tcm_45-163650.pdf#cid-163650/. Acesso em: 25 fev. 2021.

SKF. **Rolamentos de esferas**. [S.l.], out. 2015. Disponível em: <https://catalogos.abecom.com.br/catalogos-skf/1-Catalogo-Geral-Rolamentos.pdf/>. Acesso em: 1 out. 2015.

SKYBRARY. **Magnetic Chip Detector (MCD)**. [S.l.: s.n.], set. 2023. <https://skybrary.aero/articles/magnetic-chip-detector-mcd>. Acessado: (11/09/2023).

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **SAE J2695:2005**: Heavy Duty Vehicle Lubricating Greases. Pennsylvania, USA, ago. 2005.

SÜSSTRUNK, Sabine; BUCKLEY, Robert; SWEN, Steve. Standard RGB color spaces. *In*: PROC. IS&T/SID 7th Color Imaging Conference. [S.l.: s.n.], 1999. v. 7, p. 127–134.

TAKUYA SHIRATA, Yasuhito IDA. **Schmiermittelalterungssensor**. Europa, 27 out. 2014. EP3062084B1.

TANDON, N; RAMAKRISHNA, KM; YADAVA, GS. Condition monitoring of electric motor ball bearings for the detection of grease contaminants. **Tribology international**, Elsevier, v. 40, n. 1, p. 29–36, 2007.

TCHAKOUA, Pierre; WAMKEUE, René; OUHROUCHE, Mohand; SLAOUI-HASNAOUI, Fouad; TAMEGHE, Tommy Andy; EKEMB, Gabriel. Wind turbine condition monitoring: State-of-the-art review, new trends, and future challenges. **Energies**, Molecular Diversity Preservation International (MDPI), v. 7, n. 4, p. 2595–2630, 2014.

TEXAS INSTRUMENT. **DRV5055 Ratiometric Linear Hall Effect Sensor**. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv5055.pdf?HQS=dis-dk-null-digikeymode-dsf-pf-null-ww&ts=1641231273160>. Acesso em: 16 jun. 2022.

TORU TAKAHASHI, Kazunari Maerda. **Lubricant deterioration detector, and bearing with sensor**. Japão, 11 out. 2007. JP2007263801.

TREVISAN, Renato. **Utilização de medições ultrassônicas de vibração e da emissão acústica para implantação de lubrificação base-condição visando a prevenção de falhas em mancais de rolamentos**. [S.l.: s.n.], 2011.

VÄHÄOJA, Pekka. **Oil analysis in machine diagnostics**. [S.l.: s.n.], 2006.

VAN HOOREWEDER, Brecht; MOENS, David; BOONEN, Rene; SAS, Paul. On the development of three instructive test rigs for efficiency determination of gearboxes and fault diagnosis of joints, roller bearings and gears. *In*.

WANG, Kaiqiang; LIU, Xiaoqin; WU, Xing; ZHU, Zhenjun. Condition monitoring on grease lubrication of rolling bearing using AE technology. *In*: 2017 9th International

Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). [S.l.: s.n.], 2017. P. 595–599.

WEG. **Helimax**. [S.l.: s.n.]. https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Redutores-de-Velocidade/Industriais/Helimax-/Helimax-/p/MKT_WMO_BR_GEARBOX_HELIMAXMONOBLOC. Acessado: (17/09/2023).

WEG. **W22: Motor Trifásico Catálogo Comercial**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hb7/h10/WEG-w22-motor-trifasico-50025536-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2023.

WEIDLICH, Felipe. **Avaliação da lubrificação de rolamentos de motores elétricos por ultrassom**. [S.l.: s.n.], 2009.

WU, Hongkun; KWOK, Ngai Ming; LIU, Sanchi; WU, Tonghai; PENG, Zhongxiao. A prototype of on-line extraction and three-dimensional characterisation of wear particle features from video sequence. **Wear**, Elsevier, v. 368, p. 314–325, 2016.

WU, TongHai; WU, HongKun; DU, Ying; PENG, ZhongXiao. Progress and trend of sensor technology for on-line oil monitoring. **Science China Technological Sciences**, Springer, v. 56, p. 2914–2926, 2013.

WU, Yu; ZHANG, Hongpeng; ZENG, Lin; CHEN, Haiquan; SUN, Yuqing. Determination of metal particles in oil using a microfluidic chip-based inductive sensor. **Instrumentation Science & Technology**, Taylor & Francis, v. 44, n. 3, p. 259–269, 2016.

YOUNUS, Ali M.D.; YANG, Bo-Suk. Intelligent fault diagnosis of rotating machinery using infrared thermal image. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 2, p. 2082–2091, 2012.

ZHU, Xiaoliang; ZHONG, Chong; ZHE, Jiang. A high sensitivity wear debris sensor using ferrite cores for online oil condition monitoring. **Measurement Science and Technology**, IOP Publishing, v. 28, n. 7, p. 075102, 2017.