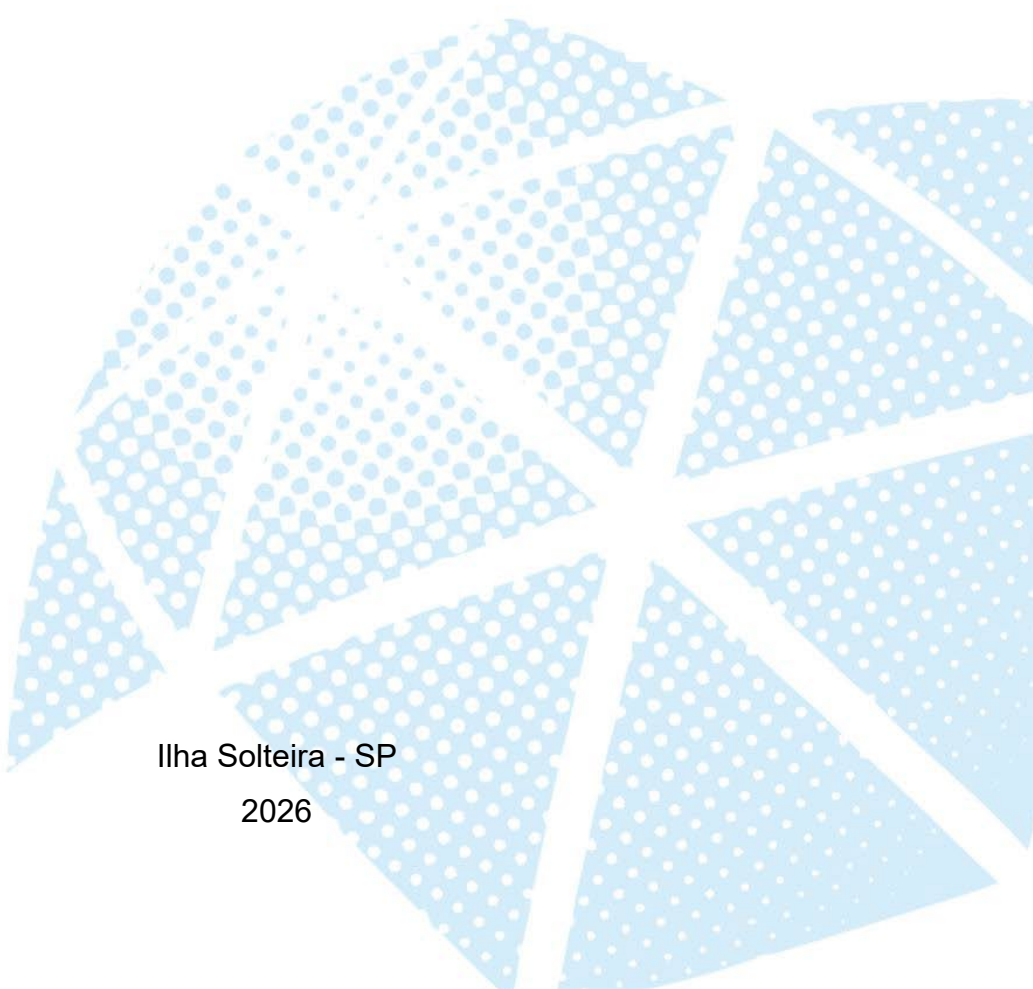


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

EDUARDO MOREIRA BEZERRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR MULTIFUNCIONAL LCR PARA
DETECÇÃO ONLINE DE CONTAMINANTES EM ÓLEO LUBRIFICANTE E
FLUIDOS**

Ilha Solteira - SP
2026



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

EDUARDO MOREIRA BEZERRA

**DESENVOLVIMENTO DE SENSOR MULTIFUNCIONAL LCR PARA DETECÇÃO
ONLINE DE CONTAMINANTES EM ÓLEO LUBRIFICANTE E FLUIDOS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, para obtenção do título de Grau acadêmico Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Ciências Mecânicas - Sistemas Dinâmicos.

Orientador: Prof. Dr. Aparecido Carlos Gonçalves.

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Augusto Assunção Sanches

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B574d Bezerra, Eduardo Moreira.
Desenvolvimento de um sensor multifuncional LCR para detecção online de contaminantes em óleo lubrificante e fluidos / Eduardo Moreira Bezerra. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
123 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Mecânicas, 2026

Orientador: Aparecido Carlos Gonçalves

Coorientador: Marcelo Augusto Assunção Sanches

Inclui bibliografia

1. Sensores LCR. 2. Óleo lubrificante. 3. Monitoramento em tempo real. 4. Manutenção preditiva.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O projeto propõe um sensor multifuncional, compacto e de baixo custo para detecção em tempo real de contaminantes em óleos lubrificantes, combinando medidas de indutância, capacitância e resistência. A solução de sensoriamento eletromagnético e a manutenção preditiva, aumentando a segurança e confiabilidade de ativos críticos. Promove inovação e economia com menor custo de manutenção, redução de falhas e desperdício de óleo. Fortalece a formação técnica e científica em instrumentação e análise de sinais. Estimula a cultura de segurança e uso de dados. Contribui à internacionalização e atende demandas industriais locais e nacionais. Favorece o desenvolvimento sustentável ao ampliar a vida útil de equipamentos e reduzir impactos ambientais. Consolida um núcleo de pesquisa em manutenção 4.0 com potencial para publicações, patentes e transferência tecnológica.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The project proposes a multifunctional, compact, and low-cost sensor for real-time detection of contaminants in lubricating oils, combining inductance, capacitance, and resistance measurements. The solution electromagnetic sensing and predictive maintenance, enhancing the safety and reliability of critical assets. It promotes innovation and economic efficiency by reducing maintenance costs, failures, and oil waste. It strengthens technical and scientific training in instrumentation and signal analysis. It fosters a culture of safety and data-driven decision-making. The project contributes to internationalization and meets local and national industrial demands. It supports sustainable development by extending equipment lifespan and reducing environmental impact. Finally, it consolidates a research hub in Maintenance 4.0 with potential for publications, patents, and technology transfer.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

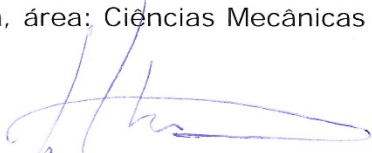
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR MULTIFUNCIONAL LCR PARA DETECÇÃO ONLINE DE CONTAMINANTES EM ÓLEO LUBRIFICANTE E FLUIDOS

AUTOR: EDUARDO MOREIRA BEZERRA

ORIENTADOR: APARECIDO CARLOS GONCALVES

COORDINADOR: MARCELO AUGUSTO ASSUNÇÃO SANCHES

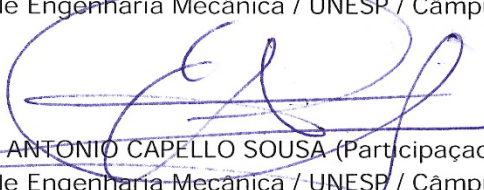
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, área: Ciências Mecânicas pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. APARECIDO CARLOS GONCALVES (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Mecânica / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS



Prof. Dr. MARCIO ANTONIO BAZANI (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Mecânica / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS



Prof. Dr. EDSON ANTONIO CAPELLO SOUSA (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Mecânica / UNESP / Câmpus de Bauru - FEB

Ilha Solteira, 29 de julho de 2026.

Dedico este trabalho à minha esposa Fabiana Dias Moreira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força e sabedoria para alcançar meus objetivos.

Aos meus pais, Edmundo Moreira Bezerra (*in memoriam*) e Nair Julia de Souza Bezerra, pelo amor incondicional, pela dedicação e por todos os esforços que fizeram por mim. Que seus nomes fiquem eternizados nestas páginas, pois a importância de vocês em minha vida é única e insubstituível.

À minha irmã Ednalva Moreira Bezerra (*in memoriam*), que desde minha infância sempre me incentivou a estudar e a seguir em busca do sucesso.

À minha esposa Fabiana Aparecida Dias, pelo amor verdadeiro e pelo apoio em todas as minhas decisões.

Aos meus filhos, Mikhael e Miguel, minha maior inspiração e o mais precioso motivo de orgulho e realização.

Ao meu amigo Bruno Soares, pelas valiosas orientações que me ajudaram a enfrentar o mestrado com confiança e determinação.

Aos colegas do GPI da Usina Termelétrica de Três Lagoas Dhonatan Teixeira, Marcio Yamassaki e Marcelo Couto pela amizade, pelo apoio e pelo aprendizado construído ao longo dos anos.

Ao Ricardo Ferreira, pelo apoio na coleta das amostras essenciais para o desenvolvimento deste estudo.

Agradeço ao meu orientador, Aparecido Carlos Gonçalves (Cido), e ao meu coorientador, Marcelo Augusto Assunção Sanches, pelo apoio, disponibilidade e orientação, fundamentais para o desenvolvimento e a consolidação desta pesquisa..

Expresso minha gratidão à Usina Termelétrica de Três Lagoas pela disponibilização dos dados essenciais ao desenvolvimento deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Adicionalmente, este trabalho contou com financiamento da CAPES no âmbito do Processo nº 88887.114942/2025-00.

Este trabalho não recebeu apoio financeiro, auxílio ou bolsa da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

“É preciso ter o caos dentro de si para gerar uma
estrela dançante” (Nietzsche, 1885).

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação de um sensor multifuncional de custo acessível, destinado à detecção, em tempo real, de contaminantes em óleos lubrificantes aplicados a equipamentos industriais. O dispositivo integra três métodos de detecção de grandezas elétricas, baseados em resistência, indutância e capacitância, permitindo a identificação simultânea de partículas metálicas ferromagnéticas e não ferromagnéticas, bem como de gotículas de água e bolhas de ar. Tal abordagem, fundamentada em múltiplos princípios físicos, possibilita o monitoramento contínuo das condições do lubrificante, fornecendo informações sobre o desgaste e a degradação dos componentes internos das máquinas. Realizou-se análise laboratorial com contaminação artificial de óleo mineral de grau farmacêutico por partículas de ferro e cobre, utilizando malha de granulometria 325 (45 μm), com o objetivo de avaliar o desempenho do sensor por meio de um circuito RL devidamente dimensionado e instrumentado com osciloscópio e gerador de frequência. Os resultados evidenciaram limitações na detecção de sinais, indicando que a resposta do sensor é condicionada ao tamanho das partículas, cuja variação dimensional se reflete na amplitude do sinal, sem implicar a determinação direta de suas dimensões. O sensor foi avaliado a partir de amostras de óleo lubrificante provenientes de quatro equipamentos de uma usina termelétrica: turbina a gás, turbina a vapor, bomba de alimentação da caldeira e redutor de velocidade. As análises laboratoriais, conduzidas conforme normas internacionais (ISO 4406, SAE AS4059, NAS 1638, ASTM D-5185, ASTM D-1744 e NBR 16358), indicaram elevada concentração de partículas ferrosas e não ferrosas na turbina a gás e na bomba de alimentação, detectadas pelos métodos resistivo e indutivo, o que sinaliza risco de desgaste acelerado e falhas prematuras. Por sua vez, as amostras da turbina a vapor e do redutor apresentaram contaminação moderada por água, associada à oxidação e à degradação do lubrificante, identificada por variações de capacitância. A incorporação de um anel de aço silício a estrutura do sensor proporcionou aumento da relação sinal-ruído (*SNR*), favorecendo maior consistência e estabilidade dos sinais obtidos. De modo geral, os resultados experimentais demonstram que o sensor proposto apresenta desempenho satisfatório, embora com limitações, evidenciando sensibilidade adequada e resposta estável. O desenvolvimento deste dispositivo constitui um avanço técnico-científico relevante para o monitoramento preditivo de sistemas lubrificados, oferecendo uma alternativa economicamente viável e de fácil integração a equipamentos industriais. Ademais, a solução contribui para o aumento da confiabilidade operacional, a redução de custos de manutenção e a mitigação de impactos ambientais associados ao descarte prematuro de lubrificantes, em consonância com práticas de manutenção preditiva, eficiência energética e desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: sensores LCR; óleo lubrificante; monitoramento em tempo real; manutenção preditiva.

ABSTRACT

This study presents the development and validation of a cost-effective multifunctional sensor designed for the real-time detection of contaminants in lubricating oils used in industrial equipment. The device integrates three electrical detection methods based on resistance, inductance, and capacitance, enabling the simultaneous identification of ferromagnetic and non-ferromagnetic metallic particles, as well as water droplets and air bubbles. This approach, based on multiple physical principles, enables continuous monitoring of lubricant conditions and provides information on the wear and degradation of internal machine components. Laboratory tests were conducted using pharmaceutical-grade mineral oil artificially contaminated with iron and copper particles passing through a 325-mesh sieve (45 μm) to evaluate sensor performance using a properly designed RL circuit instrumented with an oscilloscope and a frequency generator. The results revealed limitations in signal detection, indicating that the sensor response is dependent on particle size, with dimensional variations reflected in signal amplitude, without implying direct measurement of particle dimensions. The sensor was evaluated using lubricating oil samples collected from four pieces of equipment at a thermoelectric power plant: a gas turbine, a steam turbine, a boiler feed pump, and a speed reducer. Laboratory analyses conducted in accordance with international standards (ISO 4406, SAE AS4059, NAS 1638, ASTM D-5185, ASTM D-1744, and NBR 16358) indicated high concentrations of ferrous and non-ferrous particles in the gas turbine and boiler feed pump samples, detected by the resistive and inductive methods, suggesting a risk of accelerated wear and premature failure. In contrast, samples from the steam turbine and speed reducer exhibited moderate water contamination associated with oxidation and lubricant degradation, identified through capacitance variations. The incorporation of a silicon steel ring into the sensor structure increased the signal-to-noise ratio (*SNR*), resulting in greater consistency and stability of the acquired signals. Overall, the experimental results demonstrate that the proposed sensor provides satisfactory performance, although with some limitations, exhibiting adequate sensitivity and stable response. The development of this device represents a relevant technical and scientific advancement in the predictive monitoring of lubricated systems, providing an economically viable alternative that can be readily integrated into industrial equipment. Furthermore, the proposed solution contributes to improved operational reliability, reduced maintenance costs, and mitigation of environmental impacts associated with the premature disposal of lubricants, in alignment with predictive maintenance practices, energy efficiency, and sustainable development.

Keywords: LCR sensors; lubricating oil; real-time monitoring; predictive maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da manutenção industrial.....	20
Figura 2 – Interações entre o tamanho das partículas de desgaste, sua concentração e as condições de operação da máquina.....	22
Figura 3 – Registro fotográfico de uma central termelétrica.....	25
Figura 4 – Equipamentos destaque de ciclo combinado Brayton/Rankine.....	27
Figura 5 – Caracterização da distribuição do campo elétrico no modelo de capacitor equivalente.....	36
Figura 6 – Topologia simplificada do circuito oscilador <i>Clapp</i>	42
Figura 7 – Módulo e central de lubrificação da turbina a gás.....	47
Figura 8 – Módulo/ compartimento e central de lubrificação da turbina a vapor.....	48
Figura 9 – Unidade de Lubrificação Forçada (ULF) da bomba centrífuga de multiestágio KSB (horizontal) de alimentação de caldeira.....	49
Figura 10 – Ponto de coleta de óleo (lado externo) e o redutor de engrenagens helicoidais com redução de 12,5 para 1, modelo SUMITOMO SFC055R2GS RRF (lado interno).....	50
Figura 11 – Arquitetura e configuração do sensor multifuncional.....	52
Figura 12 – Dimensões do sensor.....	53
Figura 13 – Representação das regiões de detecção associadas a sensores indutivos empregando (a) bobina plana e (b) bobina plana acoplada a um anel de chapa de aço silício.....	53
Figura 14 – Sensor preliminar projetado para aplicações experimentais.....	54
Figura 15 – Diagrama operacional do sistema de detecção.....	54
Figura 16 – Indução no cabo.....	56
Figura 17 – Especificação do capacitor para o circuito LC.....	56
Figura 18 – Medidor LCR de precisão E4980A Agilent/Keysight de 20 Hz a 2 MHz.....	59
Figura 19 – Sistema de detecção na prática.....	60
Figura 20 – Partículas de ferro e cobre correspondente à malha 325 (abertura entre 40 μ m e 44 μ m) e determinação da massa por meio de balança de alta precisão ...	61
Figura 21 – Amostras de 100 mL de óleo mineral puro (10,8 cSt): óleo puro (a), óleo com partículas de ferro 0,05% (b) e 0,1% (c), óleo com partículas de cobre 0,05% (d) e 0,1% (e) e mistura binária de cobre 0,05% e ferro 0,05% (f).....	62

Figura 22 – Estrutura construtiva e princípio de funcionamento do sistema eletrônico de detecção.....	62
Figura 23 – Osciloscópio gerando o sinal elétrico do óleo mineral contaminado	63
Figura 24 – Sistema de medição de partículas (circuito LC) em óleo mineral puro...	64
Figura 25 – Circuito com oscilador <i>Clapp</i> com valores sugeridos	66
Figura 26 – Amostras de óleo coletadas dos equipamentos da termelétrica	67
Figura 27 – Laboratório de análise de óleo da empresa Infralub	69
Figura 28 – Sinais experimentais obtidos por meio do sensor LC acoplado à chapa de aço silício utilizando amostra de óleo mineral puro	70
Figura 29 – Sinais experimentais obtidos por meio do sensor LC acoplado à chapa de aço silício utilizando amostras de óleo mineral puro artificialmente contaminadas com partículas de cobre: (a) concentração de 0,05% e (b) concentração de 0,1%	71
Figura 30 – Sinais experimentais obtidos por meio do sensor LC acoplado à chapa de aço silício utilizando amostras de óleo mineral puro artificialmente contaminadas com partículas de ferro: (a) concentração de 0,05% e (b) concentração de 0,1%.....	71
Figura 31 – Sinais experimentais do sensor LC com chapa de aço silício utilizando óleo mineral contaminado com partículas de ferro e cobre a 0,05%.....	72
Figura 32 – Detecção de partículas sólidas em óleo (ISO 32) de turbina a gás com sensores com e sem aço silício: detecção indutiva (a) e detecção resistiva (b) para partículas ferrosas; detecção indutiva (c) e detecção resistiva (d) para partículas não ferrosas	80
Figura 33 – Comparação da detecção de partículas sólidas em óleo (ISO 32) da bomba de alimentação de caldeira com sensores com e sem anel de aço silício: detecção indutiva (a) e detecção resistiva (b) para partículas ferrosas.....	81
Figura 34 – Sinais capacitivos associados à presença de partículas em óleo lubrificante (ISO 32) de turbina a vapor: detecção de água (a) e de bolhas de ar (b)	81
Figura 35 – Sinais capacitivos referentes à presença de partículas em óleo lubrificante (ISO 320) do redutor: detecção de água (a) e de bolhas de ar (b).....	82
Figura 36 – Sinal indutivo com filtro passa-baixa para partículas ferrosas da amostra da turbina a gás.....	83
Figura 37 – Sinal resistivo com filtro passa-baixa para partículas ferrosas da amostra da turbina a gás.....	83

Figura 38 – Sinal indutivo com filtro passa-baixa para partículas não-ferrosas da amostra da turbina a gás.....	84
Figura 39 – Sinal resistivo com filtro passa-baixa para partículas não-ferrosas da amostra da turbina a gás.....	85
Figura 40 – Sinal indutivo com filtro passa-baixa para partículas ferrosas da amostra da bomba de alimentação de caldeira.....	85
Figura 41 – Sinal resistivo com filtro passa-baixa para partículas ferrosas da amostra da bomba de alimentação de caldeira.....	86
Figura 42 – Sinal capacitivo com filtro passa-baixa para partículas de água da amostra de óleo da turbina a vapor.....	86
Figura 43 – Sinal capacitivo com filtro passa-baixa para partículas de ar da amostra de óleo da turbina a vapor.....	87
Figura 44 – Sinal capacitivo com filtro passa-baixa para partículas de água da amostra de óleo do redutor da torre de resfriamento	87
Figura 45 – Sinal capacitivo com filtro passa-baixa para partículas de ar da amostra de óleo do redutor da torre de resfriamento	88
Figura 46 – Lâmina de ferrografia analítica contendo partículas contaminantes provenientes da amostra de óleo da turbina a gás GE 6FA.....	90
Figura 47 – Lâmina de ferrografia analítica contendo partículas contaminantes provenientes da amostra de óleo da unidade de lubrificação da bomba centrífuga de alimentação de caldeira multi-estágio KSB	90
Figura 48 – Lâmina de ferrografia analítica contendo partículas contaminantes provenientes da amostra de óleo da turbina a vapor SIEMENS SST 600	91
Figura 49 – Lâmina de ferrografia analítica contendo partículas contaminantes provenientes da amostra de óleo de redutor de velocidade de engrenagens helicoidais 12,5 para 1, modelo SUMITOMO SFC055R2GS RRF.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo dos resultados de detecção em óleo mineral Ideol usando o circuito LC para as amostras contaminadas artificialmente	72
Tabela 2 – Resultado laboratorial físico-químicos da amostra de óleo lubrificante da turbina a gás.....	73
Tabela 3 – Análise laboratorial da concentração de partículas no óleo lubrificante da turbina a gás.....	74
Tabela 4 – Espectrometria do óleo lubrificante da turbina a gás: avaliação de desgaste, aditivos e contaminantes	75
Tabela 5 – Resultado laboratorial físico-químicos da amostra de óleo lubrificante da turbina a vapor	76
Tabela 6 – Análise laboratorial da concentração de partículas no óleo lubrificante da turbina a vapor	76
Tabela 7 – Espectrometria do óleo lubrificante da turbina a vapor.....	77
Tabela 8 – Resultado laboratorial físico-químicos da amostra de óleo lubrificante da bomba de alimentação de caldeira.....	78
Tabela 9 – Análise laboratorial da concentração de partículas no óleo lubrificante da bomba de alimentação de caldeira.....	78
Tabela 10 – Espectrometria do óleo lubrificante da bomba de alimentação de caldeira para avaliação de aditivos	79
Tabela 11 – Resultado laboratorial físico-químicos da amostra de óleo lubrificante do redutor de velocidade	79
Tabela 12 – Comparativo dos resultados de detecção e desempenho do sensor usando o medidor LCR	89

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores para susceptibilidade magnética	45
Quadro 2 – Frequências e reatância indutiva no circuito LC	63
Quadro 3 – Sugestão inicial considerando a teoria	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
BEM	<i>Boundary Element Method</i>
CNN	<i>Convolutional Neural Network</i>
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>
ICP	<i>Inductively Coupled Plasma</i>
IDF	<i>Índice de Desgaste Ferroso</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ISO VG	<i>International Standards Organization Viscosity Grade</i>
LCR	<i>Inductance (L), Capacitance (C) and Resistance (R) meter</i>
LNF	<i>LaserNet Fines</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
NAS	<i>National Aerospace Standard</i>
NBR	<i>Norma Brasileira (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas)</i>
RCM	<i>Reliability-Centered Maintenance</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SVN	<i>Support Vector Machine</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A	Forma matricial magnética ($T \cdot m^{-1}$)
<i>A</i>	Absorbância (adimensional)
<i>a</i>	Espessura/altura do elemento n_c (m)
B	Densidade de fluxo magnético na forma matricial (T)
<i>C</i>	Capacitância (F)
<i>c</i>	Concentração molar ($mol \cdot m^{-3}$)
<i>d</i>	Diâmetro (m)
dH/dx	Gradiente do campo magnético ($A \cdot m^{-2}$)
$di(t)/dt$	Taxa de variação temporal da corrente ($A \cdot s^{-1}$)
E	Campo elétrico matricial ($V \cdot m^{-1}$)
<i>e</i>	Número de Euler (2,71828)
F_m	Força magnética (N)
<i>FQ</i>	Fator de qualidade
$F(\nu)$	Transformada domínio da frequência (depende da grandeza analisada)
<i>f</i>	Frequência (Hz)
f_0	Frequência de ressonância (Hz)
f_{ref}	Frequência de referência (Hz)
$f(t)$	Interferograma no domínio do tempo (depende do sinal medido)
H	Campo magnético matricial ($A \cdot m^{-1}$)
<i>H</i>	Intensidade do campo magnético ($A \cdot m^{-1}$)
$h_n^{(1)}(x)$	Funções de Hankel esféricas de primeira classe
$i(t)$	Corrente elétrica (A)
J	Densidade de corrente elétrica matricial ($A \cdot m^{-2}$)
<i>j</i>	Unidade imaginária
$j_n(x)$	Função de Bessel de primeira espécie
<i>k</i>	Parâmetro (m^{-1})
K_p	Coeficiente de magnetização complexo (m^3)
<i>L</i>	Indutância (H)
<i>l</i>	Caminho óptico (m)

LOD_m	Limite de detecção (kg)
LOQ_m	Limite de quantificação (kg)
m	Massa (kg)
N	Número de voltas da espira
n_c	Número de elementos de contorno
Q	Quantidade de carga elétrica líquida (C)
q_i	Coeficiente de carga superficial do elemento ($V^2 \cdot m^{-1}$)
R	Raio externo da placa do anel (m), resistência elétrica (Ω)
r	Raio da partícula (m)
SNR	Razão entre o sinal útil e o ruído do sistema
S_f	Sensibilidade absoluta ($Hz \cdot kg^{-1}$)
S_{rel}	Sensibilidade relativa (kg^{-1})
s	Desvio-padrão associado ao ruído (depende da grandeza analisada)
t	tempo (s)
V	Diferença de potencial ou tensão elétrica aplicada no circuito (V)
V_d	Volume da região de detecção (m^3)
V_p	Volume da partícula (m^3)
W	Largura axial da bobina (m)
X_L	Reatância indutiva (Ω)
X_C	Reatância capacitiva (Ω)
x	Distância (m)
$\bar{x}$	valor médio do sinal útil (depende da grandeza analisada)
Z	Impedância elétrica (Ω)
$Z(\omega)$	Impedância elétrica complexa (Ω)

Símbolos Gregos

Δ	Variação
ε_0	Permissividade do vácuo ($F \cdot m^{-1}$)
$\tilde{\varepsilon}_0$	Permissividade relativa do óleo lubrificante
$\tilde{\varepsilon}_{mix}$	Permissividade relativa efetiva
$\tilde{\varepsilon}_p$	Permissividade relativa da partícula

ϵ	Coeficiente de absorção molar ($\text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$)
μ	Permeabilidade magnética absoluta ($\text{H} \cdot \text{m}$)
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)
μ_r	Permeabilidade relativa
ν	Frequência associadas partículas metálicas (Hz)
π	Número pi (3,14159)
σ	Condutividade elétrica ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)
σ_f	Desvio padrão da frequência (Hz)
χ	Susceptibilidade magnética
$\psi_n(x)$	Função de Riccati-Bessel relacionada à função de Bessel
$\psi'_n(x)$	Derivada da função de Riccati-Bessel relacionada à função de Bessel
ω	frequência angular (rad/s)

Símbolos Subscritos

0	Vácuo, inicial
d	Deteção
i	Índice de somatório
mix	Mistura
p	Polaridade magnética, partícula
r	Relativa

Operadores

$\propto$	Proporcional
∇	Operador diferencial vetorial (m^{-1})
$\nabla \times$	Rotacional
$\nabla \cdot$	Divergente
∇^2	Laplaciano (m^{-2})

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
2	DESENVOLVIMENTO TEÓRICO	25
2.1	SENSORES PARA ANÁLISE DE LUBRIFICANTES	27
2.1.1	Sensores LCR.....	27
2.1.2	Princípio de funcionamento	29
2.1.3	Modelagem eletromagnética	30
2.1.4	Aquisição das variações de impedância com de circuitos osciladores LC.....	40
2.2	ANÁLISE DE LUBRIFICANTES	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
3.1	PROJETO E CONSTRUÇÃO DO SENSOR	52
3.2	SISTEMA DE DETECÇÃO DE VARIAÇÃO DA IMPEDÂNCIA	54
3.3	TESTES DE VALIDAÇÃO DO SENSOR.....	61
3.3.1	Projeto do oscilador	65
3.4	ENSAIOS EM LUBRIFICANTES INDUSTRIAIS UTILIZANDO O SENSOR...	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
4.1	RESULTADOS UTILIZANDO ÓLEO MINERAL FARMACÊUTICO.....	70
4.1.1	Avaliação das amplitudes médias dos sinais e da razão sinal-ruído (SNR) obtida nos resultados experimentais usando o circuito LC e osciloscópio.....	72
4.2	RESULTADOS APLICADOS AOS LUBRIFICANTES INDUSTRIAIS.....	73
4.3	RESULTATOS EXPERIMENTAIS COM O SENSOR USANDO O MEDIDOR LCR	79
4.3.1	Gráficos dos sinais filtrados: aplicação de filtro passa-baixa.....	82
4.3.2	Avaliação das amplitudes médias dos sinais e da razão sinal-ruído (SNR) obtida nos resultados experimentais usando o medidor LCR	88
4.4	FERROGRAFIA ANALÍTICA DOS LUBRIFICANTES DA TERMOELÉTRICA	89
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	93
5.1	CONCLUSÕES.....	93
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	95

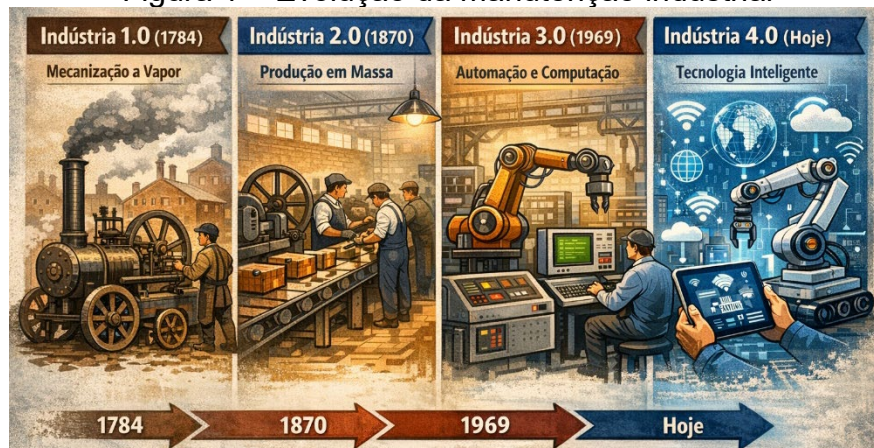
REFERÊNCIAS	97
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	104
ANEXO A – <i>SCRIPTS</i> EM MATLAB.....	105
DADOS CURRICULARES	121

1 INTRODUÇÃO

A evolução da manutenção industrial revela uma transição significativa ao longo do tempo. Inicialmente, a manutenção era predominantemente corretiva, caracterizada por ações reativas e ausência de planejamento estruturado, sendo acionada apenas após a ocorrência de falhas. Com o avanço da industrialização e a necessidade de maior confiabilidade, consolidou-se a manutenção preventiva, fundamentada em inspeções periódicas e intervenções programadas. O desenvolvimento tecnológico permitiu, posteriormente, o surgimento da manutenção preditiva, baseada no monitoramento contínuo de parâmetros operacionais para antecipação de falhas. A crescente competitividade levou ainda à adoção da manutenção centrada na confiabilidade (RCM), que considera severidade e modos de falha para definir estratégias adequadas. Esse processo evolutivo resultou na consolidação da manutenção como função estratégica dentro das organizações (PINTO; XAVIER, 2001).

A Figura 1 apresenta a evolução das técnicas de manutenção ao longo dos anos, organizando-as em diferentes gerações.

Figura 1 – Evolução da manutenção industrial



Fonte: Elaboração própria, com uso do modelo de geração de imagens DALL·E 3 (OpenAI, 2026), a partir do prompt “Evolução da Indústria ao Longo do Tempo”.

Segundo LIU *et al.* (2023), a manutenção preditiva tornou-se um elemento central nos ambientes industriais modernos, uma vez que contribui para melhorar o desempenho operacional, reduzir interrupções não planejadas e evitar falhas de alto custo. A expressão “Indústria 4.0” designa a quarta revolução industrial e teve sua

primeira apresentação oficial durante a Feira de Tecnologias Industriais de Hannover, realizada em 2011 (SILVESTRI *et al.*, 2020).

De acordo com LAFRAIA (2001), os níveis de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade dos equipamentos estão diretamente relacionados à adoção de práticas sistemáticas de manutenção, incluindo metodologias de inspeção baseadas em risco. Nesse contexto, a lubrificação configura-se como uma das ações essenciais de manutenção preventiva, exercendo influência significativa sobre o desempenho e a continuidade operacional dos ativos.

As falhas não programadas em equipamentos industriais ainda representam um dos principais fatores responsáveis por interrupções nos processos produtivos, ocasionando atrasos operacionais e aumento dos custos associados à produção (JAWAD; STEFAN-HENNINGSSEN; KIANI, 2026).

A qualidade de um óleo lubrificante somente pode ser efetivamente comprovada após sua aplicação prática e a análise do desempenho apresentado em operação, desempenho este diretamente influenciado pela composição química obtida a partir do petróleo bruto, pela seleção e refino dos aditivos e pelo balanceamento da formulação, combinação que confere ao lubrificante propriedades físicas e químicas responsáveis por assegurar uniformidade e nível adequado de qualidade, sendo que os ensaios laboratoriais apenas reproduzem condições aproximadas de uso, mas não garantem, por si só, que o produto apresentará comportamento satisfatório em serviço (CARRETEIRO; BELMIRO, 2006).

A análise de óleo lubrificante destaca-se como uma técnica eficaz para o monitoramento da condição de máquinas e a identificação precoce de falhas. O avanço dessa área tem sido impulsionado por sensores *on-line* capazes de monitorar continuamente múltiplos parâmetros do lubrificante, ampliando sua aplicação em sistemas de manutenção preditiva (ZHU; ZHONG; ZHE, 2017).

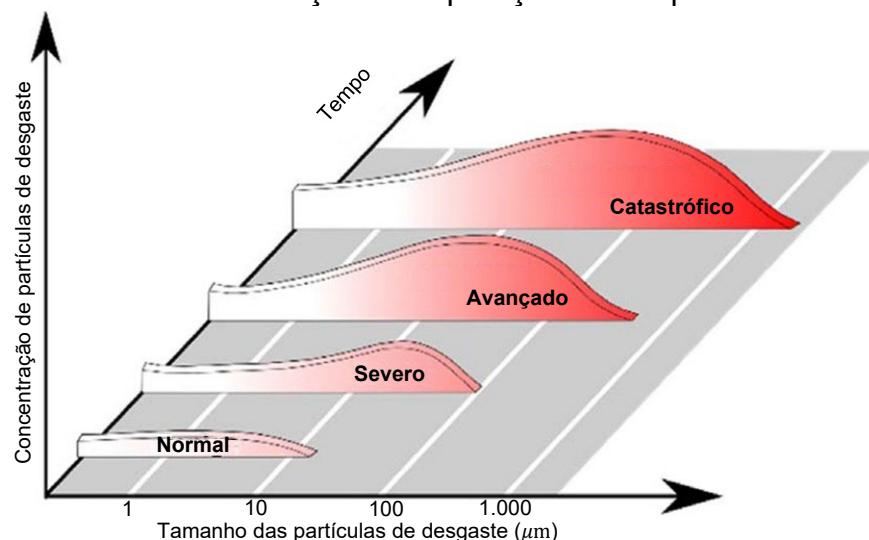
Segundo WU *et al.* (2013), o monitoramento de óleo constitui uma técnica relevante para a avaliação da condição de máquinas, permitindo identificar fenômenos associados ao desgaste e à lubrificação. Em sensores indutivos *on-line*, o óleo circula continuamente pela região sensível, onde a passagem de partículas metálicas altera o campo magnético e a indutância da bobina, gerando sinais elétricos passíveis de detecção em tempo real. Esses avanços ampliam a aplicação do sensoriamento na manutenção e no monitoramento da condição de equipamentos. Também apontam desafios ainda presentes, como a compreensão aprofundada dos mecanismos de

degradação e a necessidade de maior confiabilidade dos sensores em ambientes severos.

SARKAR (2015) destaca que a confiabilidade dos principais equipamentos de uma usina termelétrica depende diretamente de seus sistemas auxiliares, com ênfase especial na lubrificação. O autor descreve o Sistema de Lubrificação de Turbina (*Turbine Lubrication System*), ressaltando sua importância para o controle de atrito, temperatura e desgaste em turbinas a vapor. Também apresenta os equipamentos associados às turbinas a gás, evidenciando a necessidade de sistemas de apoio robustos. SARKAR (2015) também discute elementos como óleo lubrificante, bombas de óleo, pressão do óleo e bombas de alimentação, reforçando que a lubrificação adequada é essencial para a operação confiável e a longevidade dos equipamentos críticos da planta.

A Figura 2 apresenta uma representação gráfica da evolução temporal do perfil granulométrico e da densidade volumétrica das partículas de desgaste. Observa-se que a transição do regime normal de operação para a condição de falha catastrófica é caracterizada pelo aumento simultâneo e progressivo tanto da concentração quanto do tamanho médio das partículas de desgaste presentes no fluido lubrificante.

Figura 2 – Interações entre o tamanho das partículas de desgaste, sua concentração e as condições de operação da máquina.



Fonte: ZHU, ZHONG, ZHE (2017). (Adaptado pelo autor).

Observa-se que, embora essa relação geral seja amplamente reportada na literatura, a faixa de tamanhos das partículas pode variar significativamente em função das condições específicas de cada máquina ou sistema mecânico analisado. Essa

variabilidade decorre de diferenças no regime de operação, nos materiais envolvidos, nos mecanismos de desgaste predominantes e nas características construtivas dos equipamentos, evidenciando a necessidade de interpretações individualizadas para cada aplicação.

De acordo com THAKARE *et al.*, (2012) e WILLIAMS (2005), as faixas granulométricas de partículas comumente consideradas em equipamentos mecânicos compreendem dimensões inferiores a 25 μm , entre 50 e 100 μm e entre 100 e 200 μm , sendo que partículas de menor dimensão tendem a refletir condições de desgaste leve, enquanto partículas intermediárias geralmente indicam desgaste localizado, ao passo que partículas de maiores proporções são tipicamente associadas a desgaste severo ou a processos de descamação do material.

A lubrificação é essencial para garantir o funcionamento eficiente e confiável das máquinas, pois reduz o desgaste, prolonga a vida útil dos componentes e diminui a frequência e os custos de manutenção (HUSSAIN *et al.*, 2021). A lubrificação é o método mais eficaz para minimizar o atrito e o desgaste entre superfícies em contato, pois promove a formação de uma película protetora que reduz a interação direta entre asperezas e melhora a eficiência operacional dos componentes (FRAUSCHER *et al.*, 2024).

Nas usinas termelétricas, diversos equipamentos críticos como turbinas, redutores de velocidade, bombas de alimentação e sistemas auxiliares, dependem diretamente de óleo lubrificante em condições adequadas para garantir elevados níveis de confiabilidade operacional. Tradicionalmente, a análise de óleo é realizada em intervalos periódicos (mensais, trimestrais ou semestrais), o que pode resultar na detecção tardia de processos de desgaste já instalados ou até mesmo de falhas em estágio avançado, ocasionando custos relevantes à organização.

Com base nos avanços e aplicações atuais, o desenvolvimento futuro de sensores para monitoramento da qualidade do óleo e detecção de partículas de desgaste tem sido direcionado para sistemas mais precisos, integrados e inteligentes, com ênfase na compreensão dos mecanismos de degradação ainda pouco explorados (TONGHAI *et al.*, 2013).

O trabalho apresenta uma proposta de um sensor multifuncional em complemento com análises laboratoriais para verificação de aspectos tribológicos como contagem de partículas, desgaste e contaminantes além de propriedades físico-químico e aditivos. O sensor foi analisado com lubrificante mineral puro contaminado

propositalmente para verificar a eficácia de detecção dele. Para estas análises foram adotadas algumas das principais normas técnicas aplicadas à detecção e classificação de partículas sólidas em óleos lubrificantes. A determinação da distribuição e do grupo populacional de partículas ferrosas e não ferrosas seguiu as diretrizes das normas ISO 4406, SAE AS4059, NAS 1638, ISO 11171, ISO 11500, ISO 12345 e ASTM D8049, que abrangem desde a calibração de contadores automáticos até a classificação de níveis de contaminação (NADKARNI, 2007). Complementarmente, a caracterização de partículas metálicas finas foi realizada conforme ASTM D-5185 e ASTM D-7919, garantindo abrangência nas faixas granulométricas avaliadas.

A avaliação da contaminação do óleo foi fundamentada em normas com diferentes finalidades: a ISO 11171 estabelece critérios para calibração de contadores automáticos de partículas; a ISO 11500 define procedimentos para determinação da concentração e distribuição dimensional das partículas; e a ISO 4406, SAE AS4059 e NAS 1638 estabelecem sistemas de classificação dos níveis de contaminação. Complementarmente, a ASTM D5185 permite identificar e quantificar elementos metálicos associados ao desgaste e à contaminação por espectrometria de emissão atômica (ICP-AES), enquanto a ASTM D7919 orienta a análise e caracterização de detritos de desgaste, contribuindo para a avaliação da condição dos componentes mecânicos.

2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

Historicamente, as atividades de manutenção eram voltadas exclusivamente ao reparo de equipamentos quando uma falha já havia ocorrido, sem considerar aspectos econômicos ou de segurança. Com o avanço tecnológico em setores como o aeroespacial e o petroquímico, tornou-se evidente a necessidade de estratégias de manutenção mais eficientes. Nesse contexto, o pré-diagnóstico passou a desempenhar papel fundamental para elevar a disponibilidade dos equipamentos e reduzir custos associados a peças de reposição e mão de obra (BENAMMAR; TEE, 2023).

A geração de energia por meio de usinas termelétricas constitui um elemento essencial da matriz energética. Os equipamentos utilizados nesse tipo de sistema devem operar de forma segura e eficiente, uma vez que seu desempenho influencia diretamente a confiabilidade e a viabilidade econômica dos processos de geração (LI *et al.*, 2024). A Figura 3 mostra a vista aérea de uma termelétrica (Ciclo Combinado).

Figura 3 – Registro fotográfico de uma central termelétrica



Fonte: Dados do próprio autor.

A implementação de técnicas de monitoramento em tempo real das condições de integridade de máquinas tem potencial para reduzir significativamente os custos

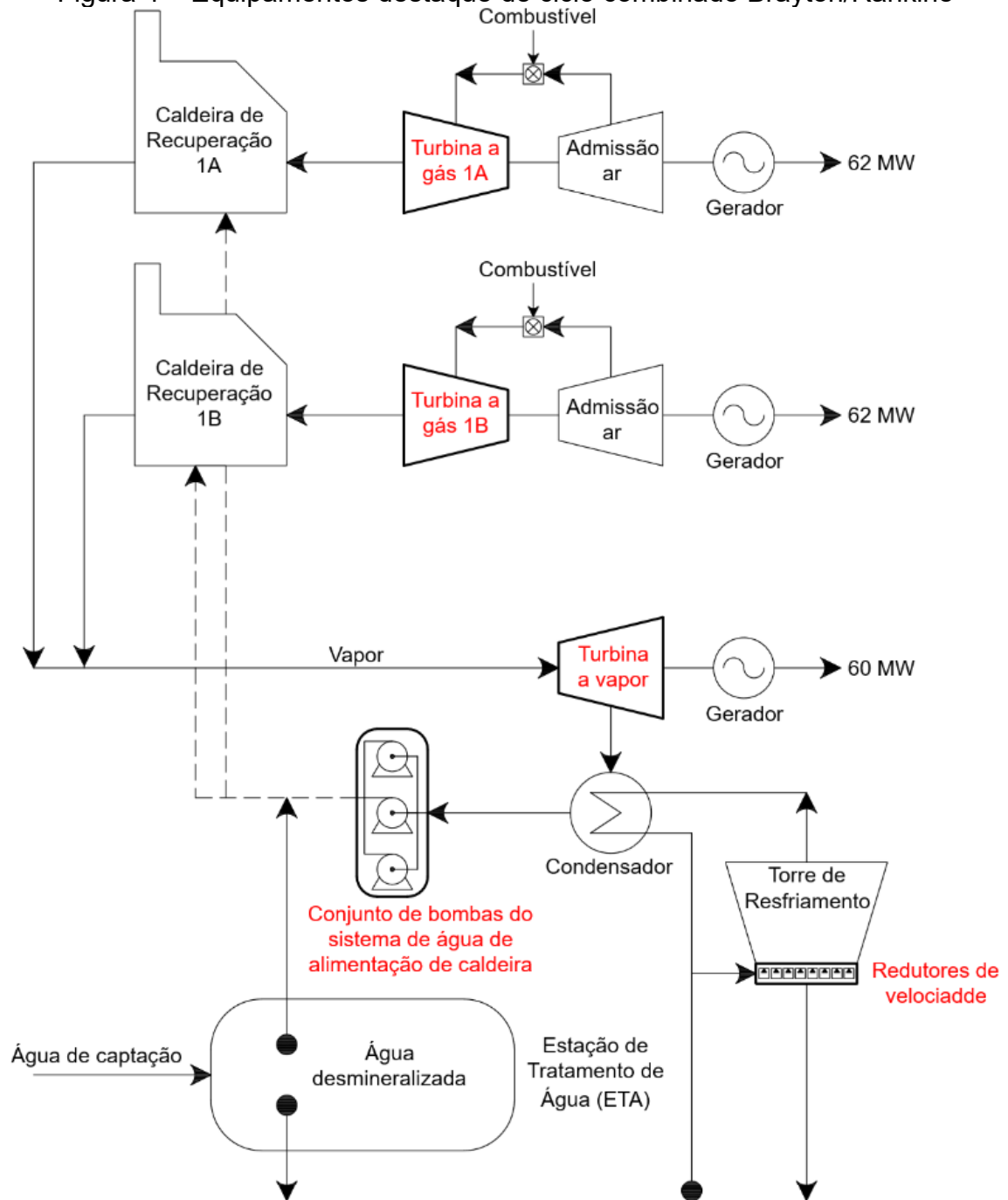
operacionais, ao evitar paradas planejadas destinadas a inspeções preventivas, necessárias para prevenir falhas severas. A demanda por métodos precisos de análise de condição tem aumentado, especialmente em áreas como a militar e a aeronáutica, nas quais a segurança em operações de longo alcance é um fator crítico. Sistemas *off-line* requerem a coleta de amostras para posterior análise laboratorial. Em contrapartida, sensores *on-line* podem ser instalados diretamente no circuito de lubrificação da máquina, em linha com o fluxo principal ou em uma linha de derivação (*by-pass*), permitindo que o óleo atravessasse continuamente a região sensível do dispositivo durante a operação. Essa configuração possibilita o monitoramento contínuo das condições do lubrificante e a identificação de alterações associadas à presença de contaminantes e partículas de desgaste (ZHU *et al.*, 2017).

Segundo FLANAGAN *et al.* (2017), o processo de coleta e análise de lubrificantes consiste na retirada de uma amostra do óleo da máquina para posterior inspeção e identificação de partículas de desgaste. Para garantir resultados mais representativos, recomenda-se que a amostragem seja realizada com o equipamento ainda em funcionamento ou imediatamente após seu desligamento, garantindo que as partículas permaneçam em suspensão no fluido. No estudo citado, o óleo utilizado para verificação de contaminação foi coletado após o funcionamento de quatro equipamentos industriais: uma turbina a gás, uma turbina a vapor, uma bomba de alimentação de caldeira e um redutor de torre de resfriamento.

Conforme LORA e NASCIMENTO (2004), centrais termelétricas baseadas no Ciclo de Brayton operam em arranjos de ciclo combinado, integrando circuitos abertos (turbinas a gás) e fechados (água/vapor, associados ao Ciclo de Rankine). Esses sistemas envolvem duas substâncias de trabalho distintas e apresentam elevada relevância operacional. Seus equipamentos constituem alvos prioritários para estudos tribológicos e monitoramento de condição.

A Figura 4 apresenta os principais componentes de uma usina termelétrica operando em ciclo fechado, baseada no Ciclo Rankine, com ênfase naqueles que constituem objeto de análise no presente estudo quanto ao comportamento e à condição do óleo lubrificante.

Figura 4 – Equipamentos destaque de ciclo combinado Brayton/Rankine



Fonte: Elaboração do próprio autor.

2.1 SENSORES PARA ANÁLISE DE LUBRIFICANTES

2.1.1 Sensores LCR

A literatura técnica e científica apresenta diversos trabalhos que propõem sensores baseados em princípios LCR, isto é, indutância, capacitância e resistência,

que são voltados à detecção de contaminantes em óleos hidráulicos e lubrificantes. As bobinas são amplamente empregadas em sensores por intensificarem o campo magnético, favorecendo a detecção de partículas metálicas. Esse fator é determinante para o aumento da sensibilidade do sensor e, conseqüentemente, para melhorar a identificação de partículas e impurezas presentes no óleo. Sensores indutivos pulsados, como os apresentados por DU; ZHE (2011), demonstram que bobinas planares exibem maior sensibilidade quando comparadas às bobinas helicoidais, mesmo quando ambas possuem o mesmo número de espiras. Em outra abordagem, (ZHANG *et al.* (2017) e LIU *et al.* (2016)) empregaram sensores com dupla bobina, enquanto a empresa GasTOPS desenvolveu o sistema MetalSCAN (um sistema avançado de monitoramento em tempo real patentiado), que utiliza três bobinas: duas destinadas à excitação, capazes de gerar campo magnético nulo na bobina sensora. Adicionalmente, alguns sensores descritos por HONG *et al.* (2013) utilizam bobinas associadas a núcleos de ferrite, aumentando a uniformidade e a precisão na detecção de partículas ferromagnéticas, embora apresentem desempenho limitado para partículas não ferromagnéticas. Outros trabalhos, como o de DU *et al.* (2013), exploram métodos baseados em ressonância LC paralela, nos quais a adição de um capacitor externo à bobina contribui significativamente para o aumento da sensibilidade do sensor.

Entre os trabalhos de destaque, o estudo de SHI *et al.* (2019) apresenta um sensor multifuncional e de baixo custo projetado para o monitoramento em tempo real da contaminação de óleo hidráulico. O dispositivo utiliza uma bobina plana tipo panqueca ("*pancake coil*") combinada com uma lâmina circular de aço silício, que juntos atuam como elementos ativos de detecção. A presença da placa de aço silício intensifica o campo magnético na região de análise, ampliando a sensibilidade dos métodos indutivo e resistivo. Segundo os autores, essa configuração permite que o método resistivo identifique partículas não ferromagnéticas e melhore o desempenho global do sensor. O sistema integra simultaneamente técnicas baseadas em resistência, indutância e capacitância, possibilitando a detecção de diversos tipos de contaminantes presentes no óleo, como partículas metálicas (ferromagnéticas e não ferromagnéticas), gotículas de água e bolhas de ar.

2.1.2 Princípio de funcionamento

Segundo SHI *et al.* (2019), a aplicação de uma corrente alternada à bobina planar gera um campo magnético alternado ao seu redor. Quando partículas metálicas atravessam essa região, correntes parasitas (*eddy currents*) são induzidas em seu interior, conforme estabelecido pela Lei de Lenz (ZHOU *et al.*, 2015). Essas correntes induzidas criam um campo magnético oposto ao da bobina, resultando na atenuação do fluxo magnético na área de detecção.

As contribuições dos efeitos de magnetização e das correntes parasitas diferem entre partículas ferromagnéticas e não ferromagnéticas. Como consequência, as variações produzidas na resposta elétrica da bobina podem apresentar amplitudes, fases e polaridades distintas, permitindo a diferenciação entre esses tipos de partículas (MILLER; KITALJEVICH, 2000).

Zhang *et al.* (2017) esclarecem que a combinação desses efeitos modifica o campo magnético ao redor da partícula metálica e, conseqüentemente, as componentes resistiva e indutiva da impedância da bobina.

Em sensores indutivos, a bobina real pode ser representada por uma resistência R em série com uma indutância L . Dessa forma, sua impedância elétrica complexa pode ser expressa pela Eq. (1):

$$Z = R + j\omega L. \quad (1)$$

em que Z é a impedância elétrica da bobina (Ω), R é a sua resistência elétrica (Ω), j é a unidade imaginária ($\sqrt{-1}$), $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular (rad/s) e L é a indutância da bobina (H). O termo ωL corresponde à reatância indutiva X_L , expressa pela Eq. (2):

$$X_L = \omega L. \quad (2)$$

Portanto, a impedância da bobina também pode ser representada por $Z = R + jX_L$, na qual R corresponde à parte real e X_L , à parte imaginária.

Considerando constante a frequência de excitação, a presença de uma partícula metálica pode alterar tanto a resistência quanto a indutância da bobina. A variação total da impedância é, portanto, expressa pela Eq. (3):

$$\Delta Z = \Delta R + j\omega L. \quad (3)$$

Quando considerada isoladamente, a variação da componente indutiva produz (Eq. (4)):

$$\Delta Z_L = j\omega \Delta L, \quad (4)$$

enquanto a variação da componente resistiva é expressa por pela Eq. (5):

$$\Delta Z_R = \Delta R. \quad (5)$$

Shi *et al.* (2019) demonstraram que a variação máxima da impedância provocada pela presença de uma partícula posicionada no centro do orifício interno da bobina pode ser calculada pela Eq. (6):

$$\Delta Z_{max} = j \frac{4\pi\mu_0\omega N^2}{W^2 + d^2} K_p. \quad (6)$$

Onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m), N é número de espiras da bobina (adimensional), W é largura característica (largura axial) da bobina ou região sensível (m), d o diâmetro do orifício interno (m), e K_p corresponde ao coeficiente complexo de magnetização ou fator de correção que depende do tamanho da partícula, permeabilidade relativa, condutividade elétrica e posição no campo magnético.

2.1.3 Modelagem eletromagnética

O termo $(W^2 + d^2)$ representa a distância efetiva e o tamanho, relacionando-se com a área de influência do campo magnético. A intensidade do campo no alvo diminui com a distância. A aproximação geométrica $(W^2 + d^2)^{-1}$ na Eq. (6) na seção anterior, representa a atenuação do campo magnético de uma bobina de largura a a uma distância d (regra de Biot-Savart aplicada a bobinas planas).

Para coeficiente complexo de magnetização ou fator de correção, considera-se uma partícula metálica esférica, homogênea e isotrópica, submetida a um campo magnético harmônico, ou seja, é um campo magnético que varia no tempo de forma

sinusoidal (seno ou cosseno), com uma frequência fundamental constante. Adota-se o regime fasorial $e^{j\omega t}$.

Pela lei de Faraday a Eq. (7):

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B}. \quad (7)$$

Como $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$, tem-se a Eq. (8) a seguir:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mu \mathbf{H}. \quad (8)$$

Pela lei de Ampère no regime quase-estático resulta em $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ e pela lei de Ohm local tem que $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$. Logo a Eq. (9):

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E}. \quad (9)$$

Aplicando o rotacional $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{H}) = \sigma(\nabla \times \mathbf{E})$ e substituindo a lei de Faraday tem se que $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{H}) = -j\omega \mu \sigma \mathbf{H}$. Pela identidade vetorial $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{H}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{H}) - (\nabla^2 \mathbf{H})$, onde $\nabla(\nabla \cdot \mathbf{H})$ é o gradiente divergente de H e $\nabla^2 \mathbf{H}$ é o laplaciano vetorial de H . Como em um meio homogêneo $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ e $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ então $\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$. Logo $-\nabla^2 \mathbf{H} = -j\omega \mu \sigma \mathbf{H}$, ou seja, a Eq. (10) é dada por:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = j\omega \mu \sigma \mathbf{H}. \quad (10)$$

Escrevendo na forma de Helmholtz a Eq. (11):

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0. \quad (11)$$

Substituindo a Eq. (8) na Eq. (9), obtém-se que $k^2 = -j\omega \mu \sigma$ e como a permeabilidade relativa (μ_r) é definida como a razão entre a permeabilidade absoluta (μ) do material e a do vácuo (μ_0), isto é, $\mu_r = \mu/\mu_0$, a Eq. (12) é dada por:

$$k = \sqrt{-j\omega \mu_r \mu_0 \sigma}, \quad (12)$$

onde k é o número de onda complexo no interior da partícula.

Fisicamente, k representa a forma como o campo eletromagnético penetra e se distribui no interior da partícula. Quanto maior a frequência ω , a permeabilidade μ_r ou a condutividade σ , maior tende a ser o efeito das correntes parasitas, reduzindo a profundidade efetiva de penetração do campo. Esse comportamento é coerente com a teoria de correntes induzidas empregada em sensores eletromagnéticos e métodos de ensaio não destrutivo (BLITZ, 1997).

Quando a partícula é ferromagnética, o efeito de magnetização tende a intensificar o campo magnético local. Quando a partícula é não ferromagnética, o efeito dominante costuma ser a geração de correntes parasitas, que se opõem à variação do campo magnético, reduzindo a indutância da bobina. Esse princípio é usado para distinguir partículas ferromagnéticas e não ferromagnéticas pela polaridade da variação de indutância (WANG, 2016) que serão demonstradas mais adiante.

Em uma esfera de raio r com permeabilidade magnética relativa μ_r , quando uma onda eletromagnética incide sobre ela, induz um momento de dipolo magnético. O coeficiente K_p relaciona o campo incidente com o campo espalhado pelo modo de dipolo ($n = 1$). As funções que descrevem esses campos são as funções de Bessel esféricas $j_n(x) = \sin(x)/x^2 - \cos(x)/x$ para o interior e as funções de Hankel esféricas $h_n^{(1)}(x) = j_1(x) - iy_1(x)$ para o exterior. Para o dipolo magnético ($n = 1$).

As condições de Contorno de Maxwell superfície da esfera ($R = r$), os componentes tangenciais dos campos devem ser contínuos. Para o modo magnético, isso se traduz na continuidade da função de Riccati-Bessel $\psi_1 = xj_1(x)$ e sua derivada, ponderadas pela permeabilidade pela Eq. (13):

$$\frac{\psi_1'(k_{int}r)}{\mu_{int}} = \frac{\psi_1'(k_{ext}r)}{\mu_{ext}}. \quad (13)$$

Definindo $x = rk$, e assumindo o meio externo como o vácuo ($\mu_{ext} = 1$, $\mu_{int} = \mu_r$), a polarizabilidade é proporcional ao coeficiente (Eq. 14) o comportamento do sistema:

$$K_p \propto \frac{\mu_r \psi_1(x) - \psi_1'(x)}{\text{Termo de Saída}}. \quad (14)$$

Expandido $\psi_1(x) = x(\sin(x)/x^2 - \cos(x)/x) = \sin(x)/x - \cos(x)$ e a sua derivada $\psi'_1(x) = (x \cos(x) - \sin(x))/x^2 + \sin(x)$.

Substituímos na expressão do numerador (que define o comportamento do sistema) a Eq. (15):

$$\text{Numerador} = \mu_r \left(\frac{\sin(x)}{x} - \cos(x) \right) - \left(\frac{x \cos(x) - \sin(x)}{x^2} + \sin(x) \right). \quad (15)$$

Agrupando $\sin(x)$ e $\cos(x)$ em evidência, e multiplicando por x^2 e substituindo por $x = rk$, o numerador resulta em $(r^3/2) \cdot (-r^2k^2 + 2\mu_r + 1) \sin(2\mu_r + 1) - rk(2\mu_r + 1) \cos(rk)$. No denominador o processo é idêntico, mas utiliza-se a função de Hankel $h_1^{(1)}(x)$ para a onda espalhada, o que inverte os sinais de alguns termos de fase, gerando $r^2k^2 + \mu_r - 1$. Logo a Eq. (16) para que representa a polarizabilidade do dipolo magnético:

$$K_p = \frac{r^3}{2} \cdot \frac{(-r^2k^2 + 2\mu_r + 1) \sin(2\mu_r + 1) - rk(2\mu_r + 1) \cos(rk)}{(r^2k^2 + \mu_r - 1) \sin(rk) - rk(\mu_r + 1) \cos(rk)}. \quad (16)$$

De acordo com SHI *et al.* (2019), a inserção de um anel de aço silício acoplado à bobina planar modifica de maneira significativa a intensidade do campo magnético na região de detecção. Quando submetida ao campo magnético alternado, a chapa de aço silício torna-se magnetizada e gera um campo adicional que reforça a densidade de fluxo magnético, especialmente nas proximidades do orifício central da bobina. Esse reforço cria um ambiente magnético mais intenso, no qual partículas metálicas apresentam maior suscetibilidade à magnetização, intensificando tanto o efeito de magnetização quanto a formação de correntes parasitas (*eddy currents*).

Como consequência, observa-se uma variação mais pronunciada na impedância da bobina, resultando em maior sensibilidade nos modos de detecção indutivo e resistivo. As partículas ferromagnéticas tendem a aumentar o fluxo magnético local, produzindo pulsos positivos de indutância e de resistência. Já partículas metálicas não ferromagnéticas apresentam predominantemente efeitos de correntes parasitas, que reduzem o fluxo magnético na região sensora (SHAN *et al.*, 2025), gerando pulsos negativos de indutância e positivos de resistência.

A variação de indutância decorrente da passagem de uma partícula metálica é descrita pela Eq. (17):

$$\Delta L = \text{Im} \left(\frac{\Delta Z_{max}}{\omega} \right) = \frac{4\pi\mu_0 N^2}{W^2 + d^2} \text{Re}(K_p). \quad (17)$$

A variação da indutância corresponde à parte imaginária da variação da impedância dividida pela frequência angular. Considerando a Eq. (4), essa parcela está associada à parte real do coeficiente complexo K_p .

Nesse contexto, o termo Im refere-se à parte imaginária da razão entre a variação máxima de impedância e a frequência angular ω , enquanto Re corresponde à parte real do coeficiente de magnetização

A alteração na resistência produzida pela presença de uma partícula metálica é descrita pela Eq. (18):

$$\Delta R = \text{Re}(\Delta Z_{max}) = -\frac{4\pi\mu_0 \omega N^2}{W^2 + d^2} \text{Im}(K_p). \quad (18)$$

A variação da resistência corresponde à parte real da variação da impedância. Considerando a Eq. (4), essa parcela está associada ao negativo da parte imaginária do coeficiente complexo K_p .

A bobina plana, confeccionada com fios esmaltados, em conjunto com a lâmina de aço silício em formato anular acoplada a ela, pode ser modelada como um capacitor de placas paralelas (NISHIYAMA; NAKAMURA, 1993). Essa configuração dá origem ao chamado efeito de borda, que produz uma distribuição adicional do campo elétrico na região central do orifício formado pelas placas anulares. Quando partículas metálicas atravessam essa área de detecção, elas são polarizadas pelo campo elétrico, o que modifica a permissividade local do meio e, conseqüentemente, altera a capacitância do sistema capacitivo.

A capacitância é definida pela razão entre a carga total Q e o potencial V , ou seja, $C = Q/V$. A discretização da carga é a divisão do condutor em n_c segmentos, a carga total Q é a soma das cargas individuais q_i em cada segmento dado por $Q = \sum_{i=1}^{n_c} q_i$. O fator geométrico e a permeabilidade em problemas de capacitância envolvendo meios dielétricos (indicado por ε) e geometrias cilíndricas ou de tiras (onde aparecem π) e termos como o raio R e a espessura a , o potencial V é influenciado pela distribuição espacial dessas cargas.

Neste trabalho, a bobina plana e a lâmina anular de aço silício são tratadas como equivalentes a duas placas paralelas de formato circular. Embora muitos modelos tradicionais de cálculo de capacitância desconsiderem o efeito de franja, nas aplicações práticas da engenharia elétrica e eletrônica esse efeito torna-se bastante significativo. Em função disso, NISHIYAMA e NAKAMURA (1993) propuseram um modelo que consiste em dividir a placa anular em n_c elementos de contorno, a partir dos quais foi desenvolvida uma formulação para o cálculo da capacitância, apresentada na Eq. (19):

$$C = \frac{\pi \varepsilon t}{V n_c^2} \sum_{i=1}^{n_c} [(2i - 1)a + 2n_c R] q_i. \quad (19)$$

A expressão apresentada baseia-se no Método dos Elementos de Contorno (*Boundary Element Method – BEM*), no qual a placa anular é subdividida em m elementos de contorno de largura uniforme. Neste estudo, adotou-se n_c igual ao número de espiras da bobina. Nessa formulação, ε representa a permissividade do meio entre as placas, V é a diferença de potencial aplicada ao sistema, R corresponde ao raio interno da placa anular, e a define sua espessura radial (sendo $a = ND_2$ neste caso). O termo q refere-se à densidade de carga superficial associada a cada elemento de contorno. O procedimento completo de cálculo encontra-se descrito em NISHIYAMA e NAKAMURA (1993).

Dessa forma, a capacitância do sistema passa a depender exclusivamente da permissividade do meio, desde que os parâmetros geométricos da bobina e as condições de excitação da corrente alternada sejam previamente definidos.

A permissividade relativa do óleo lubrificante mineral considerado neste estudo é $\tilde{\varepsilon}_0 = 4,5$ (SILVA *et al.*, 2012) e para o óleo mineral farmacêutico $\tilde{\varepsilon}_0 = 1,23$ (HUSSIN *et al.*, 2020). A presença de uma partícula na região de detecção modifica as propriedades dielétricas do meio entre as placas, resultando em uma nova permissividade efetiva, denominada $\tilde{\varepsilon}_{mix}$. Como o capacitor é excitado por corrente alternada, a permissividade do meio depende não apenas das propriedades intrínsecas das partículas, mas também varia de acordo com a frequência de excitação. Assim, adota-se a permissividade complexa do material, expressa pela Eq. (20):

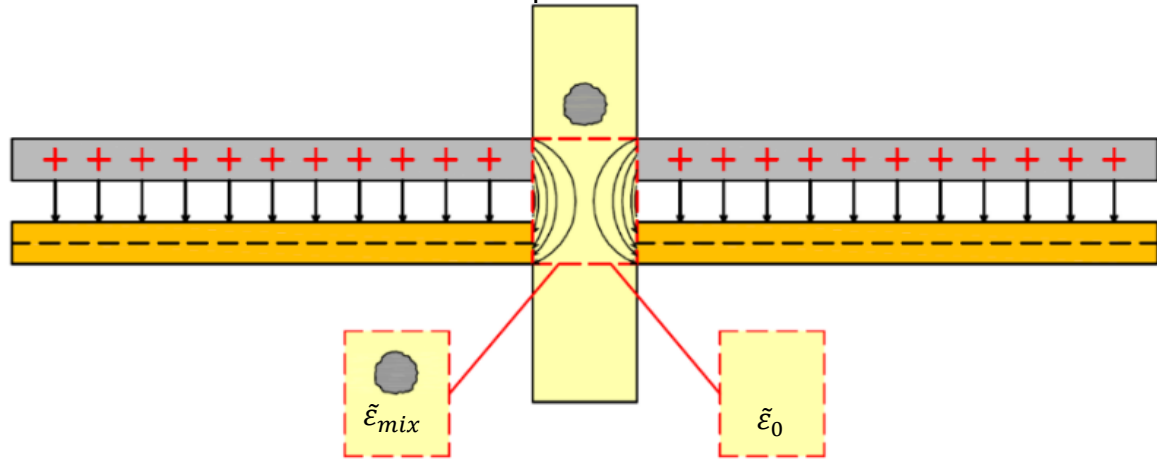
$$\tilde{\epsilon}_{mix} = \tilde{\epsilon}_0 \frac{V_d(\tilde{\epsilon}_p + 2\tilde{\epsilon}_0) + V_p(\tilde{\epsilon}_p - \tilde{\epsilon}_0)}{V_d(\tilde{\epsilon}_p + 2\tilde{\epsilon}_0) - V_p(\tilde{\epsilon}_p - \tilde{\epsilon}_0)}. \quad (20)$$

Em V_d que representa o volume da região de detecção, V_p corresponde ao volume da partícula, e $\tilde{\epsilon}_p$ indica a permissividade relativa do contaminante, como gotas de água ou bolhas de ar.

A permissividade efetiva complexa da mistura $\tilde{\epsilon}_{mix}$, representa a resposta dielétrica equivalente do meio na região de detecção quando há a presença de partículas dispersas. Trata-se de uma grandeza dependente da frequência, que incorpora simultaneamente os efeitos de armazenamento de energia elétrica (parte real) e de perdas dielétricas (parte imaginária), sendo determinada pela interação entre a permissividade do fluido base e a do contaminante, ponderadas pelos respectivos volumes envolvidos.

Quando uma partícula passa pelo espaço onde existe um campo elétrico entre as placas do sensor, ela interage com esse campo e altera as propriedades elétricas desse ambiente. Essa mudança modifica a capacidade do sensor de armazenar carga elétrica (capacitância), detectando a presença da partícula, como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Caracterização da distribuição do campo elétrico no modelo de capacitor equivalente



Fonte: SHI, *et al.* (2019). (Adaptado pelo autor).

Assim, com base na Eq. (21), torna-se possível determinar a variação da capacitância:

$$\Delta C = \frac{\pi t [\text{Re}(\tilde{\epsilon}_{mix}) - \tilde{\epsilon}_0]}{V n_c^2} \sum_{i=1}^m [(2i - 1)a + 2n_c R] q_i. \quad (21)$$

Conforme destacado por ZHANG *et al.* (2017), uma vez definidos os parâmetros geométricos da bobina planar associada ao anel de aço silício, bem como as condições de excitação da corrente alternada, a capacitância do sistema passa a depender exclusivamente da permissividade do meio presente na região de detecção. Isso ocorre porque, em um capacitor, a capacitância é diretamente proporcional à permissividade elétrica do material dielétrico que ocupa o espaço entre as placas, influenciando a distribuição do campo elétrico e a capacidade de armazenamento de carga elétrica pelo sistema.

Considerando que diferentes substâncias apresentam valores distintos de permissividade relativa, como é o caso do óleo hidráulico, da água e do ar, a variação da capacitância pode ser utilizada como parâmetro de identificação de contaminantes no óleo lubrificante. A presença de partículas ou bolhas altera o dielétrico local, modificando o campo elétrico na região de borda (*fringe field*) gerado pela configuração planar do capacitor. Dessa forma, o modo de detecção capacitivo torna-se capaz de diferenciar gotas de água e bolhas de ar, aproveitando-se justamente do contraste entre suas propriedades dielétricas e as do óleo base.

A sensibilidade às propriedades elétricas do meio permite o monitoramento de contaminantes não metálicos e a detecção de partículas ferrosas e não ferrosas com um sensor sem a necessidade de circuitos externos complexos (ZENG *et al.*, 2018).

Em sensores indutivos práticos, a variação de indutância pode tornar-se reduzida ou quase invariável em determinadas faixas de tamanho de partículas devido à atuação concorrente dos efeitos de magnetização e das correntes parasitas (*eddy currents*), fenômeno denominado zona de estagnação da indutância, o qual compromete a sensibilidade e gera ambiguidades na caracterização quando apenas um único mecanismo de detecção é empregado. Resultados de simulação demonstram que partículas paramagnéticas ($\chi > 0$), como alumínio e aço inoxidável, e diamagnéticas ($\chi < 0$), como cobre, apresentam perdas significativas associadas às correntes parasitas em toda a faixa de frequência, ocasionando redução da indutância da bobina. Para partículas ferromagnéticas ($\chi \gg 1$), como o ferro, os efeitos de magnetização predominam em frequências da ordem de centenas de quilohertz, enquanto os efeitos de correntes parasitas tornam-se mais relevantes na faixa de megahertz. Além disso, o aumento da espessura do plano metálico pode intensificar

os efeitos de correntes parasitas, deslocando a frequência de cruzamento entre os casos com e sem partículas para frequências mais baixas (LU *et al.*, 2026)

Nos experimentos de SHI *et al.* (2019), a incorporação de um anel de aço silício à bobina sensora aumentou significativamente a razão sinal-ruído (SNR). Essa métrica expressa a qualidade do sinal em relação ao ruído do sistema (ZENG *et al.*, 2018) e, sob o enfoque estatístico, pode ser representada pela razão entre a média das medições ($\bar{x}$) e seu desvio-padrão (s) (BUSCH; BUSCH, 2018). Valores mais elevados da SNR dada pela Eq. (22) indicam maior efetividade na detecção.

$$SNR = \frac{\bar{x}}{s}. \quad (22)$$

Para o cálculo da SNR , o nível de ruído foi estimado no MATLAB a partir do desvio-padrão dos vetores de ruído, adotando-se a média desses valores como referência representativa da dispersão do ruído nos sinais analisados.

Um aumento nessa razão implica maior robustez e confiabilidade na detecção de variações eletromagnéticas provocadas pela passagem de partículas contaminantes. Assim, os resultados reportados pelos autores demonstram que o anel de aço silício contribui substancialmente para o ganho de sensibilidade do sensor, especialmente em aplicações envolvendo óleos hidráulicos contaminados com partículas metálicas.

De forma semelhante, ZHANG *et al.* (2017) analisaram uma configuração alternativa utilizando duas bobinas operando a 1,2 MHz e observaram que sua sensibilidade de detecção foi consideravelmente inferior às abordagens previamente propostas. Essa comparação reforça que a geometria da bobina, a presença de elementos ferromagnéticos auxiliares e a frequência de excitação exercem papel decisivo no desempenho de sensores eletromagnéticos para análise de contaminação em fluidos lubrificantes.

Do ponto de vista teórico, a presença de partículas metálicas influencia o campo magnético gerado pela bobina, modificando a permeabilidade magnética efetiva do meio. Para materiais ferromagnéticos, como o ferro, ocorre um aumento significativo da permeabilidade, elevando a indutância do sistema. Já para materiais não ferromagnéticos, como o cobre, os efeitos estão mais associados ao campo de correntes parasitas. A formulação do potencial vetor magnético no domínio da

frequência pode ser descrita conforme JIN (2014) por sendo expressa pela Eq. 23, que introduzem perdas adicionais e afetam o fator de qualidade do circuito.

$$(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)\mathbf{A} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{0}, \quad (23)$$

onde ω é a frequência angular de excitação, σ é a condutividade elétrica, ε é a permissividade, $\mathbf{A}$ é a matriz magnética e μ permeabilidade do meio. Essa equação é muito empregada em análise de sensores eletromagnéticos para detecção de partículas metálicas em óleo lubrificante.

Considerando que a resposta em frequência apresenta maior grau de linearidade quando comparada à resposta de proximidade, a sensibilidade do sensor foi definida a partir da relação entre a variação da frequência de ressonância e a variação da massa das partículas. Dessa forma, a sensibilidade será obtida por meio de regressão linear entre essas grandezas conforme RUPITSCH (2018) a Eq. (24):

$$S_f = \frac{\Delta f}{\Delta m}. \quad (24)$$

A sensibilidade em frequência (S_f) foi determinada pela relação ($S_f = \Delta f / \Delta m$), correspondente ao coeficiente angular da regressão linear entre a frequência de ressonância e a massa de contaminante adicionada ao óleo. Assim, (S_f), expressa em Hz/mg, representa a variação média da frequência de ressonância por unidade de massa de partículas introduzida experimentalmente.

A sensibilidade relativa foi então determinada pela normalização da sensibilidade em relação à frequência de ressonância na condição de referência, sendo dada pela Eq. (25):

$$S_{rel} = \frac{S_f}{f_{ref}}. \quad (25)$$

Os limites de detecção (LOD) e de quantificação (LOQ) foram estabelecidos com base no desvio padrão do sinal em condição sem partículas, sendo definidos, respectivamente, foram determinados conforme MILLER; MILLER; MILLER (2018), pela Eq. (26) e Eq. (27):

$$LOD_m = \frac{3\sigma_f}{S_f}, \quad (26)$$

$$LOQ_m = \frac{10\sigma_f}{S_f}. \quad (27)$$

Adicionalmente, a relação sinal-ruído (SNR) foi calculada para uma partícula ferromagnética de 1 mg, sendo expressa (conforme MILLER; MILLER; MILLER (2018)) pela Eq. (28):

$$SNR = \frac{\Delta f}{\sigma_f}. \quad (28)$$

2.1.4 Aquisição das variações de impedância com de circuitos osciladores LC

Circuitos osciladores baseados em elementos indutivos e capacitivos (LC) são amplamente empregados em sistemas eletrônicos para geração de sinais senoidais de frequência estável e elevada sensibilidade a variações dos componentes do circuito ressonante. Nesses circuitos, a frequência de oscilação é determinada principalmente pela associação entre a indutância (L) e a capacitância (C) (HAYT JR. *et al.*, 2019).

Dessa forma, pequenas variações na indutância da bobina produzem alterações mensuráveis na frequência de oscilação, constituindo o princípio de funcionamento que caracteriza o desempenho esquemático do sensor na detecção de partículas metálicas.

Há diferentes arquiteturas de osciladores LC, destacando-se os osciladores *Hartley*, *Colpitts*, *Clapp*, *Armstrong* e *Meissner*. Embora todos operem a partir do mesmo princípio físico de ressonância eletromagnética, diferem quanto ao método de realimentação, estabilidade em frequência, influência de capacitâncias parasitas e facilidade de implementação.

O oscilador *Hartley* utiliza duas indutâncias ou uma bobina com derivação (*tap*), sendo amplamente empregado em aplicações de rádio frequência devido à simplicidade construtiva. O oscilador *Armstrong* emprega acoplamento por transformador para fornecer a realimentação positiva necessária à manutenção das

oscilações, enquanto o oscilador *Meissner* utiliza princípio semelhante, diferindo principalmente na configuração do enrolamento de realimentação.

Entre as arquiteturas mais utilizadas em sistemas de medição destacam-se os osciladores *Colpitts* e *Clapp*. O oscilador *Colpitts* emprega um divisor capacitivo para realizar a realimentação, apresentando boa estabilidade e reduzida sensibilidade às variações dos componentes ativos do circuito. O oscilador *Clapp* constitui uma evolução do *Colpitts*, incorporando um capacitor adicional em série com a indutância do tanque ressonante. Essa configuração reduz significativamente a influência das capacitâncias parasitas da bobina e do dispositivo ativo, proporcionando maior estabilidade em frequência, maior fator de qualidade (FQ) e melhor resolução na detecção de pequenas variações de indutância (CLAPP, 1948; HOROWITZ; HILL, 2015).

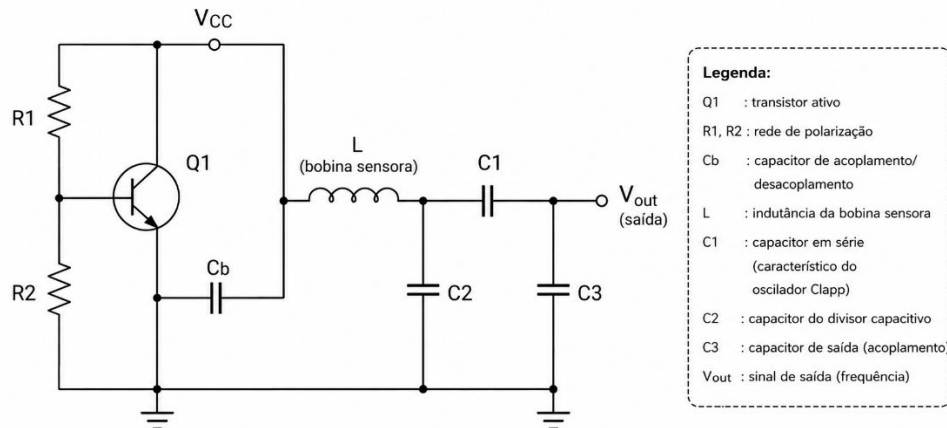
O fator de qualidade (FQ) foi obtido pela razão entre a frequência de ressonância (f_0) e a largura de banda nos pontos de -3 dB, ($FQ = f_0/(f_2 - f_1)$), caracterizando a seletividade do circuito ressonante.

Considerando detectar pequenas alterações de indutância provocadas pela passagem de partículas metálicas através da região sensível da bobina, o oscilador *Clapp* é um circuito adequado, pois apresenta elevada sensibilidade, simplicidade de implementação e reduzido custo, características desejáveis para futuras versões embarcadas do sensor multifuncional proposto. Outra vantagem relevante consiste no elevado fator de qualidade (FQ) normalmente obtido pelo circuito ressonante, proporcionando maior estabilidade da frequência de oscilação e maior sensibilidade à detecção de pequenas variações de indutância.

Essas características são particularmente importantes em aplicações envolvendo sensores eletromagnéticos destinados ao monitoramento de partículas metálicas em fluidos lubrificantes, nas quais alterações de poucos nanohenries (nH) ou microhenries (μ H) podem representar mudanças significativas na condição de desgaste dos componentes mecânicos monitorados.

Nessas aplicações, a informação de interesse deixa de ser a amplitude do sinal elétrico e passa a ser a frequência produzida pelo circuito oscilador, simplificando o sistema de aquisição e reduzindo a suscetibilidade a ruídos elétricos. Na Figura 6 tem-se a topologia simplificada do circuito oscilador *Clapp* empregado para detecção de variações de indutância.

Figura 6 – Topologia simplificada do circuito oscilador *Clapp*



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O circuito apresentado representa **uma topologia simplificada de um oscilador Clapp**, na qual a **bobina sensora (L)** integra diretamente o circuito ressonante LC. Embora essa configuração não tenha sido empregada experimentalmente nesta dissertação, sua análise fundamenta trabalhos futuros, uma vez que permite converter pequenas variações de indutância em deslocamentos mensuráveis de frequência, favorecendo a implementação de sistemas embarcados para aquisição e monitoramento contínuo dos sinais do sensor.

O funcionamento inicia-se com a polarização do transistor Q_1 , realizada pela rede resistiva formada por R_1 e R_2 , que estabelece o ponto de operação necessário para que o transistor atue na região ativa, isto é, ele está polarizado em uma condição na qual consegue amplificar pequenas variações do sinal elétrico, fornecendo o ganho necessário para compensar as perdas do circuito ressonante e, assim, contribuir para a manutenção das oscilações. O capacitor C_b atua como elemento de acoplamento e desacoplamento, contribuindo para a realimentação do circuito e para a estabilidade da oscilação.

A frequência de oscilação é determinada pelo circuito ressonante, composto pela **bobina sensora (L)** e pelos capacitores C_1 e C_2 . No oscilador *Clapp*, o capacitor C_1 , conectado em série com a indutância, é o elemento que caracteriza essa topologia e reduz a influência das capacitâncias parasitas da bobina e do dispositivo ativo (CLAPP, 1948).

Dessa forma, a frequência de oscilação torna-se predominantemente dependente da indutância da bobina e do capacitor em série, proporcionando maior

estabilidade e sensibilidade quando comparada a outras arquiteturas, como o oscilador *Colpitts* convencional.

Quando partículas metálicas atravessam a região sensível da bobina, ocorre uma pequena alteração em sua indutância. Como a frequência de ressonância do circuito é dada, em primeira aproximação, pela Eq. (29):

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{eq}}}, \quad (29)$$

em que C_{eq} representa a capacitância equivalente do tanque ressonante. Desta forma, qualquer variação em L , que é a indutância da bobina, provocará um deslocamento correspondente da frequência de oscilação (HAYT JR. *et al.*, 2019).

Assim, em vez de medir diretamente a indutância da bobina, o sistema monitora a frequência produzida pelo oscilador. Essa estratégia simplifica a eletrônica de aquisição, uma vez que a frequência pode ser determinada diretamente por contadores ou temporizadores presentes em microcontroladores, dispensando circuitos mais complexos para a medição direta da impedância.

Além disso, a medição em frequência apresenta elevada resolução e menor suscetibilidade às variações de amplitude e aos ruídos elétricos, tornando essa abordagem particularmente adequada para a detecção de pequenas variações de indutância em sensores eletromagnéticos (WEBSTER; EREN, 2014).

Como exemplo, considerando um circuito oscilador ajustado para operar a 2 MHz com uma bobina de 19,2 μH , um aumento da indutância para 19,7 μH (variação de 0,5 μH , ou 500 nH) resulta em uma redução da frequência de oscilação para aproximadamente 1,974 MHz, correspondendo a um deslocamento de cerca de 25,5 kHz. Esses valores são obtidos a partir da equação da frequência de ressonância de um circuito LC da Eq. (29) mantendo-se a capacitância equivalente constante. Esse exemplo ilustra que pequenas variações na indutância produzem deslocamentos de frequência suficientemente elevados para serem medidos com elevada resolução por microcontroladores ou contadores de frequência, evidenciando a elevada sensibilidade dessa técnica de aquisição.

O capacitor C_3 é utilizado para realizar o acoplamento do sinal de saída (V_{out}) ao circuito de medição, minimizando a influência da carga externa sobre o tanque ressonante. A frequência presente em V_{out} pode ser medida por um frequencímetro,

contador de frequência ou por temporizadores internos de um microcontrolador, permitindo determinar, de forma indireta, as variações de indutância da bobina sensora.

Embora o circuito apresentado represente uma alternativa promissora para a implementação de uma eletrônica dedicada ao sensor multifuncional, a validação experimental desenvolvida neste trabalho concentrou-se na caracterização das variações de impedância da bobina por meio de um medidor LCR de precisão. Essa abordagem permitiu avaliar, de forma controlada, a influência das partículas metálicas sobre os parâmetros elétricos do sensor. A implementação de um circuito oscilador LC dedicado, utilizando a bobina sensora como elemento do tanque ressonante, constitui uma evolução natural desta pesquisa e será discutida como perspectiva para trabalhos futuros.

2.2 ANÁLISE DE LUBRIFICANTES

A geração de partículas de desgaste constitui um importante indicador da degradação e das condições tribológicas do sistema (MATE; CARPICK, 2019), sendo a ferrografia analítica uma técnica empregada para identificar, separar e analisar essas partículas em óleos lubrificantes por meio de deposição magnética em lâmina de vidro, permitindo posterior avaliação microscópica (GONÇALVES *et al.*, 2024) tais como:

- mecanismos de desgaste;
- severidade do desgaste;
- morfologia das partículas;
- tamanho e concentração de partículas metálicas;
- presença de contaminações.

Partículas ferromagnéticas são separadas conforme tamanho e massa devido à ação combinada do fluxo do óleo e do gradiente de campo magnético. A Eq. (30) expressa a força magnética atuando sobre a partícula (SMOLKIN; SMOLKIN, 2006):

$$F_m = \mu_0 V_p \chi H \frac{dH}{dx}. \quad (30)$$

Onde F_m é a força magnética (N), V_p é o volume da partícula (m^3), H é intensidade do campo magnético (A/m) e dH/dx é o gradiente do campo magnético ($A \cdot m^{-2}$). A Eq. (30) foi utilizada como fundamentação teórica para descrever a dependência da força magnética em relação às propriedades da partícula e ao gradiente do campo, sem atribuir valores experimentais a esses termos.

O Quadro 1 ilustra os diferentes comportamentos da susceptibilidade magnética χ (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2003).

Quadro 1 – Valores para susceptibilidade magnética

Tipo de material	Valor de χ	Comportamento
Diamagnético	$\chi < 0$	Repelido fracamente pelo campo magnético
Paramagnético	$\chi > 0$ pequeno	Atraído fracamente
Ferromagnético	$\chi \gg 1$	Fortemente atraído e facilmente magnetizado

Fonte: Adaptado de HALLIDAY, RESNICK e WALKER (2003).

A Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier, do inglês *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) é uma técnica espectroscópica utilizada para identificar compostos químicos presentes no óleo lubrificante por meio da absorção da radiação infravermelha. Essa técnica permite detectar:

- oxidação do óleo;
- degradação térmica;
- presença de água;
- contaminação por combustível;
- aditivos;
- produtos de degradação química.

O princípio físico da FTIR baseia-se na interação da radiação infravermelha com as ligações moleculares, que absorvem energia em frequências específicas correspondentes aos modos vibracionais das moléculas.

Seja a Lei de Beer-Lambert conforme a Eq. (31) a seguir:

$$A = \epsilon c l, \quad (31)$$

onde A é a absorbância óptica, ϵ é o coeficiente de absorção molar ($m^2 \cdot mol^{-1}$), c é a concentração molar ($mol \cdot m^{-3}$) e l é caminho óptico (m). Em análise de lubrificantes essa lei permite correlacionar a quantidade de partículas de desgaste presentes no

lubrificante com a redução da intensidade luminosa transmitida através da amostra (SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2007). Embora a Lei de Beer-Lambert não constitua, por si só, um método de detecção, sua aplicação é relevante para fundamentar a interpretação quantitativa dos espectros de FTIR, ao estabelecer a relação entre a absorbância e a concentração das espécies químicas presentes no lubrificante.

De acordo com VANCE, ZEIDAN e MURPHY (2010), na FTIR, o sinal obtido no interferômetro é convertido para o domínio da frequência utilizando a Transformada de Fourier pela Eq. (32):

$$F(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j2\pi\nu t} dt, \quad (32)$$

onde $F(\nu)$ é o espectro no domínio da frequência, $f(t)$ é o interferograma no domínio do tempo que é um sinal bruto em técnicas interferométricas, ν é a frequência (Hz) e t é o tempo (s).

De acordo com SIMMONS (2014), a crescente instabilidade no fornecimento de energia, impulsionada pela rápida integração de fontes renováveis como eólica e solar, tem aumentado a frequência de partidas e paradas das turbinas a gás, o que leva essas máquinas a operar com maior frequência fora de suas condições ideais, elevando as cargas nos mancais e a temperatura do óleo, reduzindo a vida útil do lubrificante e aumentando o risco de danos ao equipamento.

Para a turbina a gás, diversos dados técnicos devem ser considerados no processo de avaliação laboratorial a fim de verificar se os parâmetros medidos se encontram dentro das tolerâncias estabelecidas para a classificação de severidade, anormalidade ou condição de normalidade operacional. A integração desses elementos permite correlacionar os valores obtidos nas análises laboratoriais com o estado funcional da turbina, proporcionando maior precisão na identificação de desvios, tendências de degradação e possíveis mecanismos de falha incipiente.

A Figura 7 apresenta uma fotografia mostrando o compartimento das bombas de lubrificação (abaixo fica o tanque de armazenamento) e painel que é ponto de coleta de óleo.

Figura 7 – Módulo e central de lubrificação da turbina a gás



Fonte: Dados do próprio autor.

Experimentos conduzidos por YAO *et al.* (2021) demonstraram que a presença de cobre e ferro influencia a composição química e as propriedades físico-químicas do óleo lubrificante, sendo observado um escurecimento significativamente mais pronunciado nos óleos contendo cobre em temperaturas elevadas.

Para que uma turbina a gás entre em operação, é necessário mantê-la em regime de baixa rotação por determinado período. Estudos de SU *et al.* (2024) demonstraram que, nessas condições de baixa velocidade, partículas metálicas de ferro e não metálicas de cobre atuam diretamente na interface tribológica, intensificando o engrenamento entre as asperezas superficiais e, conseqüentemente, elevando o coeficiente de atrito.

Na turbina a vapor, a análise do óleo é essencial para verificar sua conformidade operacional. Como a contaminação do sistema de lubrificação é uma das principais causas de falhas (AHN *et al.*, 1996), o monitoramento do óleo permite identificar degradação e detectar falhas incipientes.

A Figura 8 apresenta um registro fotográfico do compartimento do módulo de óleo da turbina a vapor, destacando, o ponto de coleta associado à unidade de lubrificação, o qual é de interesse para as análises realizadas no presente estudo.

Figura 8 – Módulo/ compartimento e central de lubrificação da turbina a vapor



Fonte: Dados do próprio autor.

Assim como em bombas e compressores, projetos inadequados do sistema de selagem de vapor podem permitir a entrada de água no óleo lubrificante e representam uma causa significativa de redução da confiabilidade em trens motrizes acionados por turbinas a vapor, sendo que vazamentos de óleo em turbinas de alta pressão já foram associados à ocorrência de incêndios (FORSTHOFFER, 2022).

A bomba de alimentação de caldeira, do tipo centrífuga multiestágio operando em níveis de pressão elevados, depende diretamente de um sistema de lubrificação eficiente para garantir desempenho adequado e confiabilidade operacional. Os mancais localizados nas extremidades da bomba são lubrificados por óleo por meio de um sistema centralizado, cuja função é reduzir o atrito, dissipar o calor gerado pela rotação em alta carga e evitar o desgaste prematuro dos componentes rotativos. O óleo lubrificante também contribui para a estabilidade mecânica do conjunto, assegurando o alinhamento dinâmico do rotor e minimizando vibrações que poderiam comprometer os selos mecânicos e o acoplamento metálico. Em condições severas de operação, como alta pressão, elevada rotação e bombeamento contínuo de água desmineralizada, a integridade do lubrificante torna-se determinante para prevenir falhas em mancais, garantir a vida útil do equipamento e evitar paradas não programadas na unidade de geração de vapor. Dessa forma, o monitoramento

sistemático das propriedades físico-químicas do óleo é essencial para assegurar o funcionamento seguro e eficiente da bomba.

A Figura 9 apresenta a bomba centrífuga de alimentação de caldeira do tipo multiestágios, bem como sua respectiva unidade de lubrificação forçada, com destaque para o tanque de armazenamento de óleo, componente essencial para a manutenção das condições operacionais do sistema. Esse conjunto é responsável por assegurar o fornecimento adequado de lubrificante aos componentes mecânicos, contribuindo para a redução do atrito, do desgaste e para a confiabilidade operacional do equipamento.

Figura 9 – Unidade de Lubrificação Forçada (ULF) da bomba centrífuga de multiestágio KSB (horizontal) de alimentação de caldeira



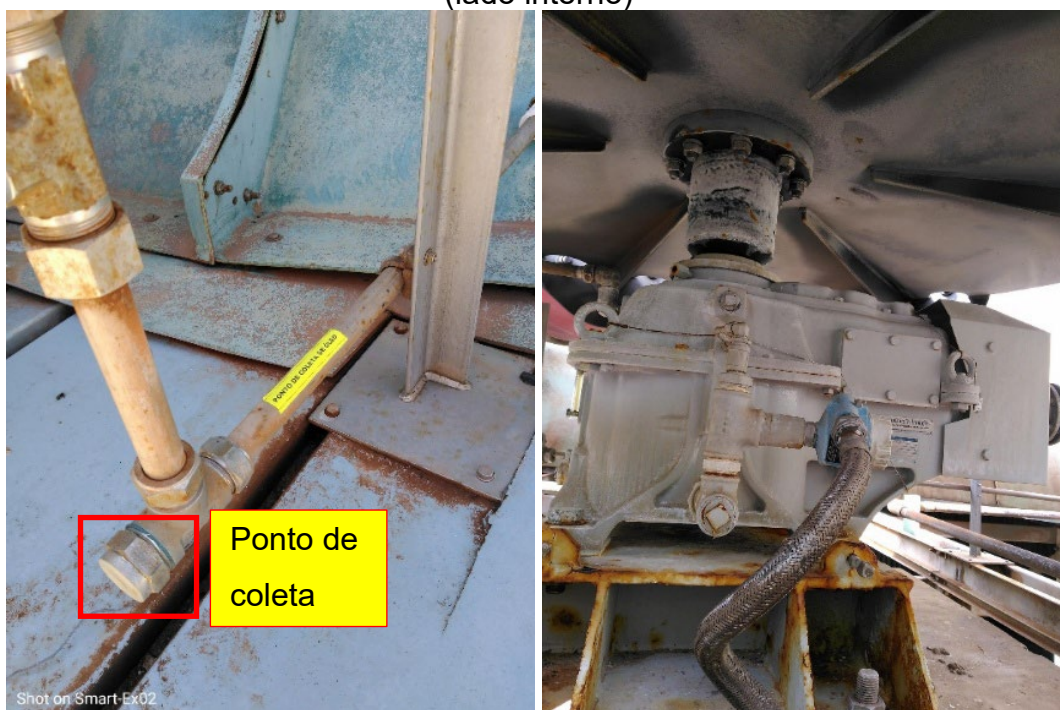
Fonte: Dados do próprio autor.

O redutor de velocidade Sumitomo da série SFC (*Sumitomo Drive Technologies*), empregado em aplicações industriais de alta carga e com eixos perpendiculares, depende de um sistema de lubrificação adequado para garantir seu desempenho e prolongar sua vida útil. Para prevenir danos ao redutor, é fundamental realizar a substituição do lubrificante antes que suas propriedades físico-químicas atinjam níveis críticos de degradação, conforme indicado por LIU *et al.* (2025). O conjunto de engrenagens helicoidais e mancais opera em regime de lubrificação por imersão, exigindo óleo de viscosidade e estabilidade térmica compatíveis com as condições severas de operação, caracterizadas por elevados torques, impactos e ambiente com dissipação térmica limitada. O óleo lubrificante do redutor possui viscosidade de 319,1 cSt. Fluidos mais viscosos apresentam maior resistência ao cisalhamento (AIREY, 2020). A eficiência da lubrificação é determinante para minimizar desgaste, reduzir atrito e controlar a temperatura interna do redutor,

prevenindo falhas prematuras em engrenagens, rolamentos e selos. O projeto incorpora pontos de inspeção e drenagem para facilitar o monitoramento do fluido lubrificante, tornando essencial a verificação periódica de nível, viscosidade, oxidação e contaminação.

Conforme indicado na Figura 10 que apresenta o lado externo (ponto de coleta), bem como o equipamento que é um redutor de engrenagens helicoidais com redução de 12,5 para 1, integrante do sistema de ventilação (lado interno), evidenciando os elementos relevantes para a análise do sistema de lubrificação.

Figura 10 – Ponto de coleta de óleo (lado externo) e o redutor de engrenagens helicoidais com redução de 12,5 para 1, modelo SUMITOMO SFC055R2GS RRF (lado interno)



Fonte: Dados do próprio autor.

Para reduzir os efeitos da sedimentação de partículas, ZHANG *et al.* (2026) mantém-se a amostra de óleo sob agitação oscilatória contínua por meio de um motor linear, garantindo a homogeneidade da suspensão e a uniformidade da concentração durante a aquisição dos dados. Para assegurar a representatividade da análise, a amostra de óleo é mantida sob agitação, de modo a promover a dispersão das partículas sedimentadas e garantir sua distribuição homogênea no fluido.

A partir da fundamentação apresentada nesta Seção, que compreendeu a caracterização da usina termelétrica e de seus equipamentos, a revisão da literatura

técnico-científica e os princípios associados à detecção de contaminantes em óleos lubrificantes, estabeleceu-se a base para o desenvolvimento experimental deste estudo. Nesse contexto, a Seção 3 apresenta os materiais e métodos empregados, abrangendo a preparação de amostras com contaminação artificial em laboratório, a configuração dos circuitos eletrônicos e a aplicação do sensor de óleos industriais, de modo a avaliar experimentalmente os fundamentos discutidos no desenvolvimento teórico.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Primeiramente foi projetado e construído um sensor para auxiliar nas análises dos lubrificantes dos equipamentos de uma usina.

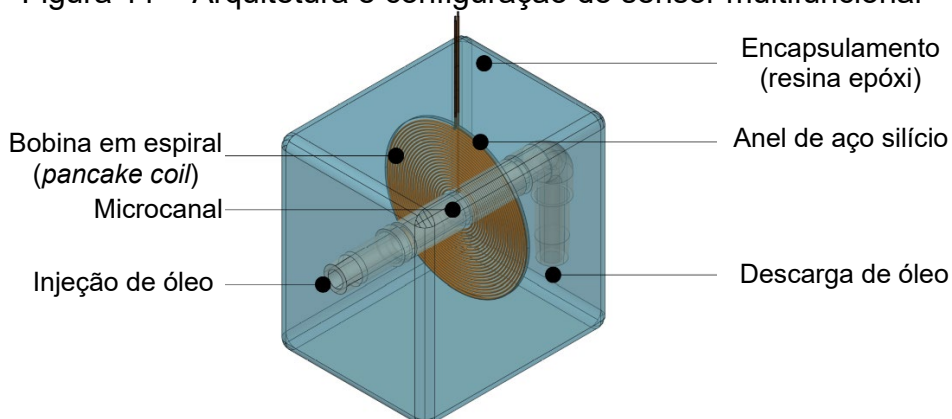
3.1 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO SENSOR

O desenvolvimento e a montagem do sensor seguiram a configuração apresentada na Figura 11, baseada em uma arquitetura previamente investigada em óleo hidráulico com contaminação artificial. Embora mantido o princípio construtivo, foram adotadas diferentes configurações de bobina quanto ao número de espiras, além de um microcanal com diâmetro interno de 3 mm, superior ao empregado no estudo de referência.

A bobina foi confeccionada com fio de cobre esmaltado calibre 41 AWG, com diâmetro de 71 μm , totalizando 24 espiras. Suas dimensões finais são: 28 mm de diâmetro externo, 1 mm de espessura e indutância de 19,2 μH . O anel de silício utilizado (modelo 20JNEH1200) possui 0,2 mm de espessura e 1 mm de largura, circundando toda a periferia da bobina.

O microcanal foi construído a partir de um tubo de silicone com 5 mm de diâmetro externo. Esse tubo apresenta entrada de 4 mm que afunila para 3 mm (diâmetro correspondente à região de detecção) e saída também de 4 mm de diâmetro. O sensor passou por adaptações para viabilizar sua operação em óleos lubrificantes de elevada viscosidade, como o fluido empregado nos ensaios, cuja viscosidade é de 366,7 cSt a 40 °C.

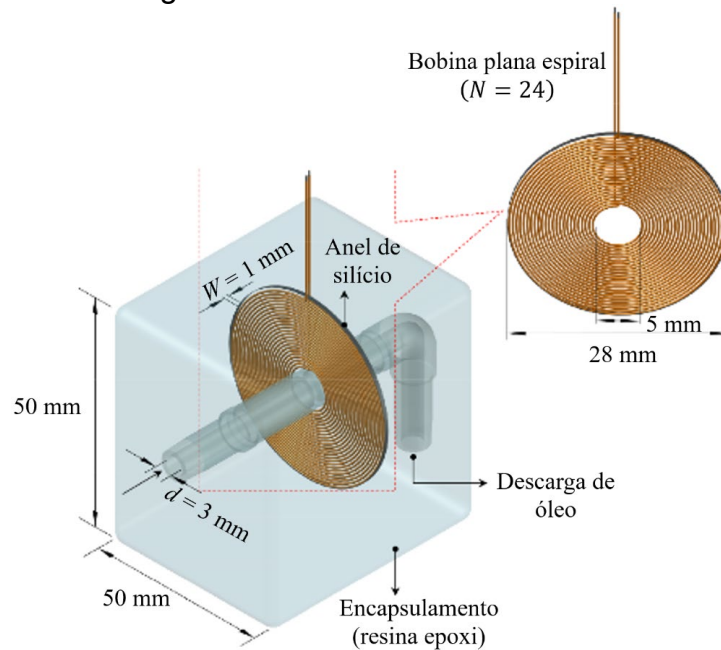
Figura 11 – Arquitetura e configuração do sensor multifuncional



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A fabricação do sensor foi realizada utilizando uma bobina comercial previamente confeccionada. Os tubos de entrada e saída do óleo foram acoplados diretamente ao segmento de silicone que compõe o microcanal. O anel de silício foi produzido a partir do recorte de uma lâmina ultrafina, com espessura de 0,2 mm, dimensionada de acordo com o perímetro externo da bobina (BEZERRA; GONÇALVES, 2025). A Figura 12 mostra as dimensões do sensor.

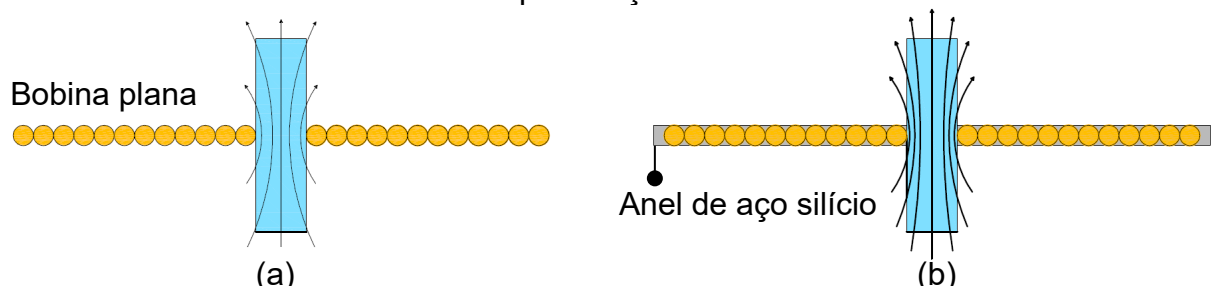
Figura 12 – Dimensões do sensor



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 13 apresenta a configuração do sensor utilizando a bobina plana, comparando as condições com e sem a presença do anel de silício. Observa-se que a inclusão do anel de silício tende a intensificar o campo magnético gerado, resultando em um aumento da sensibilidade do sensor.

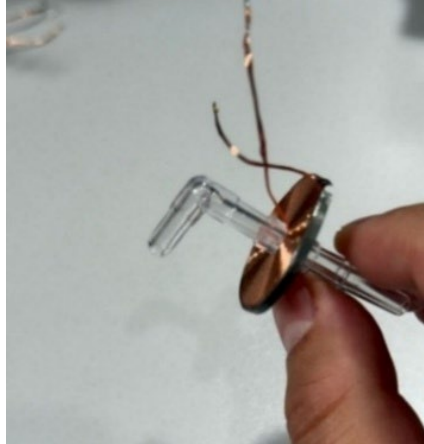
Figura 13 – Representação das regiões de detecção associadas a sensores indutivos empregando (a) bobina plana e (b) bobina plana acoplada a um anel de chapa de aço silício.



Fonte: SHI, *et al.* (2019). (Adaptado pelo autor)

Após essa etapa, o conjunto montado foi inserido em um molde e encapsulado com resina epóxi transparente, cuja cura completa ocorre em aproximadamente 72 horas. Para fins comparativos, foi construído um segundo sensor idêntico, porém sem o anel de silício, possibilitando avaliar e contrastar o desempenho entre as duas configurações. A Figura 14 apresenta o sensor fabricado.

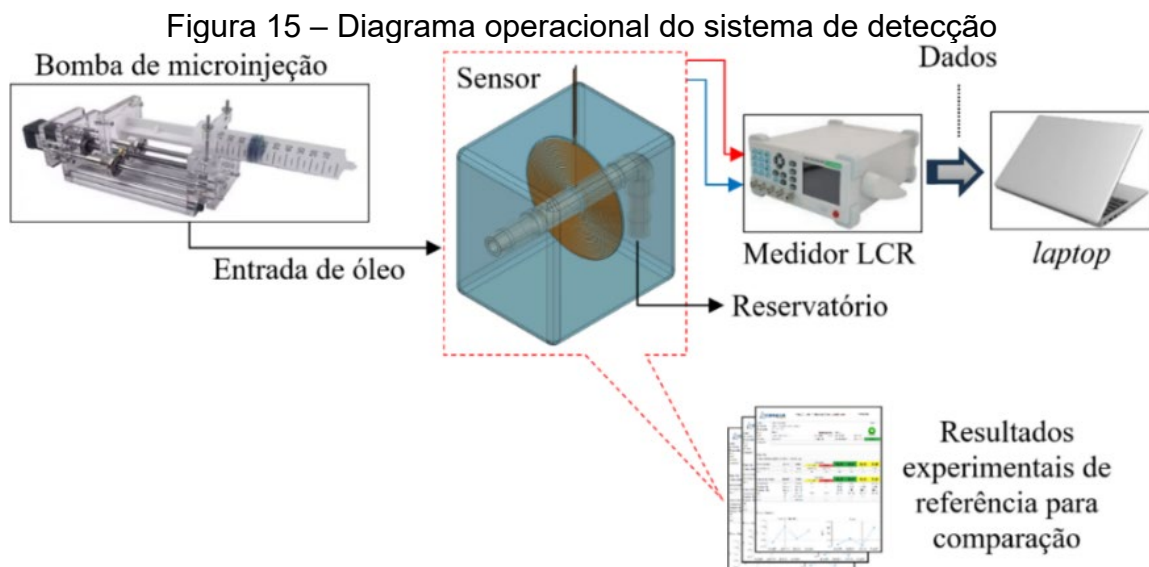
Figura 14 – Sensor preliminar projetado para aplicações experimentais



Fonte: Dados do próprio autor.

3.2 SISTEMA DE DETECÇÃO DE VARIAÇÃO DA IMPEDÂNCIA

O sistema de detecção e diagnóstico desenvolvido para este estudo, apresentado na Figura 15, é composto por seis módulos principais responsáveis pelo controle de fluxo, excitação elétrica, aquisição de sinais e processamento dos dados.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O mecanismo de fluxo é baseado em uma bomba injetora do tipo *push-pull*, modelo QHZS-001B, capaz de exercer força de 60 N, com curso de 140 mm e velocidade ajustável entre 0,01 mm/min e 150 mm/min. Uma seringa descartável de 40 mL, com ponta tipo cateter, é acoplada à bomba, permitindo o controle preciso da vazão do óleo ao longo do microcanal de detecção. Essa precisão é essencial, pois a estabilidade do regime de escoamento influencia diretamente a resposta do sensor, considerando que variações abruptas na velocidade podem modificar tanto o tempo de interação das partículas com o campo elétrico e magnético quanto a coerência dos pulsos detectados.

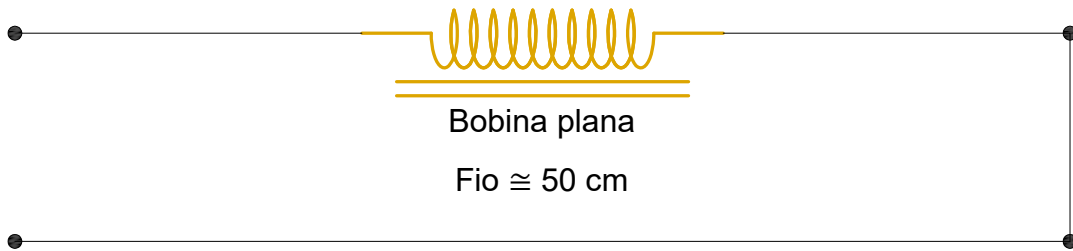
A bobina plana foi conectada a um medidor LCR, configurado para aplicar tensão de 2,0 V a uma frequência de 2,0 MHz durante os ensaios baseados nos parâmetros de indutância e resistência. A bomba de microinjeção foi ajustada para uma vazão linear de $8,33 \cdot 10^{-4}$ m/s, correspondente ao volume total processado de 20 mL. Nos ensaios capacitivos, o medidor LCR operou a 0,3 MHz e 2,0 V, condições selecionadas para maximizar a sensibilidade a variações nas propriedades dielétricas do fluido analisado.

As variações nos parâmetros elétricos do sensor foram analisadas e correlacionadas com os lubrificantes contaminados artificialmente e com resultados tribológicos obtidos conforme normas internacionais ISO, SAE, NAS, ASTM e NBR à partir do laboratório, permitindo avaliar a sensibilidade do dispositivo.

Para a realização do estudo, foi concebido e implementado um circuito elétrico do tipo LC, cuja finalidade consistiu na investigação do comportamento eletromagnético do sistema frente a variações induzidas pela presença de partículas metálicas em meio dielétrico. O desenvolvimento experimental envolveu não apenas a montagem física do circuito, mas também o criterioso dimensionamento de seus componentes, bem como a caracterização elétrica individual de cada elemento constituinte, de modo a garantir a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados obtidos.

Inicialmente, procedeu-se ao dimensionamento do circuito LC a partir dos princípios fundamentais da teoria de circuitos elétricos lineares. A Figura 16 é a o teste para a indução no indutor (bobina plana) e no cabo.

Figura 16 – Indução no cabo



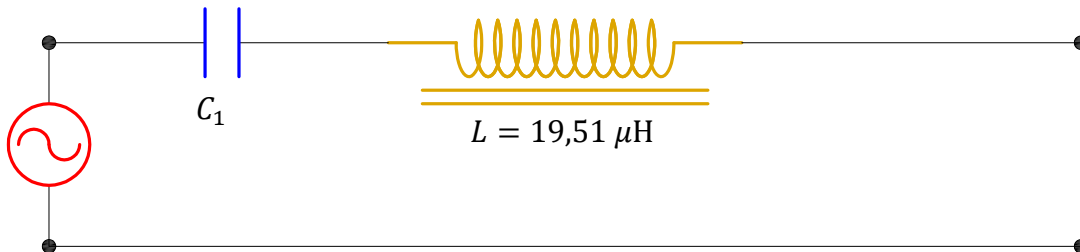
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A especificação do capacitor comercial C_1 é necessário para a montagem do circuito LC e encontrar o capacitor C conforme a Eq. (33):

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C}. \quad (33)$$

A Figura 17 apresenta o circuito LC, com destaque para o valor da indutância (bobina plana com a chapa de silício ou unidade sensora) determinado por meio de um medidor RLC portátil, evidenciando o procedimento experimental adotado para a caracterização do sistema.

Figura 17 – Especificação do capacitor para o circuito LC



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

De acordo com ALEXANDER e SADIKU (2020), considerando um circuito série composto por uma resistência R e uma indutância L , a relação entre tensão e corrente no domínio do tempo é descrita pela equação diferencial (Eq. 34):

$$V(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}. \quad (34)$$

A resposta do sistema a excitações senoidais foi analisada no domínio da frequência, utilizando a representação fasorial. Nesse contexto, a impedância equivalente do circuito RL é dada pela Eq. (35):

$$Z(\omega) = R + j\omega L, \quad (35)$$

onde ω representa a frequência angular da excitação, e j é a unidade imaginária. A magnitude da impedância (ALEXANDER; SADIKU, 2020) pode ser expressa pela Eq. (36):

$$|Z(\omega)| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (36)$$

Essa relação evidencia a dependência direta da resposta do circuito com a frequência, característica fundamental explorada neste trabalho para a detecção de variações associadas à presença de contaminantes metálicos.

A etapa seguinte consistiu na caracterização da bobina plana (indutor), elemento sensível do sistema. Foram realizados ensaios para determinação precisa da indutância L e capacitância C . A indutância foi medida experimentalmente por meio de excitação controlada e análise da resposta em frequência.

Adicionalmente, avaliou-se o efeito do cabo de conexão no comportamento global do sistema. Em aplicações de alta sensibilidade, como a proposta neste estudo, o cabo não pode ser considerado um elemento ideal, uma vez que apresenta capacitância parasita e resistência distribuída. Tais características introduzem efeitos adicionais, especialmente em frequências elevadas, podendo alterar a resposta do circuito e, conseqüentemente, a interpretação dos sinais medidos.

Embora o foco principal tenha sido o circuito LC, incorporou-se um capacitor ao sistema com o objetivo de explorar o fenômeno de ressonância elétrica, formando, na prática, um circuito RLC. A inclusão desse elemento permitiu aumentar a sensibilidade do sistema a pequenas variações nos parâmetros elétricos, uma vez que, na condição de ressonância, o circuito apresenta comportamento altamente seletivo em frequência.

A frequência de ressonância do sistema (ALEXANDER; SADIKU, 2020), foi determinada teoricamente a partir da relação clássica ($X_L = X_C$) na Eq. (37):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (37)$$

A frequência de ressonância é determinada pela indutância da bobina (L) e pela capacitância externa (C) de acordo com a relação padrão de ressonância LC, onde L varia dinamicamente à medida que partículas metálicas perturbam o campo magnético.

Nessa condição, as reatâncias indutiva e capacitiva se anulam ($\omega L = 1/\omega C$), resultando em uma impedância puramente resistiva. Espera-se que variações na indutância, provocadas pela presença de partículas metálicas no interior ou nas proximidades do campo magnético da bobina, acarretam deslocamentos na frequência de ressonância.

Durante os ensaios, foram aplicados sinais de excitação senoidais com varredura em frequência, permitindo a obtenção de curvas de resposta do sistema. A aquisição dos dados foi realizada por meio de um osciloscópio digital de alta resolução, especificamente o Agilent InfiniiVision DSO-X 2024A, equipamento que possibilita medições precisas no domínio do tempo e da frequência. Os vetores de dados correspondentes às formas de onda de tensão e corrente foram registrados e posteriormente processados para extração de parâmetros relevantes.

A utilização do osciloscópio permitiu ainda a análise da resposta transitória do circuito, particularmente durante a energização e desenergização do sistema.

Os dados experimentais obtidos foram organizados em vetores e submetidos a tratamento estatístico e análise comparativa. A correlação entre as variações dos parâmetros elétricos e a presença de partículas metálicas foi estabelecida por meio da observação de deslocamentos na frequência de ressonância, alterações na impedância e mudanças no fator de qualidade do circuito.

O sensor foi projetado para identificar variações nos parâmetros elétricos (indutância, resistência e capacitância), cujos picos de resposta são esperados conforme o tipo e a concentração das partículas presentes no fluido. Esses parâmetros refletem, respectivamente, mudanças nos fenômenos de magnetização, correntes parasitas (*eddy currents*) e polarização dielétrica, conceitos amplamente explorados na literatura de sensores eletromagnéticos.

A aquisição dos sinais elétricos é realizada por um medidor LCR modelo E4980A, Agilent/Keysight (Figura 18), responsável por aplicar uma corrente alternada ao sensor e medir, em tempo real, sua impedância complexa. As informações coletadas são enviadas a um computador por meio de um dispositivo de conversão

analógico-digital, assegurando integridade e resolução adequadas à análise dos pulsos gerados pelas partículas.

Figura 18 – Medidor LCR de precisão E4980A Agilent/Keysight de 20 Hz a 2 MHz



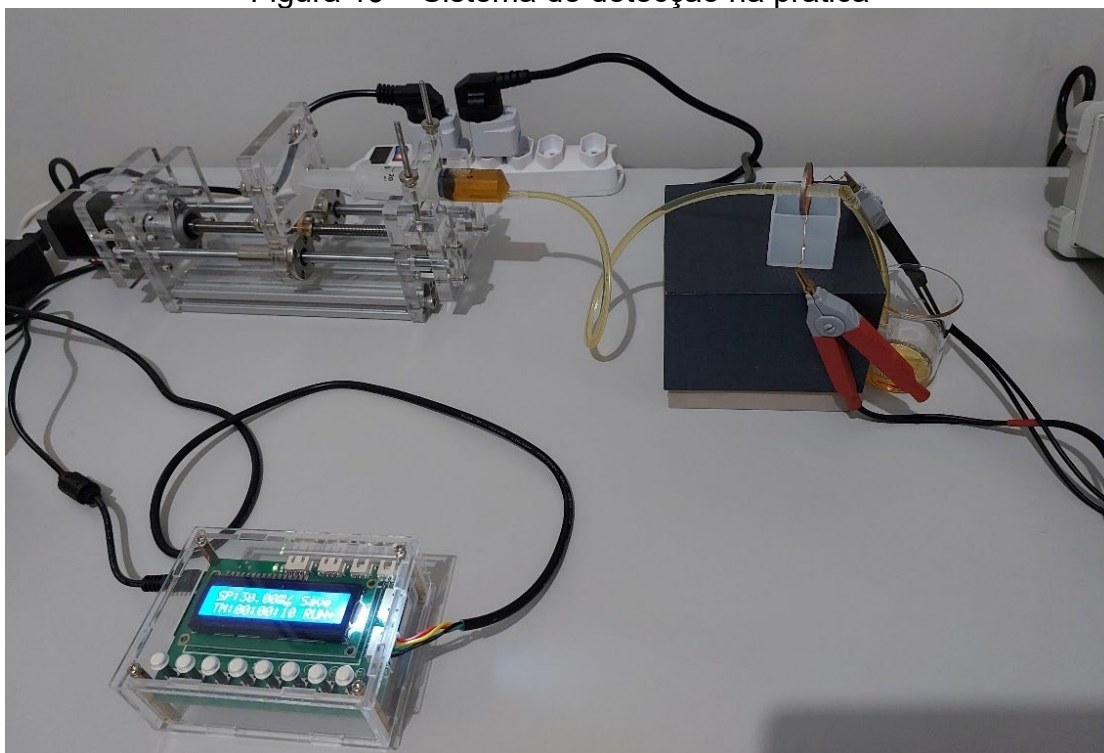
Fonte: Ficha técnica Keysight Technologies.

A interface de armazenamento, exibição e gerenciamento dos dados foi desenvolvida na plataforma LabVIEW, possibilitando supervisão contínua e organização sistemática das medições. Paralelamente, um *script* MATLAB é empregado para o processamento detalhado dos sinais, incluindo detecção de pulsos, análise quantitativa e inferência qualitativa do tipo de partícula. Esse processamento permite distinguir, por exemplo, partículas ferromagnéticas, não ferromagnéticas, gotas de água ou bolhas de ar, com base nas assinaturas elétricas obtidas pelos modos resistivo, indutivo e capacitivo.

À medida que as partículas atravessavam a região sensora, foram observadas variações na impedância da bobina, manifestadas na forma de pulsos nos valores de indutância e resistência elétrica. Esses pulsos são respostas características dos fenômenos eletromagnéticos previamente descritos: partículas ferromagnéticas tendem a intensificar o fluxo magnético local, gerando pulsos positivos de indutância e resistência, enquanto partículas não ferromagnéticas, como alumínio, destacam-se principalmente pela indução de correntes parasitas, resultando em variações distintas entre os parâmetros elétricos.

A Figura 19 demonstra o sistema montado.

Figura 19 – Sistema de detecção na prática



Fonte: Dados do próprio autor.

Após atravessar o módulo sensor, o fluido analisado é encaminhado a um reservatório de coleta, onde permanece armazenado até sua destinação final ou eventual reaproveitamento, em conformidade com o protocolo experimental adotado. Essa etapa garante a rastreabilidade das amostras e a segurança do processo, especialmente considerando que algumas podem conter contaminantes de interesse diagnóstico. As análises *off-line* (coleta) são realizadas trimestralmente.

O método capacitivo foi empregado nas amostras de óleo lubrificante com o objetivo de verificar a presença de contaminação por água e a ocorrência de bolhas de ar no fluido. Nesse experimento, utilizou-se exclusivamente o sensor equipado com o anel de aço silício acoplado à bobina, uma vez que essa configuração se comporta como um capacitor de placas paralelas, possibilitando a detecção de variações na permissividade dielétrica do meio: grandeza diretamente relacionada ao teor e ao tipo de contaminante presente.

A operação do sensor baseia-se no fato de que a capacitância é proporcional à permissividade elétrica do material situado entre as “placas” equivalentes. Assim, a passagem de água ou ar provoca perturbações distintas no campo elétrico gerado pelo sistema sensor, resultando em respostas capacitivas características. A água, por apresentar permissividade relativa significativamente maior que a do óleo mineral,

produz aumento da capacitância local, manifestado como pulsos positivos. Por outro lado, bolhas de ar, cuja permissividade é muito inferior, que reduzem a capacitância efetiva, originando pulsos negativos. Esse contraste dielétrico permite, portanto, discriminar com elevado grau de confiabilidade os dois tipos de contaminantes.

3.3 TESTES DE VALIDAÇÃO DO SENSOR

O sensor foi avaliado com base nos princípios elétricos de um circuito LC, visando à detecção de partículas metálicas dispersas em óleo mineral puro de grau farmacêutico. Para a validação experimental, foram conduzidos ensaios controlados utilizando tanto o óleo em sua condição original quanto amostras contaminadas com adições conhecidas de partículas de ferro e cobre, com granulometria correspondente à malha 325. A Figura 20 mostra os metais utilizados para a contaminação das amostras de óleo e uma mini balança de alta precisão (0,001 g) marca *Professional Scale* modelo PRO-50.

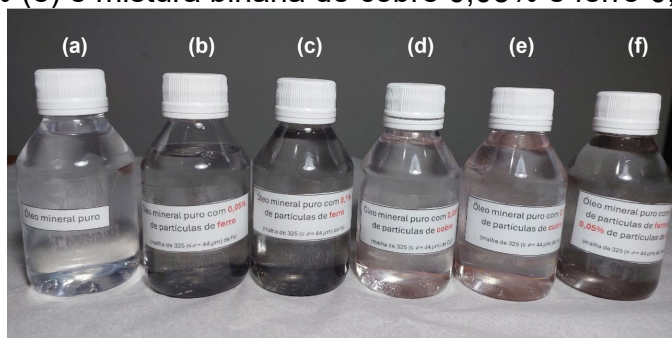
Figura 20 – Partículas de ferro e cobre correspondente à malha 325 (abertura entre 40 μm e 44 μm) e determinação da massa por meio de balança de alta precisão



Fonte: Dados do próprio autor.

As concentrações adotadas foram de 0,05% e 0,1% em massa, incluindo também uma condição de mistura binária (0,05% de Fe e 0,05% de Cu) entre os dois materiais, com o objetivo de reproduzir diferentes níveis de contaminação encontrados em sistemas de lubrificação. A condição de mistura binária foi empregada para representar situações reais de desgaste, nas quais partículas de diferentes composições metálicas coexistem no lubrificante em decorrência da degradação simultânea de distintos componentes mecânicos. A Figura 21 mostra a contaminação artificial do óleo mineral nas concentrações.

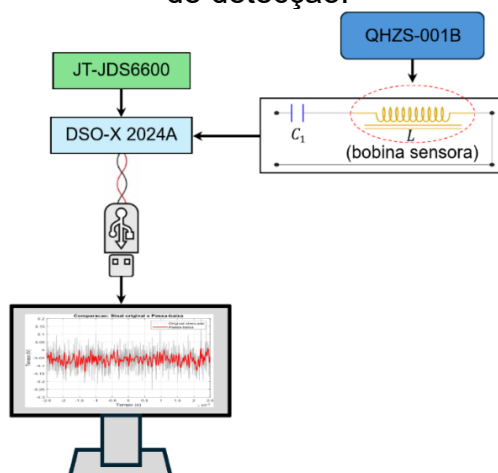
Figura 21 – Amostras de 100 mL de óleo mineral puro (10,8 cSt): óleo puro (a), óleo com partículas de ferro 0,05% (b) e 0,1% (c), óleo com partículas de cobre 0,05% (d) e 0,1% (e) e mistura binária de cobre 0,05% e ferro 0,05% (f)



Fonte: Dados do próprio autor.

Durante os experimentos, foram monitoradas as variações nos parâmetros elétricos do sensor, especialmente aquelas associadas à resposta indutiva e resistiva do sistema, as quais se mostraram sensíveis à presença, concentração e natureza das partículas metálicas. A Figura 22 ilustra o projeto desenvolvido com base no princípio de detecção adotado.

Figura 22 – Estrutura construtiva e princípio de funcionamento do sistema eletrônico de detecção.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 23 apresenta o osciloscópio Agilent InfiniiVision DSO-X 2024A, utilizado na aquisição e no registro dos sinais experimentais empregados na análise das amostras de óleo mineral. Esse equipamento possibilitou a leitura dos vetores de dados no domínio do tempo, garantindo adequada captura das variações elétricas. Os dados obtidos por meio do osciloscópio constituíram a base para o processamento e a interpretação dos sinais, contribuindo para a avaliação do desempenho do sensor proposto.

Figura 23 – Osciloscópio gerando o sinal elétrico do óleo mineral contaminado



Fonte: Dados do próprio autor.

Para a caracterização do sistema experimental, utilizou-se um gerador de sinais JT-JDS6600 operando a 2,0 MHz, associado ao osciloscópio e ao circuito LC desenvolvido. O controle do fluxo das amostras foi realizado por uma bomba *push-pull* modelo QHZS-001B, enquanto os parâmetros elétricos dos componentes foram determinados com um medidor LCR Minipa MX-1050. O Quadro 2 apresenta as frequências utilizadas e os valores de reatância indutiva obtidos experimentalmente no circuito LC.

Quadro 2 – Frequências e reatância indutiva no circuito LC

Teste	Frequência (Hz)	Indução (μH)	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)
Indutor (bobina plana)	10.000	19,51	4,9	
	100.000	19,47	37	
Indução no cabo	10.000	20,76	2,66	1,22
	100.000	20,67	23,3	12,23
	1.000.000	19,47	37	122,33
	2.000.000	19,47	37	244,67

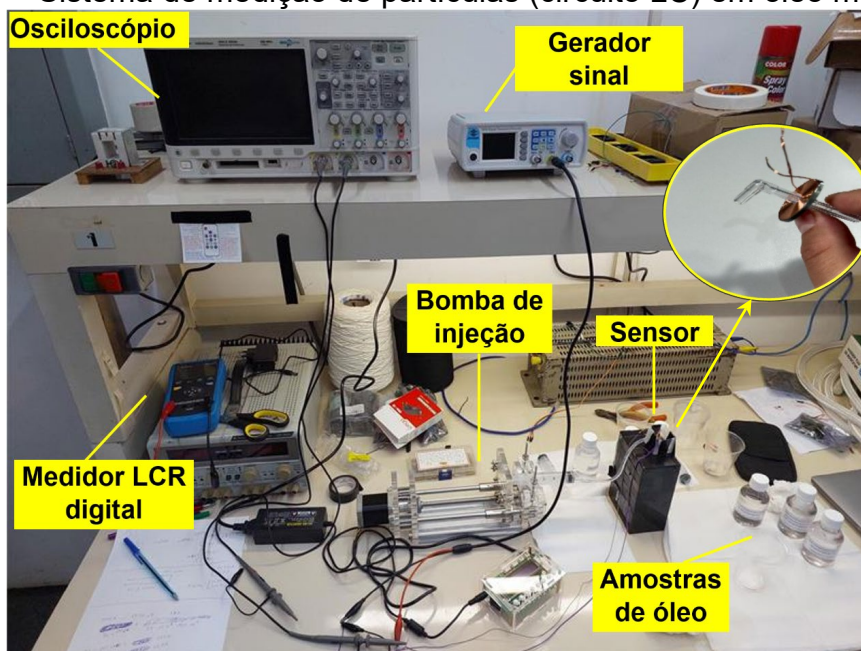
Fonte: Dados do próprio autor.

As frequências de ensaio foram definidas em diferentes ordens de grandeza, entre 10 kHz e 2 MHz, com o objetivo de caracterizar a resposta elétrica da bobina e avaliar a influência da frequência sobre sua reatância indutiva, conforme $X_L = 2\pi fL$. Essa faixa permitiu verificar progressivamente o comportamento do circuito LC,

adotando-se 2 MHz como frequência de operação nos ensaios experimentais do sensor.

A integração desses equipamentos possibilitou a obtenção de medições reproduzíveis, assegurando maior rigor na análise do comportamento elétrico do sistema sensor em estudo. A Figura 24 ilustra a configuração do circuito de medição e a instrumentação empregada nos ensaios experimentais.

Figura 24 – Sistema de medição de partículas (circuito LC) em óleo mineral puro



Fonte: Dados do próprio autor.

Considerando a frequência de excitação adotada de 2 MHz, a reatância indutiva do circuito foi determinada como $X_L = 244,67 \, \Omega$. Com base na condição de ressonância em circuitos do tipo LC, na qual a reatância indutiva se iguala à reatância capacitiva (X_C), procedeu-se ao dimensionamento do capacitor equivalente do sistema. A partir dessa relação, foi possível estimar um valor de capacitância de aproximadamente $C = 325 \, \text{pF}$, compatível com a frequência de operação e com as características elétricas dos componentes empregados. Esse ajuste é fundamental para garantir a adequada resposta em frequência do circuito, maximizando a sensibilidade do sistema às variações provocadas pela presença de partículas no meio analisado. O capacitor comercial utilizado foi $C_1 = 331 \, \text{pF}$, pois $C_1 \geq C$. A frequência de ressonância foi $f_0 \cong 1,97 \, \text{MHz}$.

Os resultados obtidos foram posteriormente analisados de forma comparativa e correlacionados com parâmetros tribológicos determinados segundo normas

internacionais, permitindo não apenas a validação do método proposto, mas também a avaliação de sua capacidade em identificar e diferenciar mecanismos de desgaste e contaminação em sistemas lubrificados.

3.3.1 Projeto do oscilador

Considerando $L = 19,2 \mu\text{H}$ e frequência de ressonância de 2 MHz, a capacitância equivalente necessária é aproximadamente $C_{eq} \approx 330 \text{ pF}$. Então, para ressonar em torno de 2 MHz, o circuito precisa “enxergar” aproximadamente $L = 19,2 \mu\text{H}$ e $C_{eq} = 330 \text{ pF}$.

Quadro 3 – Sugestão inicial considerando a teoria

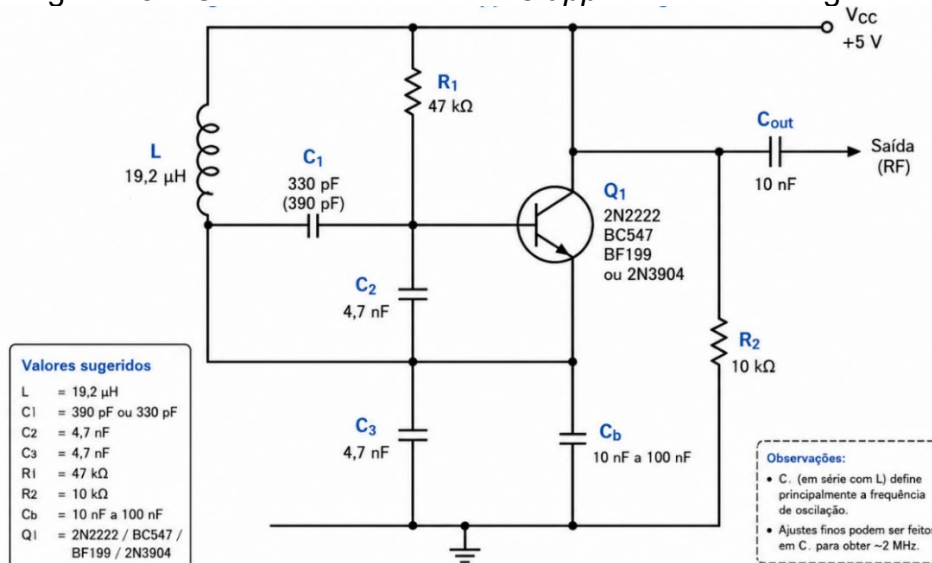
Componente	Valor
L	19,2 μH
C1	390 pF ou 330 pF
C2	4,7 nF
C3	4,7 nF
R1	47 k Ω
R2	10 k Ω
Cb	10 nF a 100 nF
Q1	2N2222, BC547, BF199 ou 2N3904

Fonte: Dados do próprio autor.

A validação do sensor foi realizada por meio da análise das amplitudes dos sinais adquiridos no osciloscópio a partir do circuito desenvolvido. Observou-se que o aumento da contaminação do óleo resultou em maiores amplitudes de tensão no eixo das ordenadas. Posteriormente, os sinais foram processados no MATLAB, mediante a aplicação de um filtro passa-baixa, permitindo atenuar componentes de alta frequência e identificar com maior clareza os picos de amplitude e seus respectivos valores.

Como no oscilador *Clapp* o capacitor C1 em série costuma dominar a capacitância equivalente, pode-se começar com $C1 = 330 \text{ pF}$ e $C2 = C3 = 4,7 \text{ nF}$. Assim, a frequência ficará próxima de 2 MHz. Isto é, Para uma bobina sensora com indutância nominal de $19,2 \mu\text{H}$, a capacitância equivalente necessária para operação em torno de 2 MHz é de aproximadamente 330 pF. A Figura 25 mostra a implementação de um circuito do oscilador *Clapp*.

Figura 25 – Circuito com oscilador *Clapp* com valores sugeridos



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 ENSAIOS EM LUBRIFICANTES INDUSTRIAIS UTILIZANDO O SENSOR

As amostras de óleo utilizadas apresentam diagnóstico de contaminação previamente determinado pelo Laboratório Infralub, o que permite estabelecer correlação entre os níveis reais de impurezas e as respostas elétricas registradas.

As amostras de óleo lubrificante utilizadas neste estudo foram coletadas em 4 de abril de 2025, a partir de diferentes equipamentos em operação em uma usina termelétrica, incluindo uma turbina a gás, uma turbina a vapor, a unidade de lubrificação da bomba de alimentação de caldeira e a caixa de engrenagens da torre de resfriamento. Para garantir que cada amostra fosse representativa das reais condições de operação, foram adotados procedimentos padronizados de homogeneização, considerando que a distribuição de partículas sólidas e fluidos contaminantes depende diretamente do regime de circulação e da temperatura do óleo.

Em conformidade com as práticas normativas aplicáveis à amostragem de lubrificantes em serviço, a coleta foi realizada com os equipamentos em condição operacional, visando assegurar maior representatividade das amostras. Ressalta-se que as normas consultadas não estabelecem um tempo universal de funcionamento prévio à coleta. Nas turbinas a gás e a vapor, foi solicitada a operação em modo *slow roll*, permitindo que o óleo circulasse continuamente por, no mínimo, 30 minutos antes

da coleta. Esse procedimento assegura a suspensão adequada das partículas metálicas e a estabilização térmica da amostra, fatores fundamentais para análises de contaminação baseadas em concentração e tipologia de partículas. Para o redutor da torre de resfriamento e para a bomba de alimentação da caldeira, manteve-se operação contínua por pelo menos 45 minutos antes da coleta, garantindo que partículas de desgaste e contaminantes líquidos estivessem uniformemente dispersos no fluido, evitando resultados subestimados ou inconsistentes. A Figura 26 a seguir mostra as amostras coletadas.

Figura 26 – Amostras de óleo coletadas dos equipamentos da termelétrica



Fonte: Dados do próprio autor.

As amostras de óleo lubrificante coletadas dos diferentes equipamentos, incluindo a turbina a gás, a turbina a vapor, a bomba de alimentação da caldeira pertencente ao sistema de unidade de lubrificação forçada (ULF) e o redutor de velocidade da torre de resfriamento, foram encaminhadas ao laboratório para a realização de um conjunto abrangente de análises.

A coleta foi realizada imediatamente após o desligamento dos equipamentos, de modo a preservar a suspensão dos contaminantes no fluido e, assim, obter maior concentração de partículas na amostra. Esse procedimento busca proporcionar uma análise mais precisa do estado do lubrificante e do nível de desgaste dos componentes internos.

Entre os ensaios efetuados, destacam-se os testes físico-químicos gerais, a determinação da viscosidade, a quantificação do teor de água e a avaliação do Número de Acidez Total (TAN). Complementarmente, foram conduzidas análises elementares visando à identificação de metais associados ao desgaste e de possíveis contaminantes, bem como a contagem de partículas sólidas presentes no fluido. Além disso, empregaram-se técnicas avançadas de diagnóstico, como a ferrografia analítica

e a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), permitindo uma caracterização aprofundada das condições de degradação do lubrificante e dos mecanismos tribológicos atuantes nos equipamentos avaliados. Essas análises integradas fornecem um panorama detalhado do estado de saúde dos sistemas lubrificados e subsidiam a tomada de decisão em estratégias de manutenção preditiva e gestão da confiabilidade operacional.

De modo geral, o monitoramento das condições do óleo pode ser classificado em técnicas offline e online (WU, *et al.*, 2013), em que envolve medir, acompanhar e analisar mudanças em lubrificantes e óleos combustíveis para detectar contaminantes, avaliar a composição química e determinar o nível de degradação do óleo desde novo até o fim de sua vida útil (PAN *et al.*, 2021 e CAO *et al.*, 2015).

Para a determinação de contaminantes associados à presença de água no óleo, foi aplicada a norma NBR 16358, permitindo correlacionar a eficiência do sensor com o comportamento real do lubrificante em serviço. Os métodos ASTM aplicados à análise de produtos petrolíferos e lubrificantes incluem técnicas físico-químicas e espectrométricas destinadas à determinação de propriedades e contaminantes presentes no óleo (NADKARNI, 2000).

As amostras de óleo lubrificante coletadas da turbina a gás foram previamente analisadas em laboratório, confirmando a presença de contaminantes particulados constituídos majoritariamente por ferro e partículas não ferrosas. Com base nessas informações, procedeu-se à detecção das partículas utilizando inicialmente o sensor composto por bobina planar acoplada ao anel de aço silício e, posteriormente, aplicando a mesma amostra ao sensor sem o anel, de modo a permitir comparação direta entre as duas configurações.

As análises laboratoriais das amostras de óleo lubrificante foram realizadas nas instalações da empresa Infralub, utilizando os equipamentos e procedimentos analíticos disponíveis para a caracterização das condições físico-químicas e dos contaminantes presentes nas amostras. A Figura 27 apresenta alguns dos equipamentos empregados durante a etapa de análise laboratorial.

Figura 27 – Laboratório de análise de óleo da empresa Infralub



Fonte: relatório técnico de cotação de serviços de manutenção preditiva em óleo lubrificante fornecido pela empresa Infralub.

O sistema LNF foi utilizado para a contagem automática e classificação granulométrica das partículas, enquanto a espectrometria ICP possibilitou a quantificação de metais de desgaste em suspensão no óleo, especialmente partículas inferiores menores. O laboratório também realizou ensaios de ferrografia analítica, Índice de Desgaste Ferroso (IDF) e contagem de partículas conforme as normas ISO 4406 e NAS 1638, permitindo uma avaliação abrangente das condições do lubrificante e diagnóstico de desgaste dos componentes mecânicos.

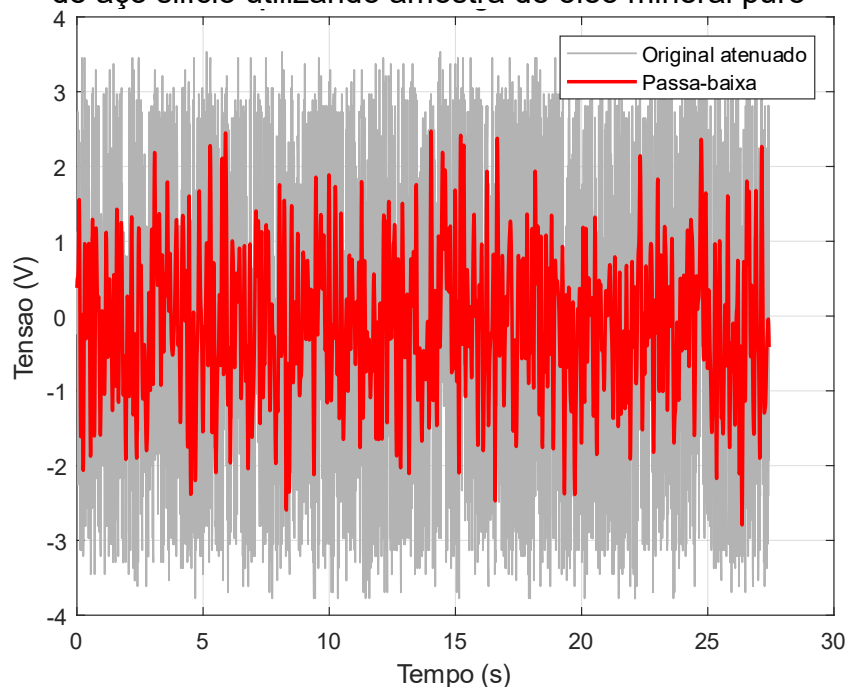
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Seguir são apresentados os resultados obtidos.

4.1 RESULTADOS UTILIZANDO ÓLEO MINERAL FARMACÊUTICO

A Figura 28 apresenta os sinais obtidos no sensor, sob as condições experimentais adotadas, utilizando óleo mineral puro.

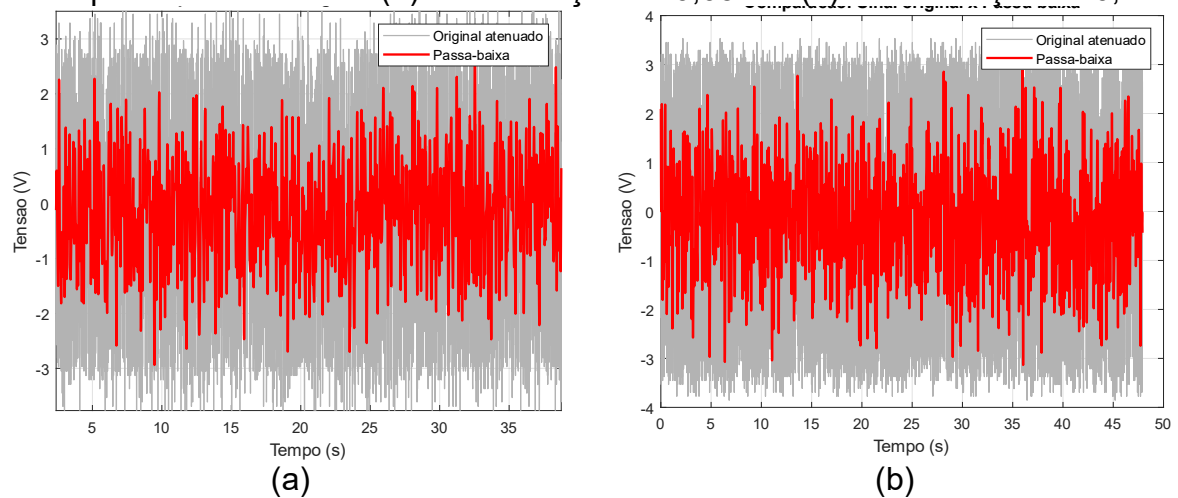
Figura 28 – Sinais experimentais obtidos por meio do sensor LC acoplado à chapa de aço silício utilizando amostra de óleo mineral puro



Fonte: Elaboração do próprio autor

Os sinais apresentados na Figura 29 correspondem aos resultados experimentais obtidos para amostras de óleo mineral *Ideal* contaminadas com partículas de cobre nas concentrações de 0,05% e 0,1%, permitindo avaliar a resposta do sensor à presença de contaminantes metálicos não ferromagnéticos que neste trabalho foi o cobre.

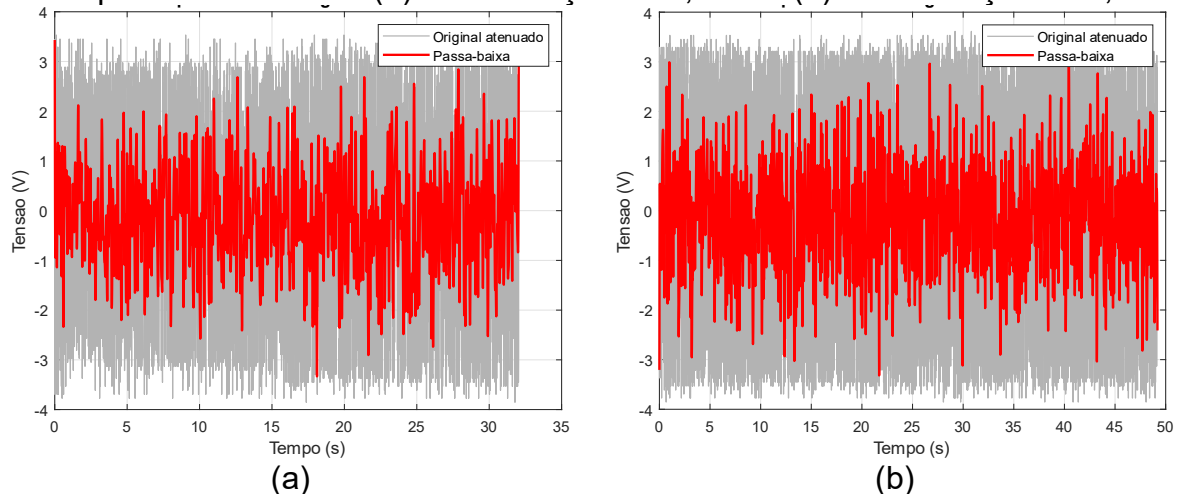
Figura 29 – Sinais experimentais obtidos por meio do sensor LC acoplado à chapa de aço silício utilizando amostras de óleo mineral puro artificialmente contaminadas com partículas de cobre: (a) concentração de 0,05% e (b) concentração de 0,1%



Fonte: Elaboração do próprio autor

Os sinais apresentados na Figura 30 correspondem aos resultados experimentais obtidos para as amostras de óleo mineral *Ideol* artificialmente contaminadas com partículas de ferro nas concentrações de 0,05% e 0,1%.

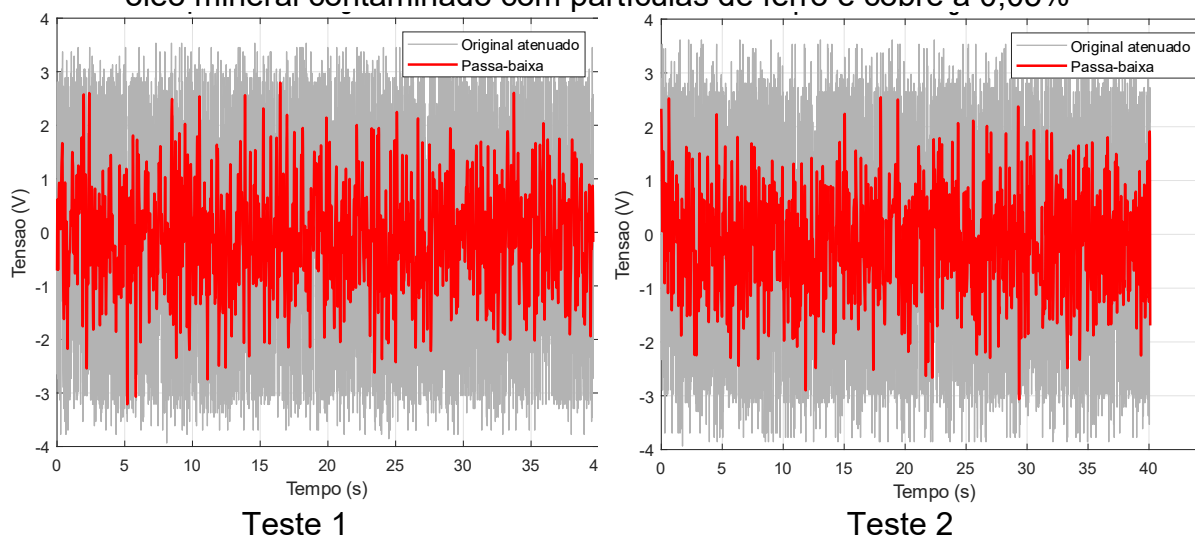
Figura 30 – Sinais experimentais obtidos por meio do sensor LC acoplado à chapa de aço silício utilizando amostras de óleo mineral puro artificialmente contaminadas com partículas de ferro: (a) concentração de 0,05% e (b) concentração de 0,1%



Fonte: Elaboração do próprio autor

Os sinais apresentados na Figura 31 correspondem aos resultados experimentais obtidos para amostras de óleo mineral *Ideol* artificialmente contaminadas com uma mistura de partículas de ferro e cobre, ambas na concentração de 0,05%.

Figura 31 – Sinais experimentais do sensor LC com chapa de aço silício utilizando óleo mineral contaminado com partículas de ferro e cobre a 0,05%



Fonte: Elaboração do próprio autor

4.1.1 Avaliação das amplitudes médias dos sinais e da razão sinal-ruído (*SNR*) obtida nos resultados experimentais usando o circuito LC e osciloscópio

A Tabela 1 apresenta as amplitudes médias dos sinais filtrados obtidos pelo sensor com núcleo de aço silício no circuito LC, correlacionando-as aos contaminantes presentes nas amostras de óleo mineral, identificados por análises laboratoriais realizadas conforme a norma ASTM D7919.

Tabela 1 – Comparativo dos resultados de detecção em óleo mineral Ideol usando o circuito LC para as amostras contaminadas artificialmente

Óleo mineral farmacêutico <i>Ideol</i>	Massa para 100 mL de óleo (mg)	Análise físico-química: IDF (ppm) Norma D-7919	Sinal Filtrado média das amplitudes (V)	<i>SNR</i> (Eq. (22))	<i>SNR</i> (Eq. (28))
Óleo puro	0	-	2,793	0,137	0,280
Óleo com partículas de Fe em 0,05%	0,05	295	3,431	0,543	1,464
Óleo com partículas de Fe em 0,1%	0,1	615	3,318	0,567	1,495
Óleo com partículas de Cu em 0,05%	0,05	-	2,976	0,560	1,434
Óleo com partículas de Cu em 0,1%	0,1	-	3,200	0,571	1,452
Óleo com partículas de Fe em 0,05% e Cu em 0,05%	0,05 de Fe e 0,05 Cu	805	3,210 e 3,064	0,537 e 0,522	1,460 e 1,422

Fonte: Elaboração do próprio autor

Os resultados indicam que o circuito LC foi capaz de detectar a contaminação artificial do óleo mineral por partículas metálicas, uma vez que todas as amostras

contaminadas apresentaram aumento do sinal filtrado e da *SNR* (Eq. 26) em relação ao óleo puro. A *SNR* mostrou-se um parâmetro mais evidente para a distinção entre óleo puro e contaminado, enquanto o sinal filtrado apresentou variações não necessariamente lineares com a concentração de partículas. Além disso, a análise físico-química por IDF confirmou o aumento da contaminação nas amostras contendo ferro, reforçando a coerência dos resultados obtidos pelo circuito LC.

4.2 RESULTADOS APLICADOS AOS LUBRIFICANTES INDUSTRIAIS

Para a turbina a gás, a amostra revelou elevada concentração de partículas metálicas, predominantemente ferro e alumínio. De acordo com as normas ISO 4406 e NAS 1638, o nível de contaminação corresponde ao grau 11 por 100 mL, indicando desgaste significativo ou falha incipiente em componentes internos.

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise laboratorial (sem uso do sensor) realizada com a amostra de óleo lubrificante coletada da turbina a gás, contemplando um conjunto de propriedades físico-químicas essenciais para a avaliação de seu desempenho e estado de degradação. Esses parâmetros permitem caracterizar o comportamento do lubrificante sob as condições operacionais do equipamento, além de fornecer subsídios técnicos para a interpretação de possíveis mecanismos de desgaste, oxidação ou contaminação presentes no sistema.

Tabela 2 – Resultado laboratorial físico-químicos da amostra de óleo lubrificante da turbina a gás

Físico-químicos	Unidade	Norma	Referência		Resultado
			Anormal	Crítico	
Viscosidade 40°	cSt	D-445	<28,8 ou >35,2	>36,8 ou >27,2	33,5
Água	ppm	D-1744	>400	>700	394
Cor ASTM	ND	D-1500	-	-	3,0
Número de Acidez	mgKOH/g	D-974	>1,5	>2	0,08
Ponto de Fulgor Vaso Aberto	°C	D-92	-	-	223
Teste de Espuma Sequência 1	mL	D-892	-	-	50/0
Insolúveis em Pentano	%	D-893	-	-	0,190
Bomba Rotativa	min.	D-2272	-	-	510
Insolúveis em Tolueno	%	D-893	-	-	0
Formação de Verniz	ND	D7843	>15	>40	14,59

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A caracterização físico-química dos óleos lubrificantes foi realizada mediante métodos padronizados pela ASTM *International*. A viscosidade cinemática foi determinada conforme a ASTM D445; o teor de água, pela ASTM D1744; a cor, pela ASTM D1500; o número de acidez, pela ASTM D974; o ponto de fulgor em vaso aberto, pela ASTM D92; e a tendência à formação de espuma, pela ASTM D892. Complementarmente, a ASTM D893 foi empregada na determinação de materiais insolúveis em pentano e tolueno, enquanto a ASTM D2272 foi utilizada para avaliação da estabilidade à oxidação pelo método RPVOT e a ASTM D7843 para determinação da tendência à formação de verniz por colorimetria de membrana (MPC).

Os resultados obtidos permitiram avaliar a condição físico-química e o nível de degradação do lubrificante, considerando parâmetros como viscosidade, teor de água, acidez, estabilidade à oxidação, formação de espuma e tendência à geração de depósitos. As normas ASTM estabelecem os procedimentos padronizados para realização dos ensaios, enquanto os limites de condição anormal e crítica correspondem aos critérios de referência adotados para interpretação e acompanhamento do estado do lubrificante.

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise laboratorial referente à contagem de partículas presentes na amostra de óleo lubrificante coletada da turbina a gás, efetuada com base nos critérios estabelecidos pelas normas ISO, SAE e NAS.

Tabela 3 – Análise laboratorial da concentração de partículas no óleo lubrificante da turbina a gás

Contagem de partículas	Unidade	Norma	Referência		Resultado
			Anormal	Crítico	
Partículas > 4 μ	Part./mL	ISO-4466	-	-	30.240,31
Partículas > 6 μ	Part./mL	ISO-4466	-	-	3.282,11
Partículas > 14 μ	Part./mL	ISO-4466	-	-	21,16
ISO	ND	ISO-4466	> 18/16/13	> 20/18/15	22/19/12
SAE	ND	SAE AS4059	-	-	12
NAS	ND	NAS-1638	>7	>9	11

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Essa avaliação permite quantificar o nível de contaminação particulada no fluido e, conseqüentemente, inferir sobre a eficiência dos sistemas de filtragem e o estado de limpeza interna do equipamento. Os valores contribuem para a identificação precoce de possíveis processos de desgaste, falhas incipientes ou degradação do meio lubrificante.

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise espectrométrica realizada na amostra de óleo lubrificante coletada da turbina a gás.

Tabela 4 – Espectrometria do óleo lubrificante da turbina a gás: avaliação de desgaste, aditivos e contaminantes

Espectrometria	Unidade	Norma	Referência		Resultado (ppm)
			Anormal	Crítico	
Desgaste					
Ferro	ppm	D-5185	>30	>130	7,9
Cobre	ppm	D-5185	>40	>110	0,9
Cromo	ppm	D-5185	>5	>25	0
Chumbo	ppm	D-5185	>15	>75	0
Alumínio	ppm	D-5185	>20	>50	0
Prata	ppm	D-5185	-	-	0
Níquel	ppm	D-5185	>10	>35	0
Estanho	ppm	D-5185	>10	>50	0
Aditivos					
Fósforo	ppm	D-5185	-	-	19,2
Contaminantes					
Silício	ppm	D-5185	>15	>50	0
Sódio	ppm	D-5185	-	-	0

Fonte: Elaboração do próprio autor.

No que se refere aos indicadores de desgaste, observam-se concentrações de ferro e cobre. Em relação aos aditivos, destaca-se a presença de fósforo, elemento típico de pacotes antidesgaste ou *Anti-Wear* (AW) e extrema pressão ou *Extreme Pressure* (EP), cuja concentração auxilia na avaliação da estabilidade química e da integridade funcional.

A confiabilidade exerce impacto direto sobre a segurança operacional, a eficiência do sistema e os custos de manutenção, tornando sua análise um elemento fundamental no gerenciamento do ciclo de vida de turbinas a gás (CUI *et al.*, 2026).

Para a turbina a vapor, a análise laboratorial revelou a presença de uma concentração moderada de água dispersa na amostra de óleo lubrificante. De acordo com o ensaio realizado conforme a norma ASTM D-1744, o teor de água excedeu 700 ppm, valor significativamente superior ao limite recomendado para sistemas de lubrificação de turbinas a vapor. A presença de gotículas de água nas amostras falsifica seriamente a distribuição real de tamanho das partículas, bem como a contagem das mesmas (PRABHAKARAN e JAGGA, 1999), devido a alteração no índice de refração e aglomeração induzida. A elevada umidade no óleo compromete

o filme lubrificante, acelera a degradação do lubrificante e favorece processos corrosivos. Além disso, pode afetar o desempenho de mancais hidrodinâmicos e aumentar o risco de cavitação. Portanto, o resultado obtido indica uma condição que requer ações para controle da contaminação e preservação da confiabilidade do sistema.

A Tabela 5 apresenta os resultados da análise físico-química do óleo lubrificante da turbina a vapor, utilizados para avaliar sua condição em operação.

Tabela 5 – Resultado laboratorial físico-químicos da amostra de óleo lubrificante da turbina a vapor

Físico-químicos	Unidade	Norma	Referência		Resultado
			Anormal	Crítico	
Viscosidade 40°	cSt	D-445	<41,1 ou >50,6	>52,9 ou >39,1	48,3
Água	ppm	D-1744	>400	>700	826
Cor ASTM	ND	D-1500	-	-	5,0
Número de Acidez	mgKOH/g	D-974	>1,5	>2	0,11
Demulsibilidade	ND	D-1401	-	-	40/40/0
Formação de Verniz	ND	D7843	>15	>40	28,15

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 6 apresenta os resultados da análise de contagem de partículas ferrosas dentro da normalidade realizada na amostra de óleo lubrificante coletada da turbina a vapor, conforme os critérios estabelecidos pelas normas ISO, SAE e NAS.

Tabela 6 – Análise laboratorial da concentração de partículas no óleo lubrificante da turbina a vapor

Contagem de Partículas	Unidade	Norma	Referência		Resultado
			Anormal	Crítico	
Partículas > 4µ	Part./mL	ISO-4466	-		294,81
Partículas > 6µ	Part./mL	ISO-4466	-		130,62
Partículas > 14µ	Part./mL	ISO-4466	-		19,26
ISO	ND	ISO-4466	> 18/16/13	> 20/18/15	15/14/11
SAE	ND	SAE AS4059	-	-	6
NAS	ND	NAS-1638	>7	>9	6

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 7 apresenta os resultados da análise espectrométrica realizada na amostra de óleo lubrificante coletada da turbina a vapor.

Tabela 7 – Espectrometria do óleo lubrificante da turbina a vapor

Espectometria	Unidade	Norma	Referência		Resultado (ppm)
			Anormal	Crítico	
Desgaste					
Ferro	ppm	D-5185	>30	>130	0
Cobre	ppm	D-5185	>40	>110	0
Cromo	ppm	D-5185	>5	>25	0
Chumbo	ppm	D-5185	>15	>75	0
Alumínio	ppm	D-5185	>20	>50	0
Níquel	ppm	D-5185	>10	>35	0
Estanho	ppm	D-5185	>10	>50	0
Aditivos					
Fósforo	ppm	D-5185	-	-	4,1
Contaminantes					
Silício	ppm	D-5185	>15	>50	0

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Este resultado abrange a identificação de elementos associados ao desgaste de componentes metálicos, à presença de aditivos e à possível entrada de contaminantes externos. Não foram detectadas concentrações significativas de ferro (Fe), cobre (Cu), cromo (Cr), chumbo (Pb), alumínio (Al), prata (Ag), níquel (Ni), estanho (Sn), manganês (Mn), titânio (Ti), cádmio (Cd) ou vanádio (V), o que sugere ausência de processos tribológicos anormais e indica integridade satisfatória dos componentes internos da turbina. Em relação aos aditivos, observou-se a presença de fósforo (P), elemento usualmente empregado em formulações antidesgaste e extrema pressão, evidenciando a manutenção do pacote aditivo do lubrificante. Ademais, verificou-se a ausência de contaminantes inorgânicos como silício (Si) e sódio (Na), que podem indicar ingresso de partículas ambientais, poeiras minerais.

Para a bomba de alimentação da caldeira, a amostra apresentou alta concentração de partículas sólidas, principalmente de ferro, indicando possível desgaste abrasivo em componentes internos.

A Tabela 8 apresenta os resultados da análise físico-química do óleo lubrificante coletado da bomba de alimentação de caldeira. Os parâmetros avaliados permitem verificar o estado do fluido, identificar alterações decorrentes de degradação ou contaminação e avaliar a adequação do lubrificante às condições operacionais do equipamento.

Tabela 8 – Resultado laboratorial físico-químicos da amostra de óleo lubrificante da bomba de alimentação de caldeira

Físico-químicos	Unidade	Norma	Referência		Resultado
			Anormal	Crítico	
Viscosidade 40°	cSt	D-445	<41,4 ou >50,6	>52,9 ou >39,1	45,6
Água	ppm	D-1744	>400	>700	3060
Número de Acidez	mgKOH/g	D-974	>1,5	>2	0,14

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As bombas de alimentação de caldeira operam sob condições severas de pressão, temperatura e vazão, exigindo lubrificação adequada para garantir a integridade de seus componentes. Lubrificantes com baixa lubricidade e proteção anticorrosiva insuficiente podem intensificar o desgaste mecânico e os processos corrosivos, comprometendo a confiabilidade operacional e reduzindo a vida útil dos mancais, engrenagens e demais elementos do sistema (RICHARDSON, 2016).

A Tabela 9 apresenta os resultados da contagem de partículas obtidos na análise do óleo lubrificante coletado na bomba de óleo da turbina a vapor, avaliados conforme os critérios estabelecidos pelas normas ISO, SAE e NAS.

Tabela 9 – Análise laboratorial da concentração de partículas no óleo lubrificante da bomba de alimentação de caldeira

Contagem de Partículas	Unidade	Norma	Referência		Resultado
			Anormal	Crítico	
Partículas > 4μ	Part./mL	ISO-4466	-		4.616,31
Partículas > 6μ	Part./mL	ISO-4466	-		2.330,26
Partículas > 14μ	Part./mL	ISO-4466	-		523,78
ISO	ND	ISO-4466	> 18/16/13	> 20/18/15	19/18/16
SAE	ND	SAE AS4059	-	-	11
NAS	ND	NAS-1638	>7	>9	10

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A condição anormal corresponde ao desvio de um parâmetro em relação à faixa de referência estabelecida, indicando a necessidade de acompanhamento e avaliação. A condição crítica representa um nível de desvio mais severo, podendo demandar investigação e intervenção prioritárias para preservar as condições do lubrificante e do equipamento.

A Tabela 10 apresenta os resultados da análise espectrométrica do óleo lubrificante coletado na bomba de alimentação.

Tabela 10 – Espectrometria do óleo lubrificante da bomba de alimentação de caldeira para avaliação de aditivos

Condicionamento para análise de aditivos					
Espectrometria	Unidade	Norma	Referência		Resultado
			Anormal	Crítico	
Aditivos					
Fósforo	ppm	D-5185	-	-	21,4

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os dados indicam ausência de elementos associados ao desgaste metálico, não sendo identificados metais típicos desse tipo de degradação. Foi detectada a presença de fósforo (P), representativo do pacote de aditivos do lubrificante. Além disso, não foram observados contaminantes inorgânicos relevantes, indicando ausência de entrada de materiais estranhos no sistema.

Para o lubrificante do redutor, a análise indicou elevada presença de água no óleo, com teor superior a 0,2% conforme a NBR 16358, comprometendo o filme lubrificante e favorecendo processos de *micropitting* e corrosão.

A Tabela 11 apresenta os resultados da análise físico-química do óleo lubrificante coletado do redutor de velocidade dos ventiladores da torre de resfriamento. Os parâmetros avaliados permitem identificar o estado do fluido, detectar possíveis mecanismos de degradação e verificar a adequação da lubrificação às condições operacionais do equipamento.

Tabela 11 – Resultado laboratorial físico-químicos da amostra de óleo lubrificante do redutor de velocidade

Físico-químicos	Unidade	Norma	Referência		Resultado
			Anormal	Crítico	
Viscosidade 40°	cSt	D-445	<288 ou >352	<272 ou >368	298,5
Água	ppm	D-1744	>1000	>2000	3.245

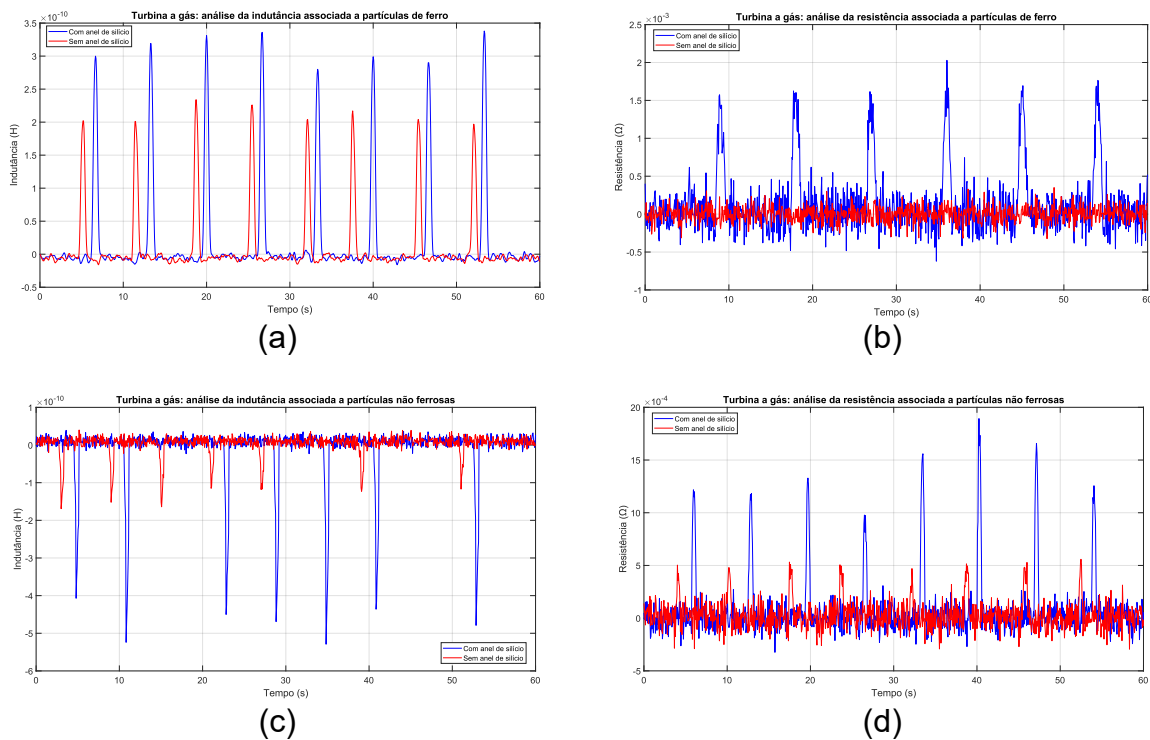
Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM O SENSOR USANDO O MEDIDOR LCR

A Figura 32 ilustra os sinais pulsados registrados ao longo de um intervalo de 60 segundos, evidenciando a capacidade do sistema sensor em identificar e caracterizar contaminantes metálicos presentes no óleo lubrificante da turbina a gás. A análise conjunta das variações de indutância e resistência permite diferenciar tipos

de partículas com base em sua resposta eletromagnética, contribuindo para o diagnóstico de desgaste interno e para o aprimoramento de estratégias de manutenção preditiva.

Figura 32 – Detecção de partículas sólidas em óleo (ISO 32) de turbina a gás com sensores com e sem aço silício: detecção indutiva (a) e detecção resistiva (b) para partículas ferrosas; detecção indutiva (c) e detecção resistiva (d) para partículas não ferrosas



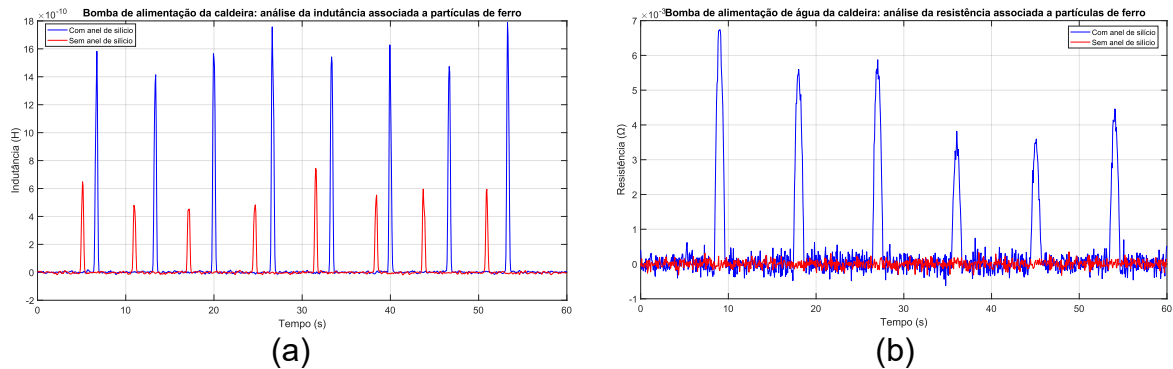
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para as partículas ferromagnéticas, observou-se elevada sensibilidade no modo indutivo, especialmente com a utilização do anel de aço silício, devido à concentração do fluxo magnético na região de detecção (a) e (b). Já as partículas não ferromagnéticas em (c) e (d), produziram picos negativos de indutância, atribuídos à geração de correntes parasitas que, pela Lei de Lenz, induzem um campo magnético oposto ao da bobina, reduzindo o fluxo magnético acoplado e a indutância aparente. A presença do anel de aço silício intensificou essa interação eletromagnética, resultando em sinais de maior amplitude tanto no modo indutivo quanto no resistivo.

A Figura 33 apresenta os sinais obtidos pelos sensores de detecção, evidenciando a presença de partículas ferrosas no óleo lubrificante da bomba de alimentação de caldeira, em concordância com os resultados laboratoriais. Os pulsos observados são característicos da interação de materiais ferromagnéticos com o

campo magnético da bobina, demonstrando a capacidade do sensor em identificar partículas de desgaste e monitorar a condição tribológica do equipamento.

Figura 33 – Comparação da detecção de partículas sólidas em óleo (ISO 32) da bomba de alimentação de caldeira com sensores com e sem anel de aço silício: detecção indutiva (a) e detecção resistiva (b) para partículas ferrosas

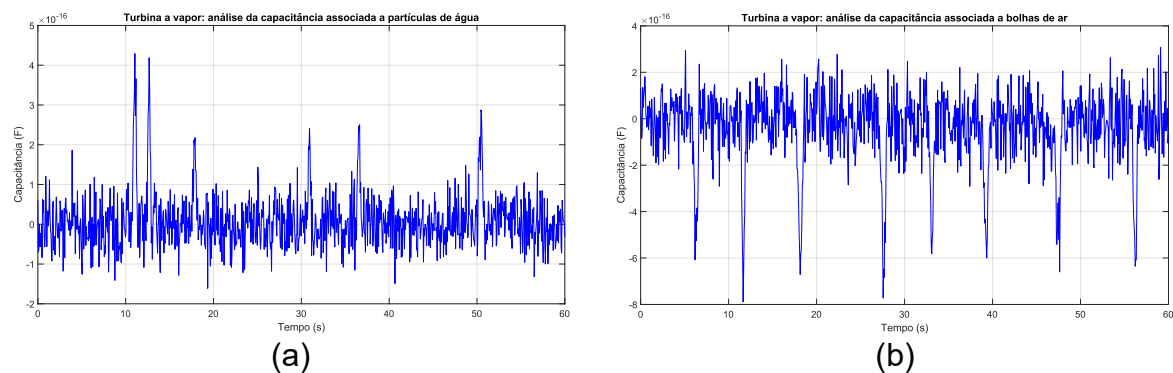


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na ausência de partículas detectadas pelo sensor, a Eq. (14) resulta em ($K_p = 0$), uma vez que não há partículas fisicamente associadas a ($r = 0$). Esse resultado indica a ausência de contaminantes ferrosos ou não ferrosos dentro dos limites de detecção do sistema de medição.

As Figuras 34 e 35, correspondentes aos resultados das Tabelas 8 e 11, respectivamente, apresentam os picos dos sinais capacitivos registrados nas amostras de óleo provenientes da turbina a vapor e da caixa de engrenagens.

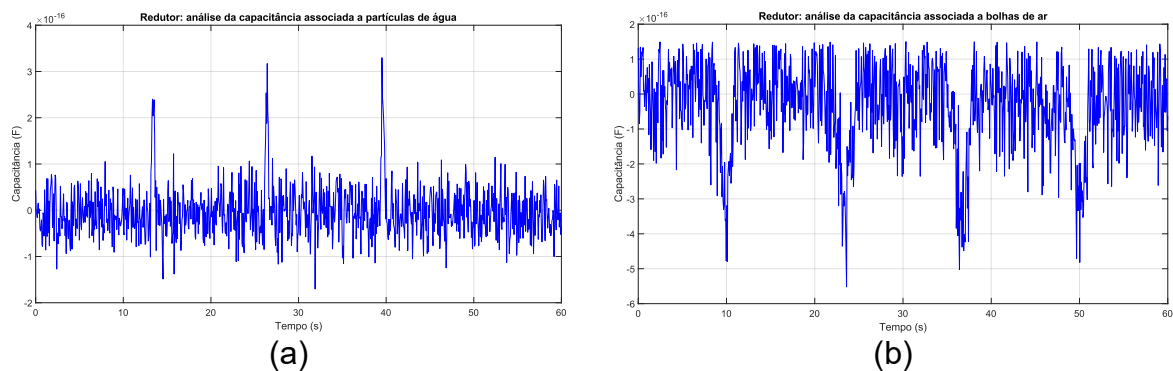
Figura 34 – Sinais capacitivos associados à presença de partículas em óleo lubrificante (ISO 32) de turbina a vapor: detecção de água (a) e de bolhas de ar (b)



Fonte: Elaboração do próprio autor

Os sinais capacitivos variaram de acordo com as propriedades dielétricas do contaminante. A presença de água gerou picos positivos de capacitância devido à sua elevada permissividade relativa em comparação ao óleo, aumentando a permissividade efetiva do meio. Em contrapartida, as bolhas de ar produziram picos negativos, pois sua permissividade é inferior à do óleo, reduzindo a capacitância medida. Esse comportamento permite distinguir água e aeração em sistemas de lubrificação.

Figura 35 – Sinais capacitivos referentes à presença de partículas em óleo lubrificante (ISO 320) do redutor: detecção de água (a) e de bolhas de ar (b)



Fonte: Elaboração do próprio autor

Observa-se de forma clara a distinção entre pulsos positivos associados à presença de água e pulsos negativos característicos do trânsito de bolhas de ar pelo microcanal de detecção. Esses resultados evidenciam a eficácia do método capacitivo para monitoramento de contaminações não metálicas em sistemas lubrificados, reforçando seu potencial como ferramenta complementar em estratégias de manutenção preditiva.

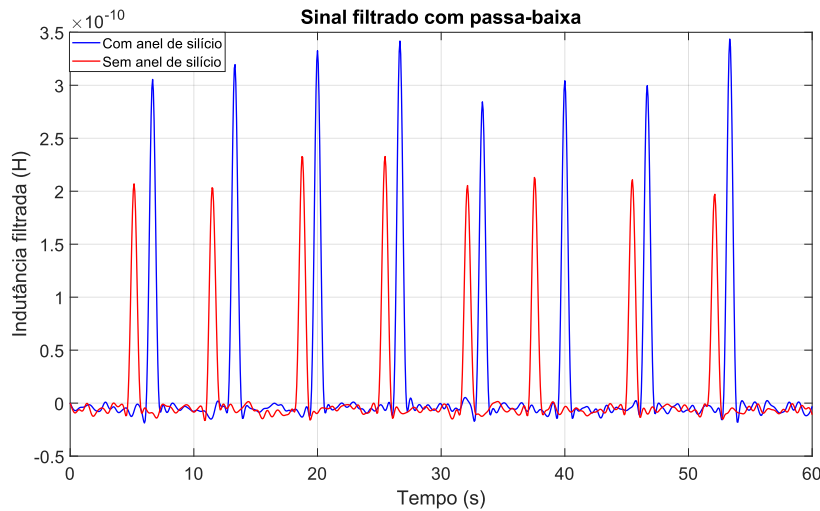
4.3.1 Gráficos dos sinais filtrados: aplicação de filtro passa-baixa

Aplicou-se um filtro passa-baixa ao sinal original com o objetivo de atenuar componentes de alta frequência associadas a ruídos e interferências, preservando as variações de baixa frequência vinculadas ao fenômeno de interesse. Esse procedimento resultou na melhoria da relação sinal-ruído, tornando o sinal mais adequado para análise.

As Figuras 36, 37, 38 e 39 apresentam os gráficos obtidos a partir dos sinais da Figura 32, referentes à turbina a gás, utilizado principalmente para atenuar

componentes da alta frequência (2 MHz). Observa-se maior clareza na identificação de padrões e possíveis anomalias, o que confere maior confiabilidade à interpretação dos resultados.

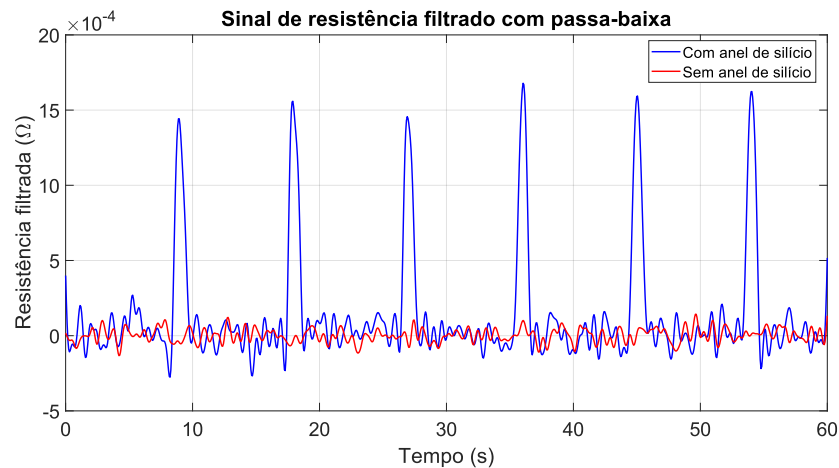
Figura 36 – Sinal indutivo com filtro passa-baixa para partículas ferrosas da amostra da turbina a gás



Fonte: Elaboração do próprio autor

A aplicação do filtro passa-baixa no MATLAB reduziu o ruído de alta frequência e tornou mais evidentes os pulsos positivos associados às partículas ferromagnéticas. Com o anel de aço silício, a amplitude média aumentou de $2,1063 \times 10^{-10}$ H para $3,1162 \times 10^{-10}$ H, enquanto a *SNR* elevou-se de 2,2965 para 3,3978. Esses resultados evidenciam maior sensibilidade e melhor definição dos eventos observados no gráfico.

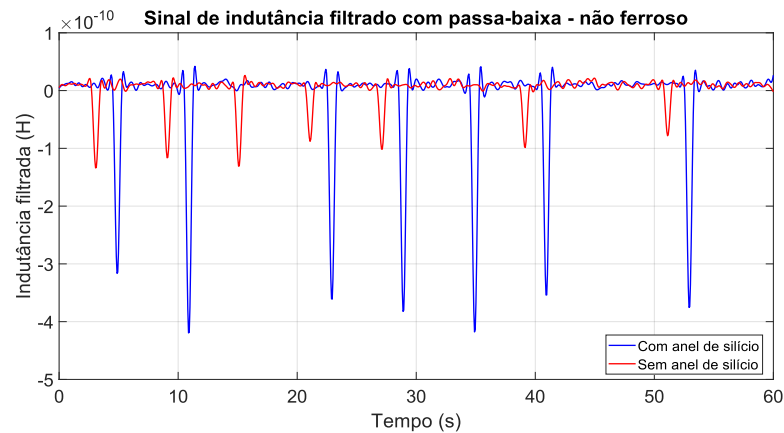
Figura 37 – Sinal resistivo com filtro passa-baixa para partículas ferrosas da amostra da turbina a gás



Fonte: Elaboração do próprio autor

O filtro passa-baixa permitiu atenuar as oscilações do sinal bruto e destacar os picos relacionados às partículas ferromagnéticas. A amplitude média foi de $1,714 \times 10^{-3} \Omega$, associada a uma SNR de 4,0211. A elevada relação sinal-ruído justifica a boa separação entre os pulsos e o ruído de fundo.

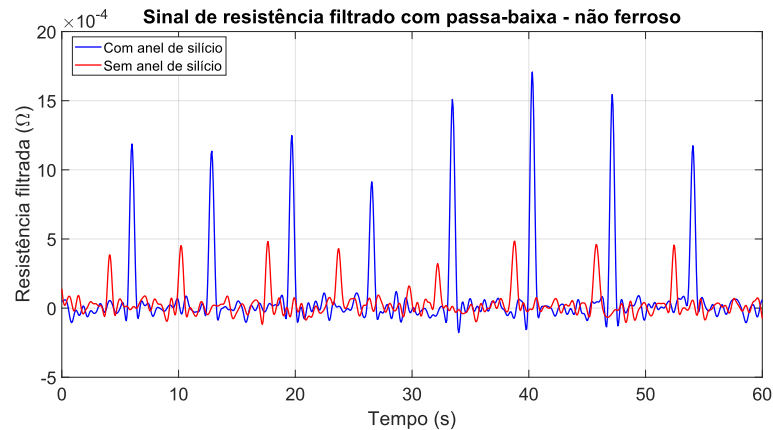
Figura 38 – Sinal indutivo com filtro passa-baixa para partículas não-ferrosas da amostra da turbina a gás



Fonte: Elaboração do próprio autor

A Figura 38 apresentou os sinais indutivos produzidos pelas partículas não ferrosas. A aplicação do filtro passa-baixa permitiu eliminar as flutuações de alta frequência do sinal bruto e destacar os pulsos negativos característicos das correntes de parasitas induzidas nas partículas condutoras. Os resultados experimentais indicam uma amplitude média de $-4,7057 \times 10^{-10} \text{ H}$ para a configuração com anel de aço silício e de apenas $-1,3714 \times 10^{-11} \text{ H}$ para a configuração sem o anel. Em consequência desse aumento de amplitude, a razão sinal-ruído elevou-se de 1,6391 para 5,6242, constituindo um dos maiores valores obtidos. A elevada relação sinal-ruído explica a excelente definição dos pulsos negativos observados na Figura 36, demonstrando que o filtro passa-baixa foi decisivo para tornar os eventos físicos claramente distinguíveis do ruído de fundo.

Figura 39 – Sinal resistivo com filtro passa-baixa para partículas não-ferrosas da amostra da turbina a gás

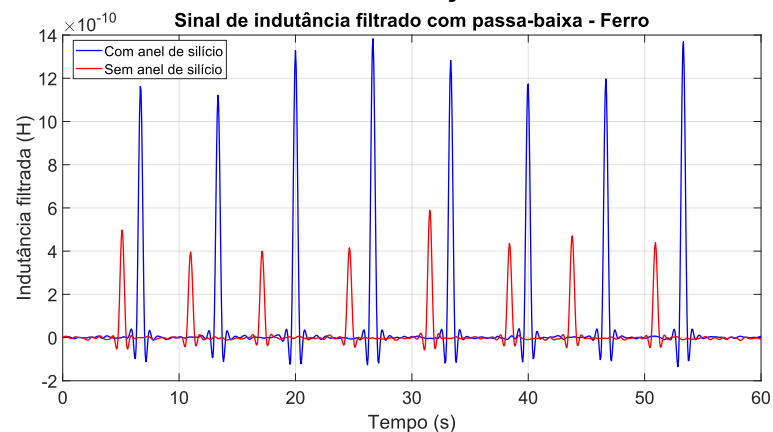


Fonte: Elaboração do próprio autor

A aplicação do filtro passa-baixa permitiu evidenciar os picos associados às correntes parasitas produzidas pelas partículas não ferrosas. A amplitude média aumentou de $5,1825 \times 10^{-4} \Omega$ para $1,4806 \times 10^{-3} \Omega$, enquanto a *SNR* passou de 1,5712 para 4,4887, indicando maior capacidade de detecção.

As Figuras 40 e 41 respectivamente mostram os gráficos para as análises de óleo da bomba de alimentação de caldeira obtidas pelo sensor usando o equipamento LCR Keysight Agilent E4980A em alta frequência.

Figura 40 – Sinal indutivo com filtro passa-baixa para partículas ferrosas da amostra da bomba de alimentação de caldeira



Fonte: Elaboração do próprio autor

A filtragem digital eliminou parte significativa do ruído do sinal bruto, evidenciando os pulsos associados às partículas ferromagnéticas. A amplitude média passou de $5,69 \times 10^{-10} \text{ H}$ para $1,5939 \times 10^{-9} \text{ H}$, e a *SNR* aumentou de 1,9737 para 5,5287. Os resultados demonstram o aumento da sensibilidade do sensor.

Figura 41 – Sinal resistivo com filtro passa-baixa para partículas ferrosas da amostra da bomba de alimentação de caldeira

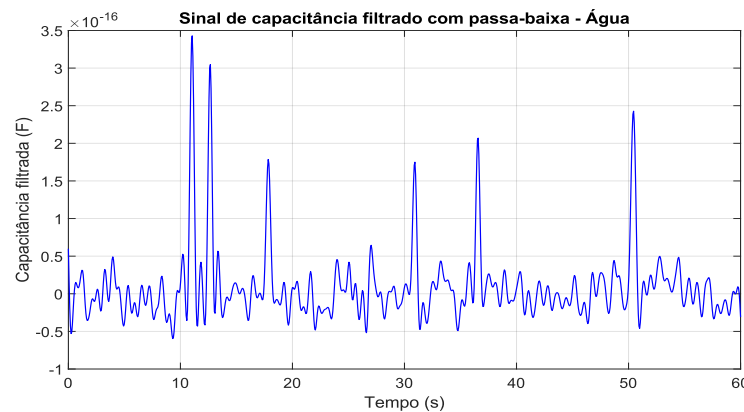


Fonte: Elaboração do próprio autor

O filtro passa-baixa proporcionou maior estabilidade do sinal e melhor definição dos picos relacionados às partículas metálicas. A amplitude média obtida foi de $5,683 \times 10^{-3} \Omega$, com *SNR* de 4,6187, indicando boa qualidade do sinal.

As Figuras 42 e 43 a seguir mostram o método capacitivo para as amostras de óleo da turbina a vapor no qual foi possível detectar água e bolhas de ar.

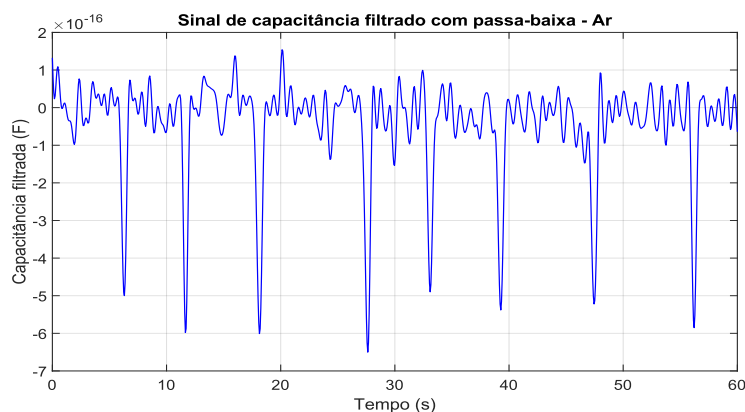
Figura 42 – Sinal capacitivo com filtro passa-baixa para partículas de água da amostra de óleo da turbina a vapor



Fonte: Elaboração do próprio autor

A aplicação do filtro passa-baixa permitiu evidenciar os picos positivos produzidos pelo aumento da constante dielétrica devido à presença de água. A amplitude média foi de $3,1985 \times 10^{-16} F$, com *SNR* de 4,6607. Os resultados estão em concordância com a análise laboratorial, que indicou 426 ppm de água.

Figura 43 – Sinal capacitivo com filtro passa-baixa para partículas de ar da amostra de óleo da turbina a vapor

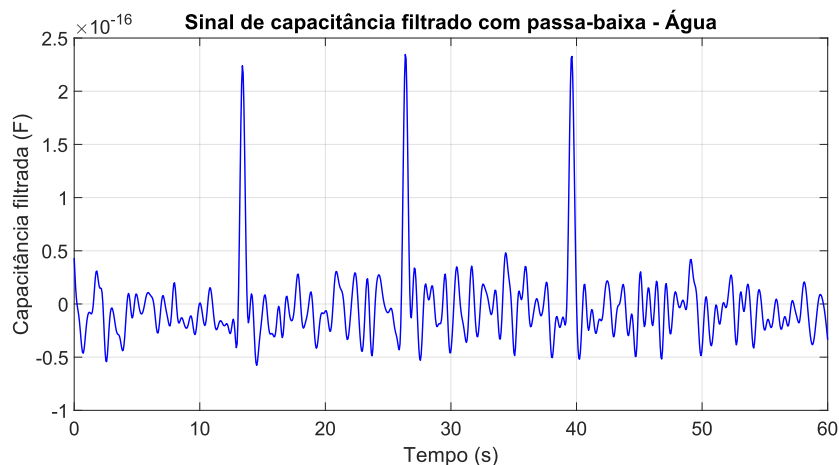


Fonte: Elaboração do próprio autor

Após a filtragem, os pulsos negativos associados às bolhas de ar tornaram-se mais evidentes. A amplitude média foi de $-6,771 \times 10^{-16}$ F, com *SNR* igual a 4,3265, permitindo distinguir claramente os efeitos da aeração do lubrificante.

As Figuras 44 e 45 apresentam os resultados obtidos por meio do método capacitivo aplicado às amostras de óleo do redutor de velocidade do ventilador da torre de resfriamento. Assim como os resultados das amostras de óleo da turbina a vapor, a partir da análise das variações capacitivas, foi possível identificar a presença de água e de bolhas de ar no lubrificante, evidenciando a sensibilidade do método na detecção de contaminantes que afetam as propriedades dielétricas do meio.

Figura 44 – Sinal capacitivo com filtro passa-baixa para partículas de água da amostra de óleo do redutor da torre de resfriamento

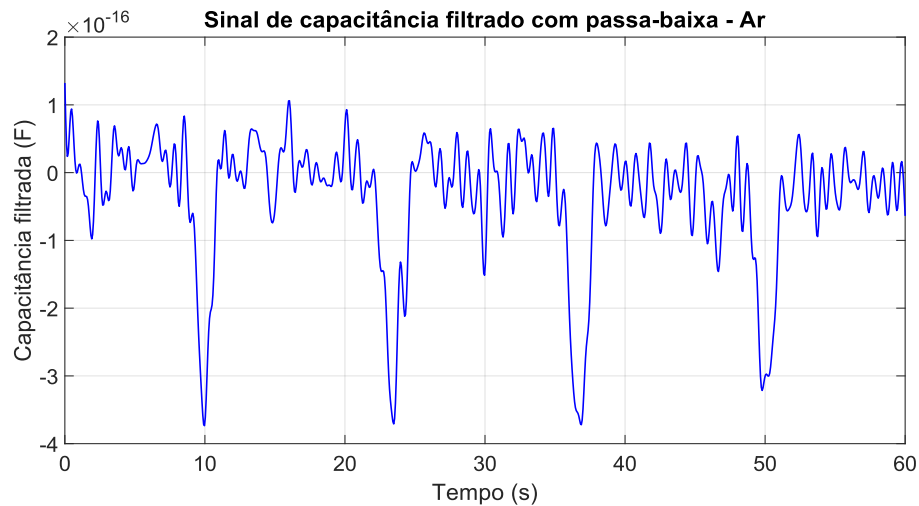


Fonte: Elaboração do próprio autor

O filtro passa-baixa reduziu as componentes de alta frequência do sinal bruto, tornando mais visíveis os picos positivos associados à presença de água. A amplitude

média foi de $3,0008 \times 10^{-16}$ F, com SNR de 5,4528 , um dos maiores valores obtidos no estudo, evidenciando a elevada sensibilidade do método.

Figura 45 – Sinal capacitivo com filtro passa-baixa para partículas de ar da amostra de óleo do redutor da torre de resfriamento



Fonte: Elaboração do próprio autor

Na Figura 45, a aplicação do filtro passa-baixa permitiu atenuar as oscilações de alta frequência do sinal bruto e evidenciar os pulsos negativos produzidos pelas bolhas de ar presentes no lubrificante. A amplitude média medida foi de $-5,0384 \times 10^{-16}$ F, associada a uma razão sinal-ruído de 4,0346 . Os valores observados no gráfico apresentam boa separação em relação ao ruído de fundo, demonstrando que o processamento digital dos sinais foi essencial para aumentar a confiabilidade da detecção.

4.3.2 Avaliação das amplitudes médias dos sinais e da razão sinal-ruído (SNR) obtida nos resultados experimentais usando o medidor LCR

A Tabela 12 apresenta as amplitudes médias dos sinais gerados pelos sensores com e sem a incorporação do anel de aço silício, bem como os tipos de contaminantes identificados nas amostras de óleo lubrificante por meio de análises laboratoriais conduzidas conforme normas técnicas vigentes.

Tabela 12 – Comparativo dos resultados de detecção e desempenho do sensor usando o medidor LCR

Ativo	Resultado das amostras (normas)	Tipo de partícula	Média da amplitude (com anel de silício)	SNR (com silício)	Média da amplitude (sem anel de silício)	SNR (sem silício)
Turbina a gás	ISO 4406 (22/19/12), SAE AS4059 (12), NAS 1638 (11) e ASTM D-5185.	Ferro	$3,1162 \times 10^{-10} \text{ H}$	3,3978	$2,1063 \times 10^{-10} \text{ H}$	2,2965
			$1,714 \times 10^{-3} \Omega$	4,0211		
		Não ferroso	$-4,7057 \times 10^{-10} \text{ H}$	5,6242	$-1,3714 \times 10^{-11} \text{ H}$	1,6391
			$1,4806 \times 10^{-3} \Omega$	4,4887	$5,1825 \times 10^{-4} \Omega$	1,5712
Bomba de Caldeira	ISO 4406 (25/23/15), SAE AS4059 (> 12), NAS 1638 (12) e ASTM D-1744.	Ferro	$1,5939 \times 10^{-9} \text{ H}$	5,5287	$5,69 \times 10^{-10} \text{ H}$	1,9737
			$5,683 \times 10^{-3} \Omega$	4,6187		
Turbina a vapor	ASTM D-1744 (426 ppm).	Água	$3,1985 \times 10^{-16} \text{ F}$	4,6607		
		Bolhas de ar	$-6,771 \times 10^{-16} \text{ F}$	4,3265		
Redutor	NBR 16358 (> 0,2).	Água	$3,0008 \times 10^{-16} \text{ F}$	5,4528		
		Bolhas de ar	$-5,0384 \times 10^{-16} \text{ F}$	4,0346		

Fonte: Elaboração do próprio autor

A *SNR*, ao relacionar a amplitude do sinal útil ao nível de ruído presente no sistema, permite quantificar a sensibilidade do sensor e sua capacidade de distinguir, com maior precisão, as perturbações eletromagnéticas provocadas pela passagem de partículas sólidas ou contaminantes líquidos no fluido. Além disso, são apresentados os valores correspondentes da razão sinal-ruído (*SNR*), parâmetro fundamental para avaliar a qualidade das medições.

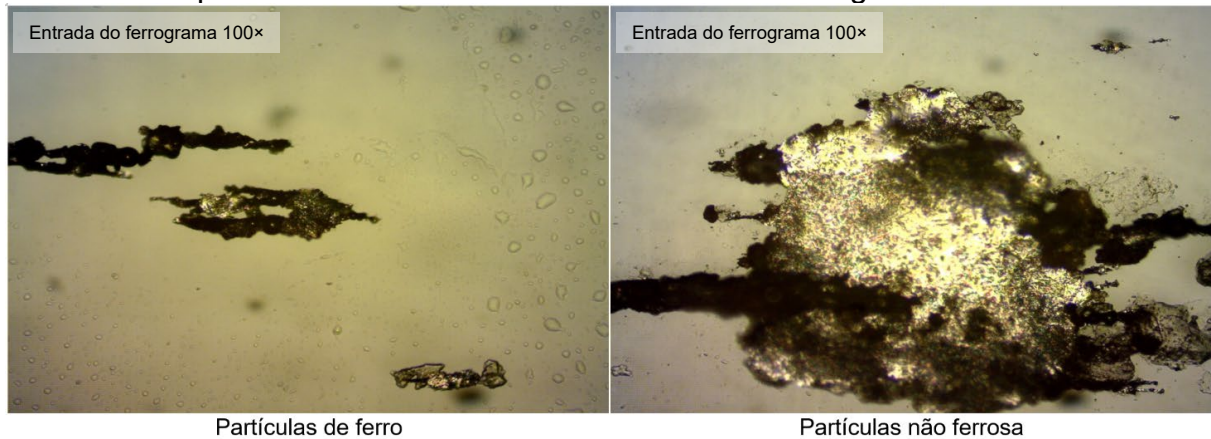
4.4 FERROGRAFIA ANALÍTICA DOS LUBRIFICANTES DA TERMOELÉTRICA

As imagens apresentadas nas figuras subsequentes evidenciam, por meio de análise microscópica, a presença e a natureza dos contaminantes encontrados nas amostras de óleo lubrificante coletadas. A microscopia é uma ferramenta essencial para a caracterização qualitativa de partículas de desgaste e contaminantes líquidos, permitindo observar não apenas sua morfologia, mas também indícios do mecanismo de falha associado, tais como desgaste abrasivo, adesivo ou corrosivo.

A Figura 46 corresponde à amostra proveniente da turbina a gás e revela a presença de partículas metálicas em suspensão, predominantemente compostas por ferro e não ferroso. A geometria, o tamanho e a distribuição das partículas são

compatíveis com mecanismos de desgaste severo e deterioração de superfícies metálicas submetidas a atrito contínuo. Esses resultados evidenciam uma correlação consistente entre as análises laboratoriais e as respostas obtidas pelo sensor, reforçando a convergência dos métodos na identificação da condição crítica de desgaste.

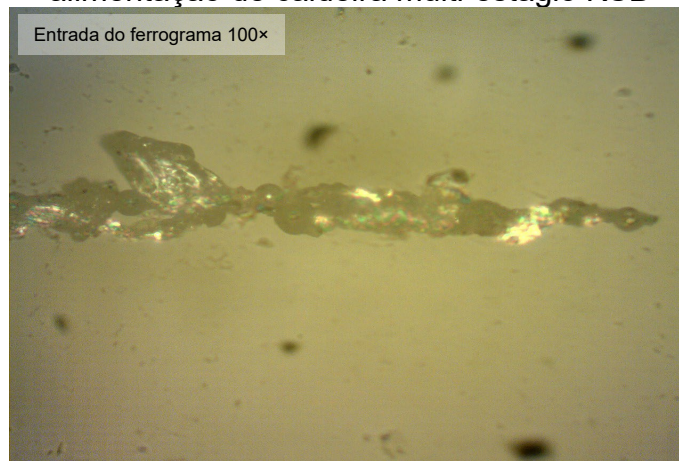
Figura 46 – Lâmina de ferrografia analítica contendo partículas contaminantes provenientes da amostra de óleo da turbina a gás GE 6FA



Fonte: Dados do próprio autor.

A Figura 47 apresenta a amostra oriunda da bomba de alimentação de caldeira, na qual se observa predominância de partículas ferrosas. A presença desses contaminantes pode estar associada a processos de desgaste mecânico dos componentes metálicos do sistema, constituindo um indicativo relevante para a avaliação das condições operacionais e do estado de degradação do equipamento.

Figura 47 – Lâmina de ferrografia analítica contendo partículas contaminantes provenientes da amostra de óleo da unidade de lubrificação da bomba centrífuga de alimentação de caldeira multi-estágio KSB

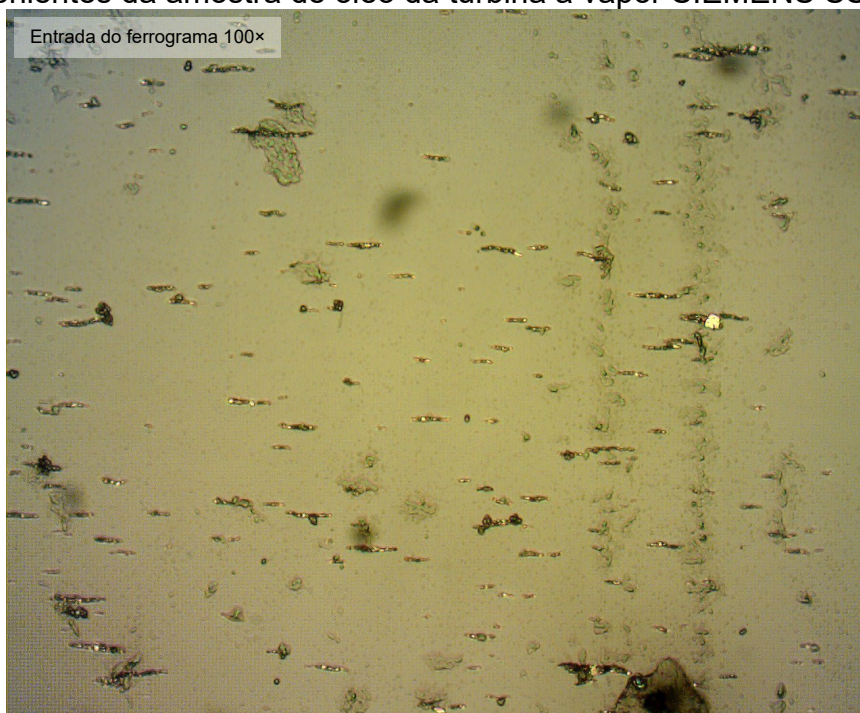


Fonte: Dados do próprio autor.

Esse padrão é indicativo de desgaste em componentes submetidos a elevadas cargas mecânicas, podendo estar associado a mecanismos de abrasão e fadiga superficial. As características morfológicas das partículas, como coloração, forma e distribuição, sugerem a degradação progressiva de elementos tribológicos, especialmente mancais e engrenagens, refletindo a evolução dos processos de desgaste no sistema lubrificado. A análise teve como parâmetro a caracterização das partículas de desgaste metálico por ferrografia analítica, considerando sua natureza, morfologia, coloração e distribuição no ferrograma, com predominância de partículas ferrosas na amostra analisada.

As Figuras 48 e 49, por sua vez, evidenciam a presença de água dispersa nas amostras, manifestada na forma de microgotas ou regiões opacas no fluido. A contaminação por água é particularmente prejudicial a sistemas lubrificados, pois reduz a espessura do filme hidrodinâmico, altera a viscosidade do óleo, acelera processos de oxidação e pode desencadear corrosão eletroquímica. Além disso, a água modifica significativamente as propriedades dielétricas do óleo, o que impacta diretamente a resposta de sensores capacitivos e contribui para a deterioração da confiabilidade operacional do equipamento.

Figura 48 – Lâmina de ferrografia analítica contendo partículas contaminantes provenientes da amostra de óleo da turbina a vapor SIEMENS SST 600



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 49 – Lâmina de ferrografia analítica contendo partículas contaminantes provenientes da amostra de óleo de redutor de velocidade de engrenagens helicoidais 12,5 para 1, modelo SUMITOMO SFC055R2GS RRF



Fonte: Dados do próprio autor.

Essas observações microscópicas complementam os diagnósticos obtidos em laboratório, reforçando a importância de sistemas de monitoramento capazes de detectar, em tempo real, tanto partículas sólidas quanto contaminantes líquidos, contribuindo para a manutenção preditiva e para a prevenção de falhas em máquinas rotativas críticas.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A quantidade de informações obtidas, analisadas e discutidas ao longo deste estudo evidencia a relevância dos resultados alcançados, ao mesmo tempo em que permite identificar limitações e oportunidades para o aprofundamento desta linha de pesquisa, a qual ainda demanda avanços científicos e tecnológicos. Nesse contexto, as considerações finais deste trabalho são apresentadas por meio das principais conclusões obtidas e das recomendações para pesquisas futuras, visando contribuir para o desenvolvimento e o aperfeiçoamento dos estudos relacionados ao tema.

5.1 CONCLUSÕES

A revisão bibliográfica realizada comprovou que o monitoramento da condição de óleos lubrificantes constitui uma das principais estratégias da manutenção preditiva, permitindo a identificação precoce de mecanismos de desgaste e falhas em equipamentos rotativos. Os estudos analisados demonstraram que sensores eletromagnéticos baseados na variação dos parâmetros elétricos de resistência, indutância e capacitância apresentam elevado potencial para o monitoramento em tempo real, reduzindo a dependência de análises laboratoriais convencionais. Verificou-se ainda que a utilização integrada dos métodos resistivo, indutivo e capacitivo amplia a capacidade de identificação de diferentes tipos de contaminantes, incluindo partículas metálicas ferromagnéticas, não ferromagnéticas e contaminantes não metálicos, como água e ar. A literatura também mostrou que o aumento da concentração e das dimensões das partículas metálicas intensifica a perturbação do campo eletromagnético, favorecendo o aumento da sensibilidade dos sensores indutivos. Por fim, constatou-se uma demanda crescente por sensores compactos, de baixo custo e capazes de realizar monitoramento contínuo em ambiente industrial, justificando o desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho.

Com base nesses fundamentos, foi desenvolvido um sensor multifuncional destinado ao monitoramento em tempo real da contaminação de óleos lubrificantes, fundamentado na integração dos métodos resistivo, indutivo e capacitivo. A configuração proposta, composta por uma bobina plana associada a um anel de aço silício magnetizado por um campo alternado, mostrou-se eficiente na intensificação

do campo magnético na região sensora, aumentando a interação eletromagnética entre o sensor e as partículas contaminantes. Como consequência, observou-se um aumento da sensibilidade do circuito LC e uma melhor definição das grandezas elétricas produzidas pelos diferentes contaminantes.

Os ensaios experimentais realizados permitiram validar a metodologia proposta, demonstrando boa concordância entre as respostas fornecidas pelo sensor e os resultados obtidos por meio das análises laboratoriais executadas conforme normas técnicas. Os resultados confirmaram que o modo resistivo-indutivo possibilita diferenciar partículas ferromagnéticas das não ferromagnéticas, enquanto o canal capacitivo apresentou elevada sensibilidade para a detecção de contaminantes dielétricos, como microgotas de água e bolhas de ar, ampliando significativamente o espectro de aplicação do sistema desenvolvido.

Entretanto, para as amostras de óleo mineral *Idel* contaminadas artificialmente com partículas de ferro e cobre de malha 325, correspondentes a dimensões inferiores a aproximadamente 45 μm , observou-se uma capacidade limitada de detecção quando a resposta foi avaliada pela razão sinal-ruído (*SNR*). O maior valor obtido foi de 1,495 para a amostra contendo 0,1% de ferro, indicando que o sinal gerado permaneceu muito próximo ao nível de ruído do sistema. Esse resultado demonstra que as perturbações eletromagnéticas produzidas por partículas metálicas de pequenas dimensões foram insuficientes para provocar alterações significativas na resposta elétrica do circuito LC monitorado pelo sistema de aquisição empregado.

Os resultados experimentais evidenciaram que a sensibilidade do sensor depende diretamente das características geométricas da bobina, da intensidade do campo magnético, da frequência de excitação, das propriedades eletromagnéticas das partículas e do desempenho do sistema de condicionamento e aquisição dos sinais. Dessa forma, verificou-se que a configuração experimental utilizada apresenta limitações para a detecção de partículas metálicas muito pequenas, especialmente em baixas concentrações, indicando a necessidade de futuras otimizações do sistema.

Apesar dessa limitação, o sensor desenvolvido apresentou arquitetura compacta, simplicidade construtiva e baixo custo de fabricação, características que favorecem sua aplicação em sistemas de monitoramento preditivo de máquinas e equipamentos industriais. A possibilidade de detectar simultaneamente partículas metálicas, água e ar representa um diferencial importante em relação a diversos

sensores descritos na literatura, tornando o sistema uma alternativa promissora para aplicações de monitoramento contínuo da condição do lubrificante.

Por fim, conclui-se que a metodologia proposta, baseada na integração entre fundamentos do eletromagnetismo, teoria de circuitos ressonantes e técnicas de processamento de sinais, demonstrou potencial para a detecção indireta de contaminantes em óleos lubrificantes. Além de contribuir para o avanço das tecnologias de manutenção preditiva, os resultados obtidos reforçam a importância do desenvolvimento de sensores inteligentes capazes de aumentar a confiabilidade operacional dos equipamentos, reduzir custos de manutenção, minimizar impactos ambientais decorrentes da degradação prematura dos lubrificantes e promover práticas industriais alinhadas aos princípios da sustentabilidade e da Indústria 4.0.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade desta pesquisa, recomenda-se investigar diferentes geometrias da bobina sensora capaz de influenciar a distribuição do campo magnético e o acoplamento eletromagnético com as partículas, afetando diretamente a sensibilidade e a amplitude dos sinais do sensor LCR, e configurações do núcleo magnético, avaliando a influência desses parâmetros na intensidade do campo magnético, na sensibilidade do sensor e no limite mínimo de detecção de partículas metálicas. Também se sugere a avaliação do desempenho do sistema em frequências de excitação superiores às empregadas neste trabalho, bem como a implementação de um oscilador *Clapp* utilizando um capacitor em série de aproximadamente 330 pF associado a capacitores de realimentação de maior capacitância, visando aumentar a estabilidade da frequência de oscilação, o fator de qualidade (Q) do circuito ressonante e a sensibilidade às variações de indutância produzidas pela passagem de partículas metálicas.

Outra perspectiva consiste no desenvolvimento de técnicas mais avançadas de condicionamento e processamento digital de sinais, empregando métodos de filtragem adaptativa, análise tempo-frequência, transformadas *wavelet* aprimorando o processamento dos sinais do sensor, permitindo a análise conjunta nos domínios do tempo e da frequência, com potencial para atenuar ruídos e favorecer a identificação de sinais transitórios associados à passagem de partículas. Algoritmos baseados em

inteligência artificial como o SVM e CNN, com o objetivo de aumentar a razão sinal-ruído (*SNR*) e aprimorar a identificação de contaminantes em baixas concentrações. Paralelamente, recomenda-se a elaboração de modelos numéricos por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) por meio da simulação da distribuição do campo eletromagnético e da interação entre a bobina, o óleo e as partículas contaminantes, permitindo avaliar parâmetros geométricos e operacionais que favoreçam maior sensibilidade de detecção, utilizando ferramentas computacionais para otimizar a geometria do sensor, a distribuição do campo magnético e o canal de escoamento, reduzindo o tempo e os custos associados ao desenvolvimento de novos protótipos.

Sugere-se, ainda, a validação do sensor em condições reais de operação, utilizando diferentes tipos de lubrificantes e equipamentos industriais, bem como a comparação dos resultados obtidos com técnicas consolidadas de monitoramento da condição do óleo, como ferrografia analítica, espectrometria ICP e contagem automática de partículas. Além disso, a integração do sensor a sistemas embarcados com conversores de indutância para digital (IDC), comunicação sem fio e plataformas de *IoT* (do inglês *Internet of Things*, ou Internet das Coisas) poderá viabilizar o monitoramento contínuo e remoto da condição do lubrificante. Essa integração permitirá converter as variações de indutância em dados digitais e transmiti-los a plataformas *IoT*.

Por fim, recomenda-se investigar a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina para classificação automática de contaminantes e modos de desgaste, utilizando de forma integrada os sinais resistivos, indutivos e capacitivos, bem como desenvolver uma versão miniaturizada e industrial do sensor, dotada de eletrônica dedicada, baixo consumo energético e elevada proteção a interferências eletromagnéticas, ampliando sua aplicabilidade em sistemas de manutenção preditiva e em ambientes industriais alinhados aos conceitos da Indústria 4.0.

REFERÊNCIAS

AHN, H. S. *et al.* Practical contaminant analysis of lubricating oil in a steam turbine-generator. **Tribology International**, Oxford, v. 29, n. 2, p. 161–168, fev. 1996. DOI 10.1016/0301-679X(95)00003-M. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0301679X9500003M>>. Acesso em: 23 nov. 2025.

AIREY, J. *et al.* The effect of gas turbine lubricant base oil molecular structure on friction. **Tribology International**, Amsterdã, v. 146, jun. 2020, Article ID 106052. DOI 10.1016/j.triboint.2019.106052. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X19305675>>. Acesso em: 2 dez. 2025.

ALEXANDER, C.; SADIKU, M. **Fundamentals of Electric Circuits**. 7. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2020. 1984 p.

BENAMMAR, S.; TEE, K. F. Failure diagnosis of rotating machines for steam turbine in Cap-Djinet thermal power plant. **Engineering Failure Analysis**, Oxford, v. 149, Article ID 107284, jul. 2023. DOI 10.1016/j.engfailanal.2023.107284. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630723002388>>. Acesso em: 22 jun. 2025.

BEZERRA, E. M.; GONÇALVES, A. C. Desenvolvimento de Sensor LCR para Detecção Online de Partículas em Óleo Lubrificante. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO E GESTÃO DE ATIVOS – CBMGA, 40., 2025, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Centro de Convenções do Riocentro, 2025.

BLITZ, J. **Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing**. 2. ed. London: Springer, 1997. 261 p.

BUSCH, K. W.; BUSCH, M. A. Light Polarization and Signal Processing in Chiroptical Instrumentation. *In*: POLAVARAPU, Prasad L. (ed.). **Chiral Analysis: advances in spectroscopy, chromatography and emerging methods**. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2018. cap. 3, p. 101-149. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/pii/B9780444640277000033>>. Acesso em: 28 abr. 2026.

CAO, W. *et al.* Multisensor information integration for online wear condition monitoring of diesel engines. **Tribology International**, Amsterdã, v. 82, p. 68-77, fev. 2015. DOI 10.1016/j.triboint.2014.09.020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X14003442>>. Acesso em: 8 mar. 2026.

CARRETEIRO, R. P.; BELMIRO, P. N. A. **Lubrificantes & Lubrificação Industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006. 504 p.

CLAPP, J. K. An inductance-capacitance oscillator of unusual frequency stability. **Proceedings of the IRE**, Nova York, v. 36, n. 3, p. 356–358, mar. 1948. DOI

10.1109/JRPROC.1948.233920. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1697643>>. Acessado em: fev. 2026.

CUI, B. *et al.* An improved Cox proportional hazards model for reliability analysis of aviation gas turbines considering varying environmental conditions and operational settings. **Reliability Engineering and System Safety**, Amsterdã, v. 265, Article ID 111451, jan. 2026. DOI 10.1016/j.ress.2025.111451. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832025006519>>. Acesso em: 10 mar. 2026.

DU, L. *et al.* Improving sensitivity of an inductive pulse sensor for detection of metallic wear debris in lubricants using parallel LC resonance method. **Measurement Science and Technology**, Bristol, v. 24, Article ID 075106, n. 7, jun. 2013. DOI 10.1088/0957-0233/24/7/075106. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/24/7/075106>>. Acesso em: 5 ago. 2025.

DU, L.; ZHE, J. A high throughput inductive pulse sensor for online oil debris monitoring. **Tribology International**, Oxford, v. 44, n. 2, p. 175-179, fev. 2011. DOI 10.1016/j.triboint.2010.10.022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X10002653>>. Acesso em: 25 jun. 2025.

FLANAGAN, I. M.; JORDAN, J. R.; WHITTINGTON, H. W. Wear-debris detection and analysis techniques for lubricant-based condition monitoring. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, Bristol, v. 21, n. 11, 1988. DOI 10.1088/0022-3735/21/11/001. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3735/21/11/001>>. Acesso em: 25 jun. 2025.

FORSTHOFFER, W. E. Steam Turbine Key Safety and Reliability Issues. *In: Forsthoffer's Proven Guidelines for Rotating Machinery*. Oxford: Elsevier, 2022. p. 235-258.

FRAUSCHER, M. *et al.* Improving sustainability by enhanced engine component lifetime through friction modifier additives in fuels. **Fuel**, Oxford, v. 358, n. A, Article ID 130102, fev. 2024. DOI 10.1016/j.fuel.2023.130102. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236123027163>>. Acesso em: 8 jun. 2025.

GONÇALVES, A. C. *et al.* Assistance of analytical ferrography in the interpretation of wear test results carried out with biolubricants. **Tribology International**, Oxford, v. 197, Article ID 109758, set. 2024. DOI 10.1016/j.triboint.2024.109758. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X24005103>>. Acesso em: 2 nov. 2025.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física: Eletromagnetismo**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 286 p.

HAYT JR, W. H. *et al.* **Engineering Circuit Analysis**. 9. ed. New York: McGraw-Hill, 2019. 864 p.

HONG, W. *et al.* Radial inductive debris detection sensor and performance analysis. **Measurement Science and Technology**, Bristol, v. 24, Article ID 125103, n. 12, out. 2013. DOI 10.1088/0957-0233/24/12/125103. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/24/12/125103>>. Acesso em: 5 ago. 2025.

HOROWITZ, P.; HILL, W. **The Art of Electronics**. 3. ed. Cambridge University Press, 2015. 1224 p.

HUSSAIN, T; SARANGI, N; SIVARAMAKRISHNA M.; UDAYAKUMAR, M. A study on the rotor profile and internal clearances of the Gerotor pump used in lubricating system of gas turbine engine. **Materials Today: Proceedings**, Oxford, v. 46, n. 19, p. 9869-9874, fev. 2021. DOI 10.1016/j.matpr.2020.12.797. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320405152>>. Acesso em: 8 jun. 2025.

HUSSIN, N. *et al.* The effect of semi-conductive and non-conductive nano particles in sunflower oil based insulation. *In*: FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING ELECTRICAL ENERGY, 1, 2020, Melaka. **Anais...** Melaka: Journal of Physics, 2020.

JAWAD, A.; STEFAN-HENNINGSEN, E.; KIANI, A. Applications of classical and quantum machine learning in manufacturing: predictive maintenance, scheduling and tribology. **Next Research**, v. 7, Article ID 101532, maio 2026. DOI 10.1016/j.nexres.2026.101532. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S3050475926002290>>. Acesso em: 3 mai. 2026.

JIN, J. **The Finite Element Method in Electromagnetics**. 2. ed. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2014. 780 p.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001. 388 p.

LI, D. *et al.* Power plant turbine power trend prediction based on continuous prediction and online oil monitoring data of deep learning. **Tribology International**, Oxford, v. 191, Article ID 109083, mar. 2024. DOI 10.1016/j.triboint.2023.109083. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X2300871X>>. Acesso em: 23 jun. 2025.

LIU, E. -C. *et al.* Dual-coil solenoid sensor design and its experimental study for wear particles detection. **Journal of Dalian Maritime University**, Dalian, v. 16, 2. ed, p. 102-106+116, maio 2016. DOI 10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2016.02.017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/309670190_Dual-coil_solenoid_sensor_design_and_its_experimental_study_for_wear_particles_detection>. Acesso em: 3 jul. 2025.

LIU, M. *et al.* Towards lifetime lubrication of wind turbine gearboxes: Technical and physical investigations on used oils. **Wear**, Amsterdã, v. 571, Article ID 205760, jun. 2025. DOI 10.1016/j.wear.2025.205760. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164825000298>>. Acesso em: 28 nov. 2025.

LIU, Q. *et al.* An improved genetic algorithm with modified critical path-based searching for integrated process planning and scheduling problem considering automated guided vehicle transportation task. **Journal of Manufacturing Systems**, Amsterdam, v. 70, p. 127–136, out. 2023. DOI 10.1016/j.jmsy.2023.07.004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612523001309>>. Acesso em: 10 abr. 2025.

LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. **Geração Termelétrica: Planejamento, Projeto e Operação Volume 1**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. 1286 p.

LU, J. *et al.* In-situ Detection of Ferromagnetic Wear Debris for Machinery Condition Monitoring. **IEEE Sensors Journal**, 2026. IEEE Sensors Journal, Nova York, v. PP, n. 99, jan. 2026. DOI 10.1109/JSEN_2026_3680571. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/403674923_In-situ_Detection_of_Ferromagnetic_Wear_Debris_for_Machinery_Condition_Monitoring>. Acesso em: 23 abr. 2026.

MATE, C. M.; CARPICK, R. W. **Tribology on the Small Scale: A Modern Textbook on Friction, Lubrication, and Wear**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 2019. 448 p.

MILLER, J.; KITALJEVICH, D. In-line oil debris monitor for aircraft engine condition assessment. *In*: IEEE AEROSPACE CONFERENCE PROCEEDINGS, 6, 2000, Bristol. **Anais...** Bristol: IEEE Xplore, 2000. p. 49-56

MILLER, J. N.; MILLER, J. C.; MILLER, R. D. **Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry**. 7. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2018. 312 p.

NADKARNI, R. A. K. **Guide to ASTM Test Methods for the Analysis of Petroleum Products and Lubricants**. 2. ed. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2007. 425 p.

NISHIYAMA, H.; NAKAMURA, M. Capacitance of disk capacitors. **IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology**, New York, v. 16, n. 3, p. 360-366, maio 1993. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=232065>>. Acesso em: 20 out. 2025.

PAN, Y. *et al.* An Integrated Data and Knowledge Model Addressing Aleatory and Epistemic Uncertainty for Oil Condition Monitoring. **Reliability Engineering and System Safety**, Amsterdã, v. 210, Article ID 107546, jun. 2021. DOI 10.1016/j.ress.2021.107546. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832021001022>>. Acesso em: 25 abr. 2026.

PINTO, A. K.; XAVIER, J. A. N. **Manutenção: Função Estratégica**. 5. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001. 584 p.

PRABHAKARAN, A; JAGGA, C.R. Condition monitoring of steam turbine-generator through contamination analysis of used lubricating oil. **Tribology International**, Amsterdã, v. 32, p. 145-152, mar. 1999. DOI 10.1016/S0301-679X(99)00028-6. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X99000286>>. Acesso em: 21 mar. 2026.

RICHARDSON, E.S. Thermodynamic performance of new thermofluidic feed pumps for Organic Rankine Cycle applications. **Applied Energy**, Amsterdã, v. 161, p. 75-84, jan. 2016. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915012313>>. Acesso em: 25 mar. 2026.

RUPITSCH, J. R. **Piezoelectric Sensors and Actuators: Fundamentals and Applications**. 1. ed. Berlim: Springer, 2018. 559 p.

SARKAR, D. K. **Thermal Power Plant: Design and Operation**. 1. ed. Oxford: Elsevier, 2015. 592 p.

SHAN, Z. *et al.* Design and performance of radial multilayer magnetic structure for magnetic roller in eddy current separation. **Minerals Engineering**, Oxford, v. 229, Article ID 109977, ago. 2025. DOI 10.1016/j.mineng.2025.109377. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687525002055>>. Acesso em: 20 out. 2025.

SHI, H. *et al.* A multi-function sensor for online detection of contaminants in hydraulic oil. **Tribology International**, Oxford, v. 138, p. 196-203, out. 2019. DOI 10.1016/j.triboint.2019.05.025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X19302841>>. Acesso em: 20 ago. 2025.

SILVA, J. G. *et al.* Medição em tempo real do teor de umidade em óleo lubrificante de mancais de usina hidrelétrica por meio de ponte de sensores capacitivos. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA – CONEM, 7, 2012, São Luís. **Anais...** São Luís: ABCM, 2012.

SILVESTRI, L. *et al.* Maintenance transformation through Industry 4.0 technologies: A systematic literature review. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 123, Article ID 103335, dez. 2020. DOI: 10.1016/j.compind.2020.103335. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361520305698>>. Acesso em: 12 abr. 2025.

SIMMONS, G. F. *et al.* Extending performance limits of turbine oils. **Tribology International**, Oxford, v. 69, p. 52-60, jan. 2014. DOI 10.1016/j.triboint.2013.08.015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X1300296X>>. Acesso em: 5 nov. 2025.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Principles of Instrumental Analysis**. 7. ed. Belmont: Cengage Learning, 2017. 992 p.

SMOLKIN, M. R.; SMOLKIN, R. D. Calculation and Analysis of the Magnetic Force Acting on a Particle in the Magnetic Field of Separator. **IEEE Transactions on Magnetism**, New York, v. 42, n. 11, p. 3682-3693, nov. 2006. DOI 10.1109/TMAG.2006.880688. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1715678>>. Acesso em: 2 nov. 2025.

SU, L. *et al.* Tribological behavior of copper-iron particles as third body additives on copper matrix composites: Experiment link third body morphology to accommodation mechanism. **Tribology International**, Londres, v. 191, Article ID 109118, mar. 2024. DOI 10.1016/j.triboint.2023.109118. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X23009088>>. Acesso em: 11 nov. 2025.

THAKARE, M. R. *et al.* Effect of abrasive particle size and the influence of microstructure on the wear mechanisms in wear-resistant materials. **Wear**, Lausanne, v. 276–277, p. 16–28, fev. 2012. DOI 10.1016/j.wear.2011.11.008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164811006247>>. Acesso em: 28 mai. 2025.

TONGHAI, W. *et al.* Progress and trend of sensor technology for on-line oil monitoring. **Technological Sciences**, Berlim, v. 56, n. 12, p. 2914–2926, nov. 2013. DOI 10.1007/s11431-013-5400-5. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11431-013-5400-5>>. Acesso em: 13 jun. 2025.

VANCE, J. M.; ZEIDAN, F. Y.; MURPHY, B. G. **Machinery Vibration and Rotordynamics**. 1. ed. Hoboken: Wiley, 2010. 578 p.

WANG, C. **Health Monitoring and Fault Diagnostics of Wind Turbines**. Maio 2016. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia e Ciências, Universidade de Aalborg, Dinamarca, 2016.

WEBSTER, J. G.; EREN, H. **Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Two-Volume Set**. 2. ed. CRC Press, 2014. 3559 p.

WILLIAMS, J. A. Wear and wear particles—some fundamentals. **Tribology International**, Oxford, v. 38, n. 10, p. 863-870, maio 2005. DOI 10.1016/j.triboint.2005.03.007. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X05000903>>. Acesso em: 04 jun. 2025.

WU, T. *et al.* Progress and trend of sensor technology for on-line oil monitoring. **Science China Technological Sciences**, Beijing, v. 56, n. 12, p. 2914–2926, nov. 2013. DOI 10.1007/s11431-013-5400-5. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11431-013-5400-5>>. Acesso em: 18 mai. 2025.

YAO, T. *et al.* Effect of iron and copper on the thermal oxidation stability of synthetic hydrocarbon aviation lubricating oil. **Catalysis Communications**, Amsterdã, v. 161, Article ID 106363, dez. 2021. DOI 10.1016/j.catcom.2021.106363. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566736721000868>>. Acesso em: 10 nov. 2025.

ZENG, L. *et al.* A high sensitive multi-parameter micro sensor for the detection of multi-contamination in hydraulic oil. **Sensors and Actuators A: Physical**, Dalian, v. 282, p. 197-205, out. 2018. DOI 10.1016/j.sna.2018.09.023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424718306137>>. Acesso em: 23 out. 2025.

ZHANG, H. *et al.* A novel on-chip impedance sensor for the detection of particle contamination in hydraulic oil. **Micromachines**, Basileia, v. 8, Article ID 249, ago. 2017. DOI 10.3390/mi8080249. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/319116057_A_Novel_On-Chip_Impedance_Sensor_for_the_Detection_of_Particle_Contamination_in_Hydraulic_Oil>. Acesso em: 26 jun. 2025.

ZHANG, W. *et al.* Self-powered solid–liquid triboelectric sensor for multi-material wear particle recognition and real-time oil monitoring. **Tribology International**, Amsterdã, v. 214, Article ID 111332, fev. 2026. DOI 10.1016/j.triboint.2025.111332. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X25008278>>. Acesso em: 2 mar. 2026.

ZHOU, D. *et al.* Research on sensing mechanism of ferromagnetic component flaw using pulsed eddy current testing. **Chinese Journal of Scientific Instrument (Yi Qi Yi Biao Xue Bao)**, Beijing, v. 36, p. 989-995, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/282315112_Research_on_sensing_mechanism_of_ferromagnetic_component_flaw_using_pulsed_eddy_current_testing>. Acesso em: 5 set. 2025.

ZHU, X.; ZHONG, C.; ZHE, J. Lubricating oil conditioning sensors for online machine health monitoring – A review. **Tribology International**, Oxford, v. 109, p. 473–484, maio 2017. DOI 10.1016/j.triboint.2017.01.015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X17300166>>. Acesso em: 3 mai. 2025.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16358:2015 – Produtos de petróleo – Determinação de água — Método de titulação coulométrica Karl Fischer. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D1744-21 – Standard Test Method for Determination of Water in Liquid Petroleum Products by Karl Fischer Reagent. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D5185-21 – Standard Test Method for Multi-Element Determination of Used and Unused Lubricating Oils and Base Oils by ICP-AES. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 4406:2017 – Hydraulic fluid power — Fluids — Method for coding the level of contamination by solid particles. Geneva: ISO, 2017.

NATIONAL AEROSPACE STANDARD. NAS 1638 – Cleanliness Requirements for Parts Used in Hydraulic Systems. Washington, DC: NAS, 1964.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. SAE AS4059F – Aerospace Fluid Power – Cleanliness Classification for Hydraulic Fluids. Warrendale: SAE International, 2013.

ANEXO A – SCRIPTS EM MATLAB

LEITURA DOS DADOS DO ÓLEO LUBRIFICANTE INDUSTRIAL

```

clear all;
close all;
clc;

% Arquivo do Bloco de Notas
[arquivo, caminho] = uigetfile({'*.csv','Arquivos CSV (*.txt)'}, ...
    'Selecione o arquivo txt');

% Leitura dos dados
data = readmatrix(filedata);

% Extração dos dados das colunas
Time = data(:, 1);
With_Silicon_Ring = data(:, 2);
Without_Silicon_Ring = data(:, 3);

% Remoção do valor inicial
x0 = With_Silicon_Ring(1);
y0 = Without_Silicon_Ring(1);

x_trans = With_Silicon_Ring - x0;
y_trans = Without_Silicon_Ring - y0;

% =====
% Cálculo da frequência de amostragem
% =====
dt = mean(diff(Time));
Fs = 1/dt;
Fn = Fs/2;

disp(['Frequência de amostragem Fs = ', num2str(Fs), ' Hz']);
disp(['Frequência de Nyquist Fn = ', num2str(Fn), ' Hz']);

% =====
% Definição automática das frequências de corte
% =====
fc_low = 0.20*Fn;    % passa-baixa: 20% da frequência de Nyquist
fc_high = 0.02*Fn;  % passa-alta: 2% da frequência de Nyquist

% Segurança para evitar erro no butter
if fc_low >= Fn
    fc_low = 0.8*Fn;
end

if fc_high >= Fn
    fc_high = 0.1*Fn;
end

if fc_high <= 0
    fc_high = 0.01*Fn;
end

% Frequências normalizadas
Wn_low = fc_low/Fn;
Wn_high = fc_high/Fn;

% =====
% Filtros Butterworth
% =====
ordem = 4;

```

```

% Filtro passa-baixa
[b_low, a_low] = butter(ordem, Wn_low, 'low');

x_low = filtfilt(b_low, a_low, x_trans);
y_low = filtfilt(b_low, a_low, y_trans);

% Filtro passa-alta
[b_high, a_high] = butter(ordem, Wn_high, 'high');

x_high = filtfilt(b_high, a_high, x_trans);
y_high = filtfilt(b_high, a_high, y_trans);

% =====
% Cálculo dos picos
% =====
[picos_x, locs_x] = findpeaks(x_trans);

N = 8;

if length(picos_x) < N
    N_x = length(picos_x);
else
    N_x = N;
end

[picos_maiores, idx_x] = maxk(picos_x, N_x);
amplitude_media_maior = mean(picos_maiores);

[picos_y, locs_y] = findpeaks(y_trans);

if length(picos_y) < N
    N_y = length(picos_y);
else
    N_y = N;
end

[picos_menores, idx_y] = maxk(picos_y, N_y);
amplitude_media_menor = mean(picos_menores);

% =====
% Ruído e SNR
% =====
noise = With_Silicon_Ring - Without_Silicon_Ring;
media_ruído = mean(noise);
desvio_ruído = std(noise);

disp(['Amplitude média dos maiores picos: ', num2str(amplitude_media_maior)]);
disp(['Amplitude média dos menores picos: ', num2str(amplitude_media_menor)]);
disp(['Desvio padrão do ruído = ', num2str(desvio_ruído)]);
disp(['SNR With Silicon Ring = ', num2str(amplitude_media_maior/desvio_ruído)]);
disp(['SNR Without Silicon Ring = ', num2str(amplitude_media_menor/desvio_ruído)]);

% =====
% Gráfico 1 - Sinal original
% =====
figure;
plot(Time, x_trans, 'b-', 'LineWidth', 1);
hold on;
plot(Time, y_trans, 'r-', 'LineWidth', 1);
hold off;

xlabel('Tempo (s)', 'FontSize', 22);
ylabel('Indutância (H)', 'FontSize', 22);
title('Sinal original da indutância', 'FontSize', 24);
legend('Com anel de silício', 'Sem anel de silício', ...
    'Location', 'best', 'FontSize', 16);
set(gca, 'FontSize', 20);
grid on;

```

```

% =====
% Gráfico 2 - Filtro passa-baixa
% =====
figure;
plot(Time, x_low, 'b-', 'LineWidth', 1.5);
hold on;
plot(Time, y_low, 'r-', 'LineWidth', 1.5);
hold off;

xlabel('Tempo (s)', 'FontSize', 22);
ylabel('Indutância filtrada (H)', 'FontSize', 22);
title('Sinal filtrado com passa-baixa', 'FontSize', 24);
legend('Com anel de silício', 'Sem anel de silício', ...
       'Location', 'best', 'FontSize', 16);
set(gca, 'FontSize', 20);
grid on;

% =====
% Gráfico 3 - Filtro passa-alta
% =====
figure;
plot(Time, x_high, 'b-', 'LineWidth', 1.5);
hold on;
plot(Time, y_high, 'r-', 'LineWidth', 1.5);
hold off;

xlabel('Tempo (s)', 'FontSize', 22);
ylabel('Indutância filtrada (H)', 'FontSize', 22);
title('Sinal filtrado com passa-alta', 'FontSize', 24);
legend('Com anel de silício', 'Sem anel de silício', ...
       'Location', 'best', 'FontSize', 16);
set(gca, 'FontSize', 20);
grid on;

% =====
% Gráfico 4 - Comparação: Com anel de silício
% =====
figure;
plot(Time, x_trans, 'k-', 'LineWidth', 1);
hold on;
plot(Time, x_low, 'b-', 'LineWidth', 1.5);
plot(Time, x_high, 'r-', 'LineWidth', 1.5);
hold off;

xlabel('Tempo (s)', 'FontSize', 22);
ylabel('Indutância (H)', 'FontSize', 22);
title('Comparação dos filtros - Com anel de silício', 'FontSize', 24);
legend('Original', 'Passa-baixa', 'Passa-alta', ...
       'Location', 'best', 'FontSize', 16);
set(gca, 'FontSize', 20);
grid on;

% =====
% Gráfico 5 - Comparação: Sem anel de silício
% =====
figure;
plot(Time, y_trans, 'k-', 'LineWidth', 1);
hold on;
plot(Time, y_low, 'b-', 'LineWidth', 1.5);
plot(Time, y_high, 'r-', 'LineWidth', 1.5);
hold off;

xlabel('Tempo (s)', 'FontSize', 22);
ylabel('Indutância (H)', 'FontSize', 22);
title('Comparação dos filtros - Sem anel de silício', 'FontSize', 24);
legend('Original', 'Passa-baixa', 'Passa-alta', ...
       'Location', 'best', 'FontSize', 16);

```

```
set(gca, 'FontSize', 20);
grid on;
```

LEITURA DOS DADOS DO ÓLEO MINERAL FARMACÊUTICO

Contents

- =====
- =====
- 1) Selecionar arquivo CSV
- 2) Ler tabela
- 3) Extrair colunas
- 4) Preparacao dos dados
- =====
- 5) DETECCAO DE INCONSISTENCIAS
- =====
- =====
- 6) FILTRO PASSA-BAIXA
- =====
- =====
- 7) GRAFICO 1 - SINAL COM DETECCAO DE INCONSISTENCIAS
- =====
- =====
- 8) GRAFICO 2 - FILTRO PASSA-BAIXA
- =====
- =====
- 9) RESUMO DAS INCONSISTENCIAS
- =====
- =====
- 10) ESTATISTICAS GERAIS DO SINAL
- =====

```
clc
clear
close all
```

```
=====
ANALISE DO SINAL NO DOMINIO DO TEMPO
```

```
+ DETECCAO DE INCONSISTENCIAS
```

```
+ FILTRO PASSA-BAIXA
=====
```

1) Selecionar arquivo CSV

```
[arquivo, caminho] = uigetfile({'*.csv','Arquivos CSV (*.csv)'}, ...
    'Selecione o arquivo CSV');

if isequal(arquivo,0)
    error('Nenhum arquivo foi selecionado.');
```

```
end

nomeCompleto = fullfile(caminho, arquivo);
```

2) Ler tabela

```
dados = readtable(nomeCompleto);
```

3) Extrair colunas

```
try
    tempo = dados.second;
    tensao = dados.Volt;
catch
    tempo = dados(:,1);
    tensao = dados(:,2);
end
```

4) Preparacao dos dados

```
tempo = tempo(:);

tensao = tensao(:);

idxValidos = ~isnan(tempo) & ~isnan(tensao);

tempo = tempo(idxValidos);

tensao = tensao(idxValidos);

if numel(tempo) < 5
    error('Dados insuficientes.');
```

end

```
dt = mean(diff(tempo));
Fs = 1/dt;
N = length(tensao);

fprintf('Arquivo carregado com sucesso.\n');
fprintf('Numero de amostras: %d\n', N);
fprintf('Passo medio de tempo dt = %.12g s\n', dt);
fprintf('Frequencia de amostragem Fs = %.12g Hz\n', Fs);
```

5) DETECCAO DE INCONSISTENCIAS

```
janela = max(11, round(N*0.02));

if mod(janela,2) == 0
    janela = janela + 1;
end

mediaMovel = movmean(tensao, janela);
desvioMovel = movstd(tensao, janela);
```

```

desvioMovel(desvioMovel == 0) = eps;

zLocal = abs(tensao - mediaMovel) ./ desvioMovel;

dV = [0; abs(diff(tensao))];

limiar_dV = mean(dV) + 3*std(dV);
limiar_z = 3;

idx_inconst = (zLocal > limiar_z) | (dV > limiar_dV);
idx_num = find(idx_inconst);

```

6) FILTRO PASSA-BAIXA

```

fc_low = 0.1 * Fs;

if fc_low >= Fs/2
    fc_low = 0.45 * Fs;
end

Wn_low = fc_low/(Fs/2);

if Wn_low >= 1
    Wn_low = 0.99;
end

[b_low, a_low] = butter(4, Wn_low, 'low');
tensao_pb = filtfilt(b_low, a_low, tensao);

```

7) GRAFICO 1 - SINAL COM DETECCAO DE INCONSISTENCIAS

```

figure('Name','Sinal com Inconsistencias','NumberTitle','off');

plot(tempo, tensao, 'b', 'LineWidth', 1);
hold on
grid on

xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Tensao (V)');
title('Sinal no dominio do tempo com deteccao de inconsistencias');

yl = ylim;

if ~isempty(idx_num)

    blocos = {};
    inicio = idx_num(1);
    fim = idx_num(1);

    for k = 2:length(idx_num)
        if idx_num(k) == idx_num(k-1) + 1
            fim = idx_num(k);
        else
            blocos{end+1} = [inicio fim];
            inicio = idx_num(k);
        end
    end
end

```

```

        fim = idx_num(k);
    end
end

blocos{end+1} = [inicio fim];

for b = 1:length(blocos)

    i1 = blocos{b}(1);
    i2 = blocos{b}(2);

    patch([tempo(i1) tempo(i2) tempo(i2) tempo(i1)], ...
          [yl(1) yl(1) yl(2) yl(2)], ...
          [1 0.85 0.85], ...
          'EdgeColor','none', ...
          'FaceAlpha',0.35);

end

plot(tempo, tensao, 'b', 'LineWidth', 1);

plot(tempo(idx_inconst), tensao(idx_inconst), 'ro', ...
      'MarkerSize',5, ...
      'LineWidth',1.2);

legend('Faixa com inconsistencia', ...
      'Sinal', ...
      'Inconsistencias detectadas');

else
    legend('Sinal');
end

```

8) GRAFICO 2 - FILTRO PASSA-BAIXA

```

figure('Name','Filtro Passa-Baixa','NumberTitle','off');

plot(tempo, tensao, ...
      'Color', [0.7 0.7 0.7], ...
      'LineWidth', 0.8);
hold on

plot(tempo, tensao_pb, ...
      'r', ...
      'LineWidth', 1.5);

grid on
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Tensao (V)');
title('Comparacao: Sinal original x Passa-baixa');

legend('Original atenuado', ...
      'Passa-baixa');

```

9) RESUMO DAS INCONSISTENCIAS

```

num_inconst = sum(idx_inconst);

perc_inconst = 100 * num_inconst / N;

```

```

fprintf('\nResumo das inconsistencias detectadas:\n');
fprintf('Pontos com inconsistencia: %d\n', num_inconst);
fprintf('Percentual do sinal: %.4f %%\n', perc_inconst);

if num_inconst > 0

    fprintf('Primeiro ponto inconsistente em t = %.12g s\n', ...
        tempo(find(idx_inconst,1,'first')));

    fprintf('Ultimo ponto inconsistente em t = %.12g s\n', ...
        tempo(find(idx_inconst,1,'last')));

else
    fprintf('Nenhuma inconsistencia relevante foi detectada pelos criterios
adotados.\n');
end

```

10) ESTATISTICAS GERAIS DO SINAL

```

fprintf('\nResumo estatistico do sinal original:\n');
fprintf('Media          = %.12g V\n', mean(tensao));
fprintf('Desvio padrao   = %.12g V\n', std(tensao));
fprintf('Minimo          = %.12g V\n', min(tensao));
fprintf('Maximo          = %.12g V\n', max(tensao));
fprintf('RMS global      = %.12g V\n', sqrt(mean(tensao.^2)));

fprintf('\nResumo do filtro passa-baixa:\n');
fprintf('Frequencia de corte passa-baixa = %.12g Hz\n', fc_low);

```

LEITURA DOS DADOS DO ÓLEO MINERAL FARMACÊUTICO PARA A TABELA 1

Contents

- =====
- =====
- 1) Selecionar arquivo CSV
- 2) Ler tabela
- 3) Extrair colunas
- 4) Preparacao dos dados
- =====
- 5) DETECAO DE INCONSISTENCIAS
- =====
- =====
- 6) FILTRO PASSA-BAIXA
- =====
- =====
- 7) GRAFICO DO SINAL COM INCONSISTENCIAS
- =====
- =====
- 8) GRAFICO DO FILTRO PASSA-BAIXA
- =====
- =====
- 9) ANALISE FFT
- =====

- =====
- 10) CALCULO DE Sf, LODm, LOQm, SNR, SNR2 E R²
- =====
- SNR2 pela amplitude maxima media e ruido
- Dados para regressao linear e R²
- Grafico da regressao linear
- =====
- 11) RESULTADOS NO COMMAND WINDOW
- =====
- =====
- 12) RESUMO DAS INCONSISTENCIAS
- =====
- =====
- 13) ESTATISTICAS GERAIS DO SINAL
- =====

```
clc
clear
close all
```

```
=====
ANALISE DO SINAL NO DOMINIO DO TEMPO
```

```
+ DETECCAO DE INCONSISTENCIAS
```

```
+ FILTRO PASSA-BAIXA
```

```
+ FFT
```

```
+ Sf, LODm, LOQm, SNR, SNR2 E R2
```

1) Selecionar arquivo CSV

```
[arquivo, caminho] = uigetfile({'*.csv','Arquivos CSV (*.csv)'}, ...
    'Selecione o arquivo CSV');
```

```
if isequal(arquivo,0)
    error('Nenhum arquivo foi selecionado.');
```

```
end
nomeCompleto = fullfile(caminho, arquivo);
```

```
Error using Sf_LOD_m_LOQ_m_SNR (line 18)
```

```
Nenhum arquivo foi selecionado.
```

2) Ler tabela

```
dados = readtable(nomeCompleto);
```

3) Extrair colunas

```
try
    tempo = dados.second;
```

```

    tensao = dados.Volt;
catch
    tempo = dados(:,1);
    tensao = dados(:,2);
end

```

4) Preparacao dos dados

```

tempo = tempo(:);

tensao = tensao(:);

idxValidos = ~isnan(tempo) & ~isnan(tensao);

tempo = tempo(idxValidos);

tensao = tensao(idxValidos);

if numel(tempo) < 5
    error('Dados insuficientes.');
```

end

```

dt = mean(diff(tempo));
Fs = 1/dt;
N = length(tensao);

fprintf('Arquivo carregado com sucesso.\n');
fprintf('Numero de amostras: %d\n', N);
fprintf('Passo medio de tempo dt = %.12g s\n', dt);
fprintf('Frequencia de amostragem Fs = %.12g Hz\n', Fs);

```

5) DETECCAO DE INCONSISTENCIAS

```

janela = max(11, round(N*0.02));

if mod(janela,2) == 0
    janela = janela + 1;
end

mediaMovel = movmean(tensao, janela);
desvioMovel = movstd(tensao, janela);
desvioMovel(desvioMovel == 0) = eps;

zLocal = abs(tensao - mediaMovel) ./ desvioMovel;
dV = [0; abs(diff(tensao))];

limiar_dV = mean(dV) + 3*std(dV);
limiar_z = 3;

idx_inconst = (zLocal > limiar_z) | (dV > limiar_dV);
idx_num = find(idx_inconst);

```

6) FILTRO PASSA-BAIXA

```
fc_low = 0.1 * Fs;

if fc_low >= Fs/2
    fc_low = 0.45 * Fs;
end

Wn_low = fc_low/(Fs/2);

if Wn_low >= 1
    Wn_low = 0.99;
end

[b_low, a_low] = butter(4, Wn_low, 'low');
tensao_pb = filtfilt(b_low, a_low, tensao);
```

7) GRAFICO DO SINAL COM INCONSISTENCIAS

```
figure('Name','Sinal com Inconsistencias','NumberTitle','off');

plot(tempo, tensao, 'b', 'LineWidth', 1);
hold on
grid on

xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Tensao (V)');
title('Sinal no dominio do tempo com deteccao de inconsistencias');

yl = ylim;

if ~isempty(idx_num)

    blocos = {};
    inicio = idx_num(1);
    fim = idx_num(1);

    for k = 2:length(idx_num)
        if idx_num(k) == idx_num(k-1) + 1
            fim = idx_num(k);
        else
            blocos{end+1} = [inicio fim];
            inicio = idx_num(k);
            fim = idx_num(k);
        end
    end

    blocos{end+1} = [inicio fim];

    for b = 1:length(blocos)

        i1 = blocos{b}(1);
        i2 = blocos{b}(2);

        patch([tempo(i1) tempo(i2) tempo(i2) tempo(i1)], ...
```

```

        [yl(1) yl(1) yl(2) yl(2)], ...
        [1 0.85 0.85], ...
        'EdgeColor','none', ...
        'FaceAlpha',0.35);
    end

    plot(tempo, tensao, 'b', 'LineWidth', 1);

    plot(tempo(idx_inconst), tensao(idx_inconst), 'ro', ...
        'MarkerSize',5, ...
        'LineWidth',1.2);

    legend('Faixa com inconsistencia', ...
        'Sinal', ...
        'Inconsistencias detectadas');
else
    legend('Sinal');
end

```

8) GRAFICO DO FILTRO PASSA-BAIXA

```

figure('Name','Filtro Passa-Baixa','NumberTitle','off');

plot(tempo, tensao, 'Color', [0.7 0.7 0.7], 'LineWidth', 0.8);
hold on

plot(tempo, tensao_pb, 'r', 'LineWidth', 1.5);

grid on
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Tensao (V)');
title('Comparacao: Sinal original x Passa-baixa');

legend('Original', 'Passa-baixa');

```

9) ANALISE FFT

```

Y = fft(tensao_pb);

P2 = abs(Y/N);

P1 = P2(1:floor(N/2)+1);

P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);

freq = Fs*(0:floor(N/2))/N;

P1(1) = 0;

```

```

[amp_max, idxFreq] = max(P1);

f_medida = freq(idxFreq);

figure('Name','FFT do Sinal Filtrado','NumberTitle','off');

plot(freq, P1, 'k', 'LineWidth', 1.2);
grid on

xlabel('Frequencia (Hz)');
ylabel('Amplitude');
title('Espectro de Frequencia do Sinal Filtrado - FFT');

xline(f_medida, '--b', 'Frequencia dominante', 'LineWidth', 1.2);
xline(2e6, '--r', '2 MHz referencia', 'LineWidth', 1.2);

legend('FFT', 'Frequencia dominante', 'Frequencia de referencia');

```

10) CALCULO DE Sf, LODm, LOQm, SNR, SNR2 E R²

```

f_ref = 2e6;           % Hz
Delta_m = 100;         % mg

Delta_f = 0.5;         % Hz
sigma_f = 1.10 * Delta_f; % Hz

Sf = Delta_m / Delta_f; % mg/Hz

LOD_m = (3 * sigma_f) / Sf;
LOQ_m = (10 * sigma_f) / Sf;

SNR = Delta_f / sigma_f;

```

SNR2 pela amplitude maxima media e ruido

```

ruido = tensao - tensao_pb;

desvio_ruido = std(ruido);

[picos_amp, ~] = findpeaks(abs(tensao_pb));

if isempty(picos_amp)
    amplitude_media_maxima = max(abs(tensao_pb));
elseif length(picos_amp) >= 5
    maiores_picos = maxk(picos_amp, 5);
    amplitude_media_maxima = mean(maiores_picos);
else
    amplitude_media_maxima = mean(picos_amp);
end

```

```

if desvio_ruido > 0
    SNR2 = amplitude_media_maxima / desvio_ruido;
else
    SNR2 = Inf;
end

```

Dados para regressao linear e R^2

```

massa_exp = [0 25 50 75 100];

Deltaf_exp = [0 0.125 0.250 0.375 0.500];

coef = polyfit(Deltaf_exp, massa_exp, 1);

massa_ajustada = polyval(coef, Deltaf_exp);

SSres = sum((massa_exp - massa_ajustada).^2);

SStot = sum((massa_exp - mean(massa_exp)).^2);

R2 = 1 - (SSres/SStot);

```

Grafico da regressao linear

```

figure('Name','Regressao Linear - Massa x Delta f','NumberTitle','off');

plot(Deltaf_exp, massa_exp, 'ko', 'LineWidth', 1.8);
hold on

plot(Deltaf_exp, massa_ajustada, 'b-', 'LineWidth', 1.5);

grid on
xlabel('\Deltaf (Hz)');
ylabel('Massa (mg)');
title(sprintf('Regressao linear entre massa e variacao de frequencia (R² = %.4f)',
R2));

legend('Dados experimentais', 'Ajuste linear', 'Location', 'best');

```

11) RESULTADOS NO COMMAND WINDOW

```

fprintf('\n');
fprintf('=====');
fprintf('RESULTADOS DA ANALISE DO SENSOR\n');
fprintf('=====');

fprintf('Frequencia de referencia          = %.6e Hz\n', f_ref);
fprintf('Frequencia dominante FFT              = %.6e Hz\n', f_medida);
fprintf('Amplitude maxima na FFT                = %.6e\n', amp_max);

```

```

fprintf('\n');
fprintf('Delta_f adotado           = %.6e Hz\n', Delta_f);
fprintf('Delta_m                   = %.6f mg\n', Delta_m);
fprintf('sigma_f                     = %.6e Hz\n', sigma_f);

fprintf('\n');
fprintf('Sensibilidade Sf               = %.6e mg/Hz\n', Sf);
fprintf('LOD_m                         = %.6e mg\n', LOD_m);
fprintf('LOQ_m                         = %.6e mg\n', LOQ_m);
fprintf('SNR                           = %.6f\n', SNR);
fprintf('Amplitude media maxima        = %.6e V\n', amplitude_media_maxima);
fprintf('Desvio padrao do ruido        = %.6e V\n', desvio_ruido);
fprintf('SNR2                          = %.6f\n', SNR2);
fprintf('R²                             = %.6f\n', R2);

fprintf('\n');

if LOD_m < 0.1
    fprintf('LOD_m menor que 0,1 mg: ATENDIDO\n');
else
    fprintf('LOD_m menor que 0,1 mg: NAO ATENDIDO\n');
end

if LOQ_m < 0.1
    fprintf('LOQ_m menor que 0,1 mg: ATENDIDO\n');
else
    fprintf('LOQ_m menor que 0,1 mg: NAO ATENDIDO\n');
end

if SNR < 1
    fprintf('SNR menor que 1: ATENDIDO\n');
else
    fprintf('SNR menor que 1: NAO ATENDIDO\n');
end

if SNR2 > 1
    fprintf('SNR2 maior que 1: SINAL ACIMA DO RUÍDO\n');
else
    fprintf('SNR2 maior que 1: SINAL PROXIMO OU ABAIXO DO RUÍDO\n');
end

fprintf('=====\n');

```

12) RESUMO DAS INCONSISTENCIAS

```

num_inconst = sum(idx_inconst);

perc_inconst = 100 * num_inconst / N;

fprintf('\nResumo das inconsistencias detectadas:\n');
fprintf('Pontos com inconsistencia: %d\n', num_inconst);
fprintf('Percentual do sinal: %.4f %%\n', perc_inconst);

if num_inconst > 0

    fprintf('Primeiro ponto inconsistente em t = %.12g s\n', ...
        tempo(find(idx_inconst,1,'first')));

    fprintf('Ultimo ponto inconsistente em t = %.12g s\n', ...
        tempo(find(idx_inconst,1,'last')));

```

```

else
    fprintf('Nenhuma inconsistencia relevante foi detectada pelos criterios
adotados.\n');
end

```

=====

13) ESTATISTICAS GERAIS DO SINAL

=====

```

fprintf('\nResumo estatistico do sinal original:\n');
fprintf('Media          = %.12g V\n', mean(tensao));
fprintf('Desvio padrao   = %.12g V\n', std(tensao));
fprintf('Minimo          = %.12g V\n', min(tensao));
fprintf('Maximo           = %.12g V\n', max(tensao));
fprintf('RMS global      = %.12g V\n', sqrt(mean(tensao.^2)));

fprintf('\nResumo do filtro passa-baixa:\n');
fprintf('Frequencia de corte passa-baixa = %.12g Hz\n', fc_low);

```

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO	
	EDUARDO MOREIRA BEZERRA 15/12/1986
Nacionalidade	brasileiro
Nome em citações bibliográficas:	Bezerra, Eduardo M. Bezerra, E. M.
Currículo Lattes	http://lattes.cnpq.br/2642046870824210
ORCID	https://orcid.org/0009-0004-4275-5927
outro identificador	https://www.linkedin.com/in/eduardo-moreira-bezerra-3508b750/
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
2020/2022	Tecnologia em Automação Industrial - Tecnólogo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul (IFMS), Três Lagoas - MS
2015/2019	Engenharia Mecânica - Bacharelado, Faculdades Integradas "Rui Barbosa", Andradina - SP
2007/2015	Licenciatura em Matemática - Licenciatura, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Ilha Solteira - SP.

PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	
BEZERRA, E. M.; GONÇALVES, A. C. Desenvolvimento de Sensor LCR para Detecção Online de Partículas em Óleo Lubrificante. <i>In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO E GESTÃO DE ATIVOS EXPOMAN</i>, 40., 2025, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: ABRAMAN, 2025.	
BEZERRA, E. M.; GONÇALVES, A. C. LCR Sensor for Particle Detection in Lubricating Oil: Real-Time Applications for Machinery. <i>In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING: Artificial Intelligence for a Sustainable Tomorrow</i>, 28., 2025, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: ABCM, 2025.	
BEZERRA, E. M. Monitoramento em Tempo Real de Contaminantes em Óleos Lubrificantes por Meio de um Sensor Multifuncional de Baixo Custo: Uma revisão. <i>In: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO: A Crise Climática e os Avanços Tecnológicos: Impactos para a Sustentabilidade das Organizações e Sociedade</i>, 19., 2025, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: CNEG/INOVARSE, 2025.	
PARTICIPAÇÃO EM BANCAS E ORIENTAÇÕES	
Bancas de trabalhos de conclusão	
Orientações	
PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS	
SEMINÁRIO PAULISTA DE MANUTENÇÃO, GESTÃO DE ATIVOS E LUBRIFICAÇÃO, 12., 2025, São Bernardo do Campo. (Seminário).	
CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO E GESTÃO DE ATIVOS EXPOMAN, 40., 2025, Rio de Janeiro. Desenvolvimento de Sensor LCR para Detecção Online de Partículas em Óleo Lubrificante. 2025. (Congresso).	
INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 28., 2025, Curitiba. LCR Sensor for Particle Detection in Lubricating Oil: Real-Time Applications for Machinery. 2025. (Congresso).	
INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 28., 2025, Curitiba. Mini-curso: Sustainable Manufacturing. 2025. (Congresso).	
INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 28., 2025, Curitiba. Mini-curso: Introduction to Composite Materials and Micromechanics. 2025. (Congresso).	
INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 28., 2025, Curitiba. Mini-curso: Scientific writing: expressing the objectives of theses and	

dissertations using the approach of research questions and hypotheses. 2025. (Congresso).

CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO & INOVARSE, 19., 2025, Rio de Janeiro. Monitoramento em Tempo Real de Contaminantes em Óleos Lubrificantes por Meio de um Sensor Multifuncional de Baixo Custo: Uma revisão. 2025. (Congresso).