

**UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS DE ERECHIM
ÁREA DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

MATHEUS POZZEBOM LUCAS

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DE ÓLEO EM
TEMPO REAL PARA SISTEMAS DE LUBRIFICAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ERECHIM - RS
2025**

MATHEUS POZZEBOM LUCAS

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DE ÓLEO EM
TEMPO REAL PARA SISTEMAS DE LUBRIFICAÇÃO**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica, Área de
Engenharias e Ciência da Computação da
Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.**

Orientador: Prof. Cássio Luciano Baratieri

**ERECHIM - RS
2025**

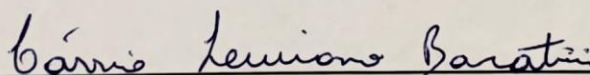
MATHEUS POZZEBOM LUCAS

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DE ÓLEO EM
TEMPO REAL PARA SISTEMAS DE LUBRIFICAÇÃO**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica, Área de
Engenharias e Ciência da Computação da
Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.**

Erechim, 05 de dezembro de 2025.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Cássio Luciano Baratieri (Orientador)

URI Erechim



Documento assinado digitalmente

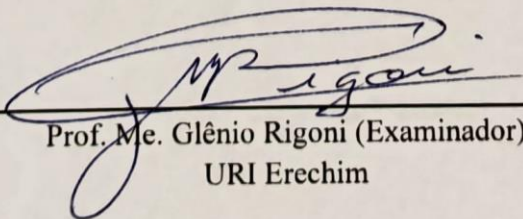
DEVIDI FELIPE ZAIONS

Data: 12/12/2025 12:57:10-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Deividi Felipe Zaions (Examinador)

URI Erechim



Prof. Me. Glênio Rigoni (Examinador)

URI Erechim

Dedico este trabalho à minha eterna inspiração, Gabriela Binder (in memoriam). Sua presença em minha vida foi fonte inesgotável de amor, inspiração e força. Apesar de sua ausência física, seu carinho, apoio e lembranças continuam a iluminar meu caminho. Este é um pequeno reflexo do que você acreditava em mim.

*Podem me tirar tudo que tenho,
só não podem me tirar as coisas boas que eu já
fiz pra quem eu amo.*

*E eu sou feliz e canto, e o universo é uma
canção, e eu vou que vou.*

*História, nossas histórias, dias de luta, dias de
glória.*

(Charlie Brown Junior)

RESUMO

Em sistemas hidráulicos com lubrificação a óleo que possuem *skids* para realizar a troca térmica entre o óleo e a água, o monitoramento de umidade, partículas ferrosas e temperatura são essenciais para garantir o perfeito funcionamento do sistema em condições normais de operação, resguardando a segurança do equipamento final que será lubrificado ou refrigerado. Tendo em vista a importância deste monitoramento, este trabalho propõe o estudo e o desenvolvimento de um sistema de monitoramento em tempo real para avaliar as condições operacionais do óleo lubrificante em sistemas hidráulicos industriais, com foco em aplicações em usinas hidrelétricas. A fim de alcançar este objetivo, são projetados e validados três sensores: um sensor capacitivo para detecção e monitoramento do teor da água no óleo, um sensor indutivo para detecção e monitoramento de partículas ferrosas e um sensor resistivo RTD PT100 a três fios para realizar a medição de temperatura. O sensor para detecção de água no óleo consiste em um sensor capacitivo de placas paralelas com quatro eletrodos. Ao inserir as amostras de água na tubulação com o sensor submerso no óleo, foi observada a variação da capacitância conforme o aumento da saturação. O sensor de detecção de partículas ferrosas consiste em duas bobinas, uma para excitação e outra para detecção. Com a presença de partículas ferrosas no centro da bobina de detecção, é possível observar uma variação na diferença de potencial medida. Para a medição de temperatura foi utilizado um sensor RTD PT100 comercial, com faixa de -70°C a 420°C . Os sensores foram integrados ao conversor analógico e por comunicação Modbus foi possível realizar a integração das medições com o sistema supervisor, desenvolvido através do software ScadaBR. Os resultados obtidos através dos testes experimentais e implementação do sistema de monitoramento remoto, demonstram a viabilidade técnica para desenvolvimento dos sensores propostos em aplicações industriais, bem como, a importância e relevância de realizar a medição constante dessas grandezas para manter o funcionamento adequado e seguro de equipamentos lubrificados a óleo.

Palavras-chave: Sistema de lubrificação; manutenção preditiva; teor de umidade; partículas ferrosas; medição de temperatura; análise do óleo.

ABSTRACT

In oil-lubricated hydraulic systems with skids for heat exchange between oil and water, monitoring humidity, ferrous particles, and temperature is essential to ensure the system's proper functioning under normal operating conditions, safeguarding the safety of the final equipment being lubricated or cooled. Given the importance of this monitoring, this work proposes the study and development of a real-time monitoring system to evaluate the operational conditions of lubricating oil in industrial hydraulic systems, focusing on applications in hydroelectric power plants. To achieve this objective, three sensors were designed and validated: a capacitive sensor for detecting and monitoring the water content in the oil, an inductive sensor for detecting and monitoring ferrous particles, and a three-wire RTD PT100 resistive sensor for temperature measurement. The sensor for detecting water in the oil consists of a parallel-plate capacitive sensor with four electrodes. By inserting water samples into the piping with the sensor submerged in the oil, the capacitance variation was observed as saturation increased. The ferrous particle detection sensor consists of two coils, one for excitation and the other for detection. With the presence of ferrous particles in the center of the detection coil, a variation in the measured potential difference can be observed. For temperature measurement, a commercial PT100 RTD sensor was used, with a range between -70°C and 420°C . The sensors were integrated into the analog converter, and Modbus communication allowed for the integration of measurements with the supervisory system, developed using the ScadaBR software. The results obtained through experimental tests and implementation of the remote monitoring system demonstrate the technical feasibility of developing the proposed sensors for industrial applications, as well as the importance and relevance of constantly measuring these quantities to maintain the perfect and safe operation of oil-lubricated equipment.

Keywords: Lubrication system; predictive maintenance; oil moisture; ferrous particles; temperature measurement; oil analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Lubrificante líquido.....	19
Figura 2 – Lubrificante pastoso.....	19
Figura 3 – Lubrificante sólido.....	20
Figura 4 – Lubrificante gasoso.....	20
Figura 5 – Comparação entre lubrificação correta e inadequada.....	21
Figura 6 – Sistema de circulação de óleo (SKID).....	22
Figura 7 – Teste de mancha em papel: uma das primeiras formas de análise de óleo.....	24
Figura 8 – Fabricante e leitor de ferrografia inicial.....	24
Figura 9 – Tabela análise de óleo laboratorial.....	25
Figura 10 – Gráfico de Pareto da quantidade de falhas de máquinas operatrizes por modo de falha.....	29
Figura 11 – Sensor de temperatura PT100.....	30
Figura 12 – Tabela de variação da resistência do PT100 de acordo com a temperatura.....	31
Figura 13 – Sensor de presença de água no óleo LubCos H2O.....	32
Figura 14 – Sensor de desgaste OPLCom FerroS.....	32
Figura 15 – Detecção de partículas finas com o sensor de desgaste OPLCom FerroS.....	33
Figura 16 – Unidade de controle de fluido FCU 1310.....	34
Figura 17 – Critérios para avaliação de óleos lubrificantes.....	34
Figura 18 – Estrutura do sistema.....	37
Figura 19 – Fluxograma das etapas de funcionamento do sistema.....	38
Figura 20 – Eletrodos moldados na parte externa da tubulação.....	39
Figura 21 – Eletrodos acondicionados no interior da tubulação.....	40
Figura 22 – Sensor DHT11 internamente.....	40
Figura 23 – RTD PT100 a três fios.....	41
Figura 24 – Circuito de ligação RTD PT100 a três fios.....	42
Figura 25 – Bobinas do sensor de partículas ferrosas.....	43
Figura 26 – Montagem das bobinas de excitação e detecção.....	44
Figura 27 – Circuito retificador e filtro passa-baixa.....	47
Figura 28 – Placa de desenvolvimento ESP32 DevKit V1.....	49
Figura 29 – Interface do software Visual Studio Code.....	50
Figura 30 – Conversor MCP4725.....	50
Figura 31 – Conversor Modbus RS-485.....	51
Figura 32 – Arquitetura da comunicação Modbus RS-485.....	52
Figura 33 – Módulo DigiRail-2A.....	52
Figura 34 – Jumper para entrada 0-5Vcc e 0-10Vcc.....	53
Figura 35 – Configurações de entradas analógicas e comunicação Modbus.....	54
Figura 36 – Definição da configuração para comunicação Modbus do CLP TPW04.....	55
Figura 37 – Configuração comunicação Modbus RS-485 sistema supervisório.....	56
Figura 38 – Configuração dos pontos de dados.....	57
Figura 39 – <i>Data points</i> provenientes da comunicação Modbus.....	57
Figura 40 – Implementação dos <i>data points</i> virtuais.....	58

Figura 41 – Script para atuação e desatuação do alarme de temperatura de óleo alta.....	58
Figura 42 – Script para troca da tela principal para tela de gráfico de temperatura.....	59
Figura 43 – Tela principal do sistema de controle e supervisão digital desenvolvido através do software ScadaBR.	60
Figura 44 – Utilização da memória não volátil para armazenar o valor do <i>offset</i>	61
Figura 45 – Subtração do valor de offset para obter valor de leitura atual.....	61
Figura 46 – Tela Diagnóstico e verificação do erro de leitura.	62
Figura 47 – Calibração da entrada do sensor de temperatura.....	62
Figura 48 – Ajuste do tipo de dados Modbus.....	63
Figura 49 – Valores de leitura da temperatura do óleo.....	63
Figura 50 – Teste no sensor capacitivo com 100% de óleo.	66
Figura 51 – Teste no sensor capacitivo com amostra contendo 70% de água.....	67
Figura 52 – Medição de água no óleo registrada no sistema supervísório.....	68
Figura 53 – Medição de temperatura com o ponto inicial em 0°C.....	72
Figura 54 – Medição de temperatura com a referência de 70°C.....	73
Figura 55 – Medição de temperatura registrada no sistema supervísório.	75
Figura 56 – Testes no sensor de detecção de partículas ferrosas.....	78
Figura 57 – Separação das partículas ferrosas.....	79
Figura 58 – Registro no sistema supervísório sem a presença de partícula ferrosa.	80
Figura 59 – Medição de partículas registrada no sistema supervísório.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diferença entre manutenção preventiva e preditiva.	28
Tabela 2 – Resposta do sensor com baixa amplitude de tensão e alta frequência.....	45
Tabela 3 – Teste de sensibilidade com tensões e frequência do sensor.	46
Tabela 4 – Comparação entre os sistemas de medição.....	67
Tabela 5 – Porcentagem determinada das amostras de referência.	69
Tabela 6 – Resultados obtidos pelo protótipo nas medições de água no óleo através do software ScadaBR	70
Tabela 7 – Erro absoluto apresentado pelo sensor nas medições de água no óleo.....	70
Tabela 8 – Erro relativo apresentado pelo sensor nas medições de água no óleo.	71
Tabela 9 – Desvio padrão apresentado a partir das leituras realizadas pelo sensor de água no óleo.	71
Tabela 10 – Comparação entre a medição do sensor apresentada no multímetro e ScadaBR.	74
Tabela 11 – Temperatura determinada através das etapas de referência.....	75
Tabela 12 – Resultados obtidos pelo sensor PT100 nas medições de temperatura através do software ScadaBR	76
Tabela 13 – Erro absoluto apresentado pelo sensor nas medições de temperatura.	77
Tabela 14 – Erro relativo apresentado pelo sensor nas medições de temperatura.	77
Tabela 15 – Desvio padrão apresentado a partir das leituras realizadas pelo sensor de temperatura.	78
Tabela 16 – Medições obtidas a partir do osciloscópio e do ScadaBR com a presença de partículas ferrosas.	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
TAN	Número de Acidez Total
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>
MRO	Manutenção, reparo e operação
AES	Espectrômetro de emissão atômica semiautomático
IoT	<i>Internet of Things</i>
FISPQ	Ficha de informações de segurança de produto químico
RTD	<i>Resistance Temperature Detector</i>
CI	Circuito Integrado
GND	<i>Ground</i>
LCR	Indutância (L), capacitância (C) e resistência
SCSD	Sistema de controle e supervisão digital
ppm	Partes por milhão
CLP	Controlador lógico programável
SCSD	Sistema de controle e supervisão digital
DAC	<i>Digital-to-analog converter</i> (conversor digital-analógico)
DDP	Diferença de potencial
CC	Corrente contínua
CA	Corrente alternada

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
x	Entrada de temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
y	Saída de resistência [Ω]
f	Função de conversão
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivos	15
1.1.1 Objetivo geral	15
1.1.2 Objetivo Específico	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Lubrificação e Função dos Óleos Lubrificantes.....	17
2.1.1 Funções dos óleos lubrificantes	17
2.1.2 Tipos de lubrificantes	18
2.1.2.1 Lubrificantes Líquidos (Óleos)	18
2.1.2.2 Lubrificantes Pastosos (Graxas).....	19
2.1.2.3 Lubrificantes Sólidos.....	19
2.1.2.4 Lubrificantes Gasosos	20
2.2 Importância da lubrificação.....	20
2.3 Sistema de circulação de óleo	21
2.4 Técnicas de monitoramento de óleo.....	22
2.4.1 Análise de óleo em laboratório	23
2.4.2 Evolução dos métodos	23
2.4.3 Métodos de análise de óleo.....	25
2.4.3.1 Avaliação físico-química do lubrificante	25
2.4.3.2 Verificação de contaminantes no óleo.....	26
2.4.3.3 Espectrometria para detecção de metais.....	26
2.4.3.4 Ferrografia e análise do desgaste.....	26
2.4.4 Manutenção preditiva x preventiva	27
2.5 Falhas em sistemas de lubrificação.....	28
2.5.1 Principais causas de falha	28
2.5.2 Efeitos da falha na operação	29
2.6 Sensores aplicados ao monitoramento de óleo.....	29
2.6.1 Sensor de temperatura PT100.....	29
2.6.2 Sensor de presença de água no óleo	31
2.6.3 Sensor de partículas ferrosas em óleo.....	32
2.7 Estudo de caso.....	33
3 METODOLOGIA.....	37
3.1 Visão geral do sistema.....	37
3.2 Sensor de água no óleo.....	38
3.2.1 Capacitância do sensor de água no óleo	40
3.3 Sensor PT100 a três fios.....	41
3.4 Sensor de partículas ferrosas	42
3.4.1 Indutância do sensor indutivo	44
3.4.2 Definição da alimentação da bobina de excitação	45
3.4.3 Circuito retificador e filtro passa-baixa	47
3.5 Circuito microcontrolado	48
3.5.1 ESP32 DevKit V1.....	48
3.5.2 Visual Studio Code.....	49
3.5.3 Conversor digital-analógico.....	49
3.6 Conversor serial Modbus RS485/232	51
3.7 Módulo de entradas analógicas universais DigiRail-2A	52
3.8 Controlador lógico programável TPW04	54

3.9 Software ScadaBR.....	55
3.10 Calibração do sensor capacitivo.....	60
3.11 Calibração do sensor de temperatura	61
3.12 Cálculo das incertezas	63
3.12.1 Erro absoluto.....	64
3.12.2 Erro relativo	64
3.12.3 Desvio padrão	64
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66
4.1 Teor de água no óleo determinada pelo sensor capacitivo	66
4.1.1 Determinação das incertezas do sensor capacitivo de água no óleo.....	69
4.2 Testes no sensor de temperatura RTD PT100 a três fios.....	72
4.2.1 Determinação das incertezas do sensor de temperatura.....	75
4.3 Sensor indutivo de detecção de partículas ferrosas.....	78
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	84
REFERÊNCIAS	85

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento e análise de sistemas lubrificadas a óleo é um procedimento muito importante para a realização de manutenção preventiva, permitindo a identificação precoce de irregularidades e a prevenção de falhas severas. Mais do que assegurar que o lubrificante esteja em condições adequadas para cumprir sua função, essa prática permite acompanhar o desgaste e o desempenho dos componentes ao longo do tempo. Ao identificar sinais iniciais de possíveis falhas, é possível agir de forma antecipada, prevenindo danos maiores, reduzindo custos com paradas não planejadas e estendendo a vida útil dos ativos industriais (ALMEIDA, 2003).

A fim de garantir que as análises sejam eficazes, as informações obtidas devem refletir com precisão as condições reais do óleo e do equipamento. Dessa forma, permite fazer diagnósticos corretos e tomar decisões apropriadas. Além de prejudicar a análise, a contaminação pode danificar os equipamentos, alterar as propriedades do lubrificante e introduzir contaminantes que afetam o desempenho (ALMEIDA, 2003).

A análise de óleo lubrificante em sistemas hidráulicos, começou de forma consideravelmente limitada, com testes realizados em laboratórios distantes do local onde as amostras eram coletadas, o que acarretava em um processo lento e de baixa praticidade. À medida que essa prática ganhou importância, cresceu também a necessidade por resultados mais rápidos e acessíveis. Enviar amostras para outro país e aguardar semanas por um relatório pelo correio tornava-se um processo muito desgastante. Isso impulsionou, a partir da década de 1980, o surgimento de laboratórios regionais que buscavam encurtar distâncias e agilizar a entrega das análises (POLEY; MURPHY, 2007).

Com o avanço da tecnologia e a redução no tamanho e peso dos sensores, surgiram novas possibilidades para a análise de óleos lubrificantes diretamente no campo, sem depender exclusivamente de laboratórios. Esse progresso abriu caminhos promissores para tornar o monitoramento mais prático e acessível. No entanto, os primeiros equipamentos desenvolvidos apresentaram diversos desafios. Problemas como baixa sensibilidade, falta de precisão e resultados pouco confiáveis acabaram limitando sua aceitação. Diversos fabricantes chegaram a desenvolver esses instrumentos, mas decidiram não seguir com a produção, considerando que os dados obtidos não se mostravam suficientemente confiáveis quando comparados aos testes laboratoriais (POLEY; MURPHY, 2007).

Poley e Murphy (2007) ainda afirmam que essas dificuldades mostraram que, embora a tecnologia estivesse avançando, ainda havia um caminho a percorrer para garantir que esses dispositivos fossem realmente úteis e eficazes no dia a dia da indústria.

A rapidez em detectar a contaminação do óleo pela água (através de um vazamento de água), bem como a existência de um sistema de monitoramento que verifique se a quantidade de partículas ferrosas no óleo está dentro dos limites recomendados, é uma ferramenta indispensável para reduzir os danos aos equipamentos e impactos econômicos na indústria devido ao tempo de indisponibilidade na produção para realizar a manutenção corretiva no equipamento.

Atualmente, há sensores disponíveis no mercado capazes de realizar essas aplicações e detecções. Entretanto, o elevado custo de aquisição limita sua viabilidade de uso. Dessa forma, motivou-se o desenvolvimento de dois sensores práticos, de fácil acesso e baixo custo, visando sua aplicação no projeto.

Em virtude disso, o presente trabalho visa expandir as opções de dados monitorados em circuitos hidráulicos, as quais auxiliarão na tomada de decisões e otimizarão os procedimentos de manutenção corretiva não planejada de uma usina hidrelétrica, por meio do desenvolvimento de um equipamento para coletar, analisar e monitorar os dados de forma imprescindível para a operação normal de sistemas hidráulicos com circulação de óleo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

- Desenvolver um sistema de monitoramento em tempo real para sistemas lubrificados a óleo, com a finalidade de avaliar e monitorar a integridade do óleo lubrificante em reservatórios, mancais, trocadores de calor e bombas de circulação utilizados em usinas de geração de energia.

1.1.2 Objetivo Específico

- Compreender o funcionamento do sistema de circulação e lubrificação a óleo como a importância da utilização de sensores para a operação normal do sistema;
- Identificar normas e parâmetros (grandezas fundamentais e derivadas) a serem monitoradas para sistemas lubrificados a óleo;
- Desenvolver um protótipo de sensor ferromagnético para indicação de partículas ferrosas;
- Desenvolver um protótipo de sensor de placas paralelas para indicação de água no óleo;

- Implementar um sensor PT100 a três fios para medição da temperatura do óleo;
- Adquirir conhecimento sobre os métodos de medição a serem utilizados;
- Realizar simulações e validar o funcionamento do sistema proposto de forma experimental.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados conceitos e estudos de autores sobre análise de óleos lubrificantes, bem como suas propriedades e características, com ênfase no modelo a ser empregado no projeto. Também será apresentada a fundamentação teórica sobre os componentes eletrônicos empregados na realização do trabalho e suas particularidades, evidenciando os diferentes tipos de sensores, suas topologias mais utilizadas e seu funcionamento. Por fim, serão apresentados estudos semelhantes previamente realizados na área, com o objetivo de fundamentar e contextualizar o trabalho desenvolvido. Dessa forma, será possível compreender melhor os tópicos abordados e situar a pesquisa no cenário atual da área de estudo.

2.1 Lubrificação e Função dos Óleos Lubrificantes

A lubrificação de máquinas e equipamentos industriais consiste na aplicação de lubrificante entre peças móveis de uma máquina, reduzindo o atrito, evitando desgaste excessivo e melhorando o desempenho e a vida útil dos equipamentos através da película de óleo que é formada (ABECOM, 2021).

2.1.1 Funções dos óleos lubrificantes

O lubrificante industrial é o elemento responsável por reduzir o atrito e desgastes entre duas superfícies por meio de substâncias como óleo, que formam uma película protetora entre as superfícies em contato. Essa camada de óleo facilita o deslizamento dos componentes, ajuda a controlar a temperatura por meio de uma troca térmica com a água onde o óleo é refrigerado, evita corrosões e contribui diretamente para o melhor desempenho e durabilidades do equipamento. Tendo em vista a importância do óleo lubrificante, é fundamental escolher lubrificantes de qualidade, acompanhar suas condições periodicamente e planejar a manutenção de forma cuidadosa, evitando contaminações do óleo (VEDAN, 2025).

De acordo com Pauli e Uliana (1997), os lubrificantes desempenham papéis fundamentais em diferentes aplicações industriais, sendo suas principais funções:

- a) Reduzir o atrito: transformam o atrito direto entre superfícies (sólido) em um atrito mais suave (fluido), diminuindo a perda de energia;

- b) Minimizar o desgaste: criam uma película entre as peças, evitando o contato direto e prolongando a vida útil dos componentes;
- c) Controlar a temperatura: absorvem o calor gerado pelo funcionamento das máquinas, como em motores ou processos de corte;
- d) Proteger contra a corrosão: impedem que substâncias agressivas, como ácidos, danifiquem as superfícies metálicas.

Equipamentos que operam continuamente por longos períodos de tempo, tendem a sofrer desgaste, corrosão e envelhecimento natural, gerando pequenas partículas que se acumulam no óleo lubrificante, comprometendo o desempenho e reduzindo o tempo de vida dos equipamentos. Uma das funções importantes do lubrificante é ajudar na remoção dessas impurezas, oriundas da operação prolongada do equipamento, mantendo o sistema limpo. Como a oxidação, ferrugem e corrosão estão atreladas ao contato do metal com a água e oxigênio, o óleo lubrificante também atua como uma barreira protetora através do filme lubrificante existente na superfície, prolongando a durabilidade do equipamento (SILVA, 2019).

2.1.2 Tipos de lubrificantes

2.1.2.1 Lubrificantes Líquidos (Óleos)

Os lubrificantes líquidos (conforme figura 1), são compostos por uma base orgânica, mineral ou sintética e aditivos. Eles são ideais para componentes que operam em alta velocidade e sob cargas elevadas, graças à sua baixa viscosidade, que reduz o atrito entre as superfícies. Os óleos orgânicos têm como base gorduras vegetais e animais, os minerais são derivados do petróleo, e os sintéticos são desenvolvidos em laboratório, oferecendo maior desempenho, porém com custo mais alto (CORDEIRO, 2022).

Figura 1 – Lubrificante líquido.



Fonte: Adaptado de ABECOM (2021).

2.1.2.2 Lubrificantes Pastosos (Graxas)

Conhecidos como graxas, combinam óleos com espessantes, como sabonetes à base de lítio (conforme observado na figura 2). São indicados quando os óleos líquidos não conseguem permanecer no local desejado. Além de reduzir atrito, aquecimento e desgaste, a graxa protege contra corrosão e atua como barreira contra contaminantes. Sua consistência intermediária entre líquido e sólido facilita a permanência nas superfícies e melhora a lubrificação em locais de difícil acesso (CORDEIRO, 2022).

Figura 2 – Lubrificante pastoso.



Fonte: Adaptado de ABECOM (2021).

2.1.2.3 Lubrificantes Sólidos

Os lubrificantes sólidos (conforme mostrado na figura 3) são aplicados em situações extremas, como altas temperaturas (acima de 500°C) ou onde há contato direto entre superfícies metálicas. São inseridos diretamente entre os componentes e incluem materiais como grafite, óxido de zinco, talco, mica e bissulfeto de molibdênio, que oferecem proteção duradoura mesmo sem a presença de líquidos (CORDEIRO, 2022).

Figura 3 – Lubrificante sólido.



Fonte: Adaptado de ABECOM (2021).

2.1.2.4 Lubrificantes Gasosos

Os lubrificantes gasosos (como pode ser visto na figura 4), são utilizados em casos especiais, quando não é possível aplicar outros tipos de lubrificante. Gases como nitrogênio e hélio oferecem baixo atrito e operam em faixas de temperatura específicas, mas possuem baixa capacidade de carga e exigem superfícies bem acabadas para garantir eficácia (CORDEIRO, 2022).

Figura 4 – Lubrificante gasoso.



Fonte: Adaptado de WD40 (2021).

2.2 Importância da lubrificação

O sistema de lubrificação desempenha um papel fundamental para a eficiência dos equipamentos industriais nos processos produtivos. Segundo Cordeiro (2022), o lubrificante atua como uma barreira entre superfícies em contato, minimizando o desgaste, prevenindo a

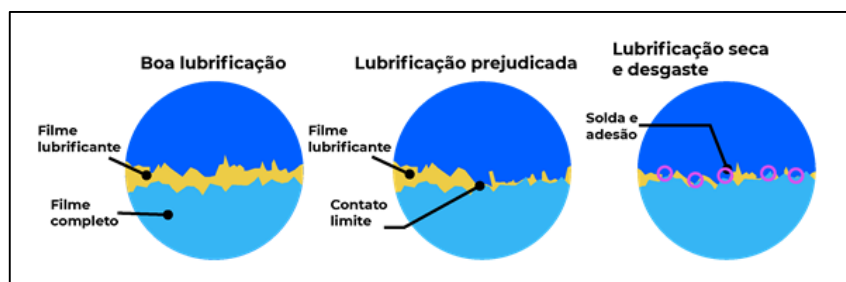
corrosão, auxiliando na limpeza e no manuseio, além de contribuir para a redução da fadiga em componentes mecânicos, entre outras funções essenciais.

A aplicação correta da lubrificação conforme apresentado na figura 5, é crucial para preservar a integridade dos componentes. De acordo com Vedan (2025), na maioria dos casos, falhas e danos prematuros em máquinas resultam da negligência com a manutenção ou da escolha inadequada do lubrificante.

Na lista apresentada por Cordeiro (2022), entre os principais benefícios de uma lubrificação adequada, destacam-se:

- a) Controle térmico: o lubrificante absorve o calor gerado pelo atrito, contribuindo para a refrigeração dos sistemas;
- b) Redução de impactos: minimiza os choques entre superfícies metálicas;
- c) Proteção anticorrosiva: cria uma barreira contra agentes corrosivos;
- d) Prevenção de acidentes: o cumprimento rigoroso dos procedimentos de lubrificação reduz riscos operacionais;
- e) Vedação eficiente: impede a contaminação do sistema e evita a perda do lubrificante;
- f) Amortecimento de choques mecânicos: dissipa a energia do impacto, especialmente em engrenagens, convertendo-a em energia fluida.

Figura 5 – Comparação entre lubrificação correta e inadequada.



Fonte: Adaptado de Vedan (2025).

2.3 Sistema de circulação de óleo

De acordo com Dey (2023), o sistema de circulação de óleo (conforme ilustrado na figura 6), também conhecido como SKID, é essencial para preservar as propriedades do óleo lubrificante e garantir seu resfriamento, por meio de troca térmica indireta com a água. Esse sistema é composto principalmente por um reservatório de óleo, bombas de circulação, válvulas, trocadores de calor, filtros e um sistema de monitoramento.

O óleo é enviado ao equipamento de forma forçada, por meio de bombas de recalque. Para que o óleo retorne ao reservatório por gravidade, o equipamento lubrificado deve estar posicionado em um nível superior ao reservatório. Ao sair do reservatório, o óleo passa por um processo de resfriamento nos trocadores de calor (geralmente do tipo placas) que contam com entradas e saídas para água fria e quente, além da entrada de óleo quente e saída de óleo resfriado (DEY, 2023).

No entanto, é fundamental monitorar o teor de água no óleo, uma vez que pode haver contaminação causada por vazamentos ou falhas nos trocadores de calor, como desprendimento ou obstrução das placas de passagem de água (DEY, 2023).

Figura 6 – Sistema de circulação de óleo (SKID).



Fonte: Adaptado de Dey (2023).

2.4 Técnicas de monitoramento de óleo

A análise de lubrificantes é uma técnica de manutenção preditiva que permite avaliar o estado do óleo e identificar desgastes, contaminações e alterações nas propriedades do óleo antes que ocorram falhas. De acordo com NORIA (2023), a análise inicialmente baseada em inspeções visuais, evoluiu com o uso de métodos como espectrometria, ferrografia e análises físico-químicas, que detectam partículas metálicas e alterações químicas do lubrificante. Atualmente, com o apoio de sensores o monitoramento de óleo tornou-se contínuo e preciso, permitindo prever falhas, reduzir custos e aumentar a confiabilidade dos sistemas.

2.4.1 Análise de óleo em laboratório

A análise de lubrificantes é uma técnica de manutenção preditiva que fornece informações sobre o estado do lubrificante e do equipamento, permitindo realizar o monitoramento de alterações associadas ao desgaste de componentes lubrificadas, bem como a identificação de mudanças nas propriedades do lubrificante (INEGI).

Por meio dessa análise, é possível:

- a) Avaliar o nível de desgaste dos componentes e a contaminação do lubrificante;
- b) Identificar o tipo de desgaste que está ocorrendo no equipamento;
- c) Apontar quais componentes da máquina estão em processo de deterioração;
- d) Verificar as condições do lubrificante e da máquina;
- e) Detectar possíveis falhas em desenvolvimento.

A análise de óleo permite identificar o estado do lubrificante e através de uma análise mais detalhada, é possível obter conclusões sobre o estado do equipamento.

“Na análise do óleo, podemos dizer que o desgaste e a contaminação presentes no óleo refletem a saúde do equipamento, enquanto a qualidade do lubrificante pode ser vista em suas propriedades químicas e físicas.” (ALMEIDA, 2003).

Se o foco for avaliar as condições do equipamento, é essencial observar a presença de partículas metálicas, teor de água e outros contaminantes. Geralmente os laboratórios de análises seguem procedimentos padronizados, com conjunto de testes considerados adequados para cada tipo de equipamento em análise. Entretanto, é de responsabilidade do especialista em lubrificação reconhecer parâmetros específicos que sejam relevantes para o equipamento analisado e que devem ser incluídos na avaliação (ALMEIDA, 2003).

2.4.2 Evolução dos métodos

A análise de óleo surgiu como uma prática simples de inspeção visual e física de lubrificantes, limitada à observação de aspectos como cor, viscosidade, temperatura e pressão (conforme observado na figura 7). Com o tempo, especialmente a partir da segunda metade do século XX, essa prática evoluiu significativamente com o desenvolvimento de tecnologias capazes de identificar o estado real dos lubrificantes e das máquinas (NORIA, 2023).

Figura 7 – Teste de mancha em papel: uma das primeiras formas de análise de óleo.

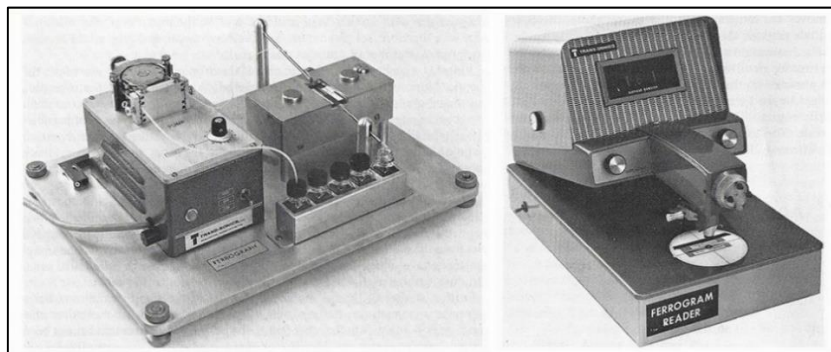


Fonte: Adaptado de Noria (2023).

Entre os avanços mais importantes está o uso da espectroscopia elementar, iniciado pela indústria ferroviária americana entre 1946 e 1948, que passou a detectar metais de desgaste no óleo, como alumínio, ferro, cobre e chumbo. Essa prática foi adotada com o objetivo de prevenir acidentes e minimizar falhas mecânicas (NORIA, 2023).

Nos anos seguintes surgiram tecnologias mais rápidas e precisas, como o espectrômetro de emissão atômica semiautomático (AES) e a ferrografia (conforme figura 8), esta última sendo essencial para detectar partículas minúsculas e antecipar falhas mecânicas. A espectroscopia de infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) também foi incorporada, fornecendo informações de certos contaminantes, não apenas metais de desgaste, permitindo análises químicas detalhadas do óleo, como oxidação, contaminações por água e degradação de aditivos (NORIA, 2023).

Figura 8 – Fabricante e leitor de ferrografia inicial.



Fonte: Adaptado de Noria (2023).

A partir de 1990, novas tecnologias digitais, sensores e softwares automatizados tornaram a análise de óleo mais acessível e eficiente. Atualmente, com o apoio da inteligência

artificial e da Internet das Coisas (IoT), essa prática é essencial para a manutenção preditiva, ajudando empresas a reduzirem falhas, otimizarem custos e aumentarem a confiabilidade dos ativos (NORIA, 2023).

2.4.3 Métodos de análise de óleo

Os métodos utilizados na análise de óleo industrial são fundamentais para a gestão eficaz da manutenção, pois permitem identificar precocemente falhas potenciais e investigar suas causas. A seguir, serão abordadas técnicas de como realizar a análise de óleo lubrificante e detectar eventuais problemas.

2.4.3.1 Avaliação físico-química do lubrificante

De acordo com Abecom (2024), a análise físico-química (conforme apresentado na figura 9) possibilita verificar o estado do óleo. Essas informações são essenciais para entender a qualidade do fluido e seu impacto no desempenho do equipamento, medindo parâmetros importantes como:

- a) Densidade;
- b) Índice de viscosidade;
- c) TAN (Número de Acidez Total);
- d) Presença de fuligem;
- e) Contaminação por água;
- f) Odor.

Figura 9 – Tabela análise de óleo laboratorial.

Ensaio (Unidade)	Método	ESPECIFICAÇÃO	ATENÇÃO	CRÍTICO	29/04/23	27/03/23	31/01/23	27/11/22
PROPRIEDADE FÍSICO QUÍMICA								
Viscosidade Cinemática a 40 °C (cSt)	M.A. 10	61,2 a 74,8	N/A	< 61,2 ou >74,8	62,89	63,28	62,89	66,86
Água (Crepitação)	NBR 16358	AUSENTE	N/A	PRESENTE	Presente	Presente	Ausente	Presente
Água/Destilação (%)*	NBR 14236	< 0,02	0,02 a 0,029	> 0,03	0,05	0,40	N/A	0,90
Água Karl Fischer (ppm)	NBR 11348	< 200	200 a 299	> 300	541	4018	107	9076
T.A.N. (mg KOH/g)	M.A. 07	< 2,00	N/A	> 2,01	0,40	0,48	0,28	0,32
Aparência	M.A. 13	LÍMPIDO	RESÍDUOS SÓLIDOS	TURVO	Res. Sólidos	Turvo	Límpido	Turvo
Odor	M.A. 14	CARACT.	ANÔNIA	N/A	Caract.	Caract.	Caract.	Caract.
Cor (Comparativo)	NBR 14483	≤ 8	N/A	TURVO	Turvo	Turvo	3,50	Turvo

Fonte: Adaptado Noria (2023).

2.4.3.2 Verificação de contaminantes no óleo

Esse processo tem como objetivo identificar partículas estranhas presentes no óleo lubrificante, que podem surgir por desgaste mecânico, reações químicas ou influência de agentes externos (ABECOM, 2024).

A contaminação do óleo lubrificante pode ocorrer devido ao desgaste dos componentes do equipamento, à entrada de substâncias externas ou ainda por reações químicas do próprio lubrificante ao longo do tempo (ARAÚJO, et. al. 2019).

Segundo Abecom (2024), a análise busca detectar elementos como água e outras impurezas que possam comprometer a performance do sistema, assegurando a proteção do fluido e o bom funcionamento dos equipamentos.

2.4.3.3 Espectrometria para detecção de metais

Por meio da espectrometria, é possível identificar os elementos químicos presentes na amostra de óleo, especialmente aqueles relacionados ao desgaste de componentes, como ferro, cobre, cromo, chumbo, níquel e alumínio. Segundo Abecom (2024), a presença desses metais indica possíveis desgastes internos, auxiliando na prevenção de falhas mecânicas.

A análise pode ser realizada por meio de espectrometria de emissão óptica ou absorção atômica, sendo que esses métodos permitem identificar todos os elementos presentes na amostra do óleo lubrificante. Essa técnica também é capaz de avaliar os aditivos presentes no óleo, fornecendo informações valiosas sobre o estado do lubrificante e possíveis sinais de falhas nos equipamentos (ARAÚJO, et al 2019).

2.4.3.4 Ferrografia e análise do desgaste

A ferrografia é utilizada para identificar, por meio de análise microscópica, as partículas metálicas de desgaste no óleo ou lubrificante, ajudando a identificar a intensidade e a origem do desgaste em peças móveis (ABECOM, 2024).

De acordo com Araújo e outros (2019), os resultados podem ser obtidos através de exames analíticos e quantitativos. O exame analítico permite observar visualmente as partículas, possibilitando a identificação dos tipos de desgastes presentes na amostra. Por outro lado, o exame quantitativo permite mensurar a quantidade e o tamanho das partículas, fornecendo dados importantes sobre a severidade do desgaste nos componentes em análise.

2.4.4 Manutenção preditiva x preventiva

A manutenção preventiva baseia-se em ações programadas, realizadas em intervalos regulares de tempo ou ciclos de operação, com o objetivo de evitar falhas. Ela não depende necessariamente do estado real do equipamento, mas sim de estimativas e recomendações do fabricante (ABNT NBR 5462/1994, 1994, p. 7).

O principal desafio da manutenção preventiva é que ela não leva em consideração o real estado do equipamento, ou seja, não leva em consideração se o equipamento está com falha iminente ou não. De acordo com Infraspark (2024), isso pode resultar em manutenções desnecessárias, gerando desperdício de tempo e aumento de custos operacionais.

- a) Até 50% dos custos com manutenção podem ser considerados desperdício, onde não há a real necessidade de intervenção;
- b) Cerca de 30% das ações preventivas são realizadas com mais frequência do que o necessário;
- c) Apenas 18% das falhas estão diretamente relacionadas à idade dos componentes, o que reforça a importância de monitorar a condição real dos equipamentos.

Por outro lado, o monitoramento preditivo ou manutenção preditiva, utiliza dados reais da operação dos sistemas, como temperatura, vibração, contaminação e análises de óleo, para identificar sinais precoces de desgaste ou falha iminente. Esse método permite agir de forma mais precisa, intervindo apenas quando necessário, o que pode aumentar a vida útil dos componentes e reduzir a manutenção corretiva (ABNT NBR 5462/1994, 1994, p. 7). Conforme a tabela 1, é possível comparar as diferenças entre a manutenção preventiva e preditiva.

De acordo com Infraspark (2024), a proposta do monitoramento de condição é antecipar falhas antes que elas ocorram, permitindo uma gestão mais eficiente dos equipamentos. Isso traz benefícios significativos, como:

- a) Redução de paradas inesperadas;
- b) Eliminação de manutenções desnecessárias;
- c) Diminuição de custos com materiais e estoque MRO;
- d) Prolongamento da vida útil dos equipamentos;
- e) Monitoramento contínuo, resultando em menor tempo médio de reparo e maior controle sobre a eficácia das intervenções realizadas.

Tabela 1 – Diferença entre manutenção preventiva e preditiva.

PREVENTIVA	PREDITIVA
Baseada em tempo ou número de ciclos de uso do equipamento.	Baseada na performance do equipamento.
A manutenção pode acontecer antes dela ser realmente necessária.	A manutenção só ocorre quando há sinais de falha iminente.
Não realiza o monitoramento constante dos equipamentos.	Realiza monitoramento constante dos equipamentos.
Menor investimento inicial em tecnologia de monitoramento e treinamento de pessoa. Porém, maior custo operacional.	Maior investimento inicial. Contudo, tem maior economia de recursos e tempo no longo prazo, com alto retorno de investimento.

Fonte: Adaptado de Abecom (2022).

2.5 Falhas em sistemas de lubrificação

Para Silva (2015), as falhas relacionadas à lubrificação de sistemas hidráulicos, estão diretamente associadas com a contaminação de óleos lubrificantes, acarretando na indisponibilidade e interrupção da produção. Dentre alguns problemas conexos à falha de lubrificação, incluem os desgastes mecânicos por abrasão, fadiga e falha no sistema de bombas, responsáveis pela deterioração da superfície que comprometem o sistema de lubrificação.

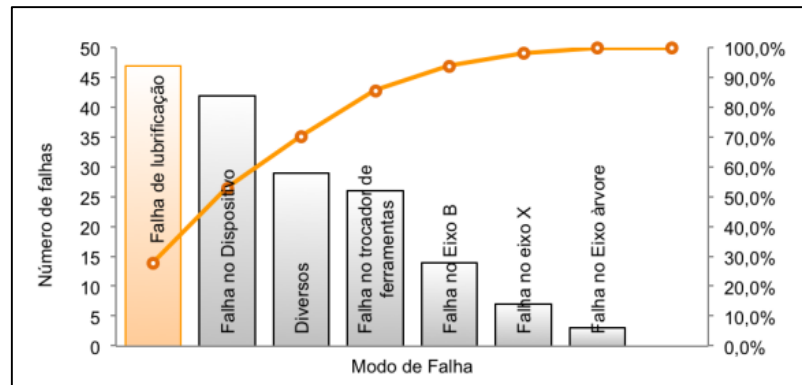
Segundo Almeida (2003), uma das maneiras mais fáceis e rentáveis para evitar falhas em equipamentos hidráulicos, é através da realização de inspeções periódicas no sistema de lubrificação da máquina, convertendo essa prática como sendo o principal fator para obter a melhor lubrificação e desempenho.

2.5.1 Principais causas de falha

Dentre as principais falhas nos sistemas de lubrificação, é possível citar: a contaminação do óleo lubrificante por partículas sólidas ou umidade, elevação de temperatura, falha no sistema de bombas e falha atribuída à inexistência de monitoramento do sistema.

Conforme gráfico de Pareto (figura 10), pode-se observar que a falha na lubrificação em máquinas rotativas, é um dos tipos de falhas mais recorrentes. De acordo com Mendes (2014), a ausência de lubrificação adequada em sistemas deslizantes (mancais) contribui indiretamente para o aumento da fadiga mecânica do equipamento, ao aumentar o atrito e provocar desgaste superficial, favorecendo ao desgaste e ao surgimento de trincas no material.

Figura 10 – Gráfico de Pareto da quantidade de falhas de máquinas operatrizes por modo de falha.



Fonte: Adaptado de Machado et. al. (2013).

2.5.2 Efeitos da falha na operação

Nas aplicações práticas, o contato entre superfícies metálicas em deslizamento ocorre, em sua maioria, na presença de substâncias lubrificantes, através do filme de óleo entre os componentes. Entretanto, quando ocorrem situações em que o fornecimento do lubrificante falha ou sofre alterações em suas propriedades, tal como a contaminação do lubrificante ou a elevação de temperatura devido à falta de troca térmica, ocorre o superaquecimento das sapatas do mancal (MENDES, 2014).

2.6 Sensores aplicados ao monitoramento de óleo

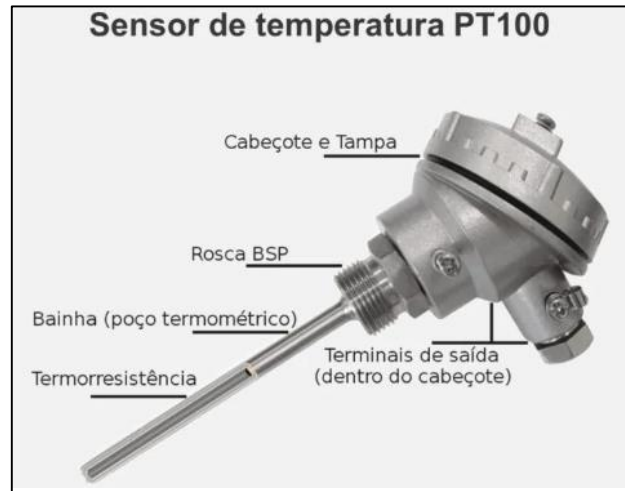
A constante busca por soluções mais eficientes nos tradicionais laboratórios de análise, aliada à crescente concorrência no mercado e a utilização de sensores para manutenção preditiva em plantas industriais, tem incentivado as marcas a inovarem em seus produtos. Esse cenário tem impulsionado o desenvolvimento de novos equipamentos para análise e monitoramento de óleos, os quais serão apresentados a seguir.

2.6.1 Sensor de temperatura PT100

A figura 11 apresenta um detector de temperatura por resistência de platina, conhecido como RTD PT100, é um sensor passivo que possui uma resistência de 100 ohms a 0°C, o que justifica sua denominação PT100. A faixa de medição de temperatura dos sensores PT100 podem ser medidas entre -200°C a +850°C. Esse tipo de sensor altera seu valor de resistência

conforme a temperatura varia, seguindo uma curva positiva, ou seja, a resistência aumenta à medida que a temperatura se eleva (RADETIÉ; KAGADEJEV; MILIVOJEVIĆ, 2015, p. 345).

Figura 11 – Sensor de temperatura PT100.



Fonte: Adaptado de Costa (2024).

De acordo com Radetié, Kagadejev e Milivojević (2015), o funcionamento do sensor, também chamado de função de transferência, representa a relação entre o valor físico medido e a correspondente saída elétrica. Essa relação pode ser descrita pela equação (1) em que x é o valor de entrada (temperatura), y é a saída elétrica (variação de resistência), e $f(x)$ é a função de conversão entre eles.

$$y = f(x) \quad (1)$$

Para facilitar o uso, é comum consultar uma tabela de conversão, que relaciona os valores de resistência com as temperaturas correspondentes. Por exemplo, se o sensor indicar 118,63 ohms, isso significa que ele está a 48°C, conforme figura 12.

Figura 12 – Tabela de variação da resistência do PT100 de acordo com a temperatura.

Tabela de variação da resistência do Pt100 com relação à temperatura (°C)											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
-50	80,31	79,91	79,51	79,11	78,72	78,32	77,92	77,52	77,12	76,73	-50
-40	84,27	83,87	83,48	83,08	82,69	82,29	81,89	81,5	81,1	80,7	-40
-30	88,22	87,83	87,43	87,04	86,64	86,25	85,85	85,46	85,06	84,67	-30
-20	92,16	91,77	91,37	90,98	90,59	90,19	89,8	89,4	89,01	88,62	-20
-10	96,09	95,69	95,3	94,91	94,52	94,12	93,73	93,34	92,95	92,55	-10
0	100	99,61	99,22	98,83	98,44	98,04	97,65	97,26	96,87	96,48	0
0	100	100,39	100,78	101,17	101,56	101,95	102,34	102,73	103,12	103,51	0
10	103,9	104,29	104,68	105,07	105,46	105,85	106,24	106,63	107,02	107,4	10
20	107,79	108,18	108,57	108,96	109,35	109,73	110,12	110,51	110,9	111,29	20
30	111,67	112,06	112,45	112,83	113,22	113,61	114	114,38	114,77	115,15	30
40	115,54	115,93	116,31	116,7	117,08	117,47	117,86	118,24	118,63	119,01	40
50	119,4	119,78	120,17	120,55	120,94	121,32	121,71	122,09	122,47	122,86	50
60	123,24	123,63	124,01	124,39	124,78	125,16	125,54	125,93	126,31	126,69	60
70	127,08	127,46	127,84	128,22	128,61	128,99	129,37	129,75	130,13	130,52	70
80	130,9	131,28	131,66	132,04	132,42	132,8	133,18	133,57	133,95	134,33	80
90	134,71	135,09	135,47	135,85	136,23	136,61	136,99	137,37	137,75	138,13	90
100	138,51	138,88	139,26	139,64	140,02	140,4	140,78	141,16	141,54	141,91	100
110	142,29	142,67	143,05	143,43	143,8	144,18	144,56	144,94	145,31	145,69	110
120	146,07	146,44	146,82	147,2	147,57	147,95	148,33	148,7	149,08	149,46	120
130	149,83	150,21	150,58	150,96	151,33	151,71	152,08	152,46	152,83	153,21	130
140	153,58	153,96	154,33	154,71	155,08	155,46	155,83	156,2	156,58	156,95	140
150	157,33	157,7	158,07	158,45	158,82	159,19	159,56	159,94	160,31	160,68	150
160	161,05	161,43	161,8	162,17	162,54	162,91	163,29	163,66	164,03	164,4	160
170	164,77	165,14	165,51	165,89	166,26	166,63	167	167,37	167,74	168,11	170
180	168,48	168,85	169,22	169,59	169,96	170,33	170,7	171,07	171,43	171,8	180
190	172,17	172,54	172,91	173,28	173,65	174,02	174,38	174,75	175,12	175,49	190
200	175,86	176,22	176,59	176,96	177,33	177,69	178,06	178,43	178,79	179,16	200

Fonte: Adaptado de Siqueira (2022).

2.6.2 Sensor de presença de água no óleo

Segundo ARGO-HYTOS, o LubCos H2O apresentado na figura 13 é um sensor que indica o nível de saturação de água no óleo, independentemente do tipo de óleo ou da temperatura. Ele permite o monitoramento em tempo real e ajuda a evitar falhas, emitindo alertas sempre que os limites forem ultrapassados. Esse sensor mede a umidade relativa do óleo, o que permite saber diretamente o grau de saturação de água:

- a) 0%: óleo completamente seco;
- b) 100%: o óleo está totalmente saturado e não consegue mais dissolver água — qualquer excesso se torna água livre.

Diferente das análises de laboratório, que medem a quantidade exata de água em ppm (partes por milhão), a umidade relativa mostra se há risco imediato de formação de água livre, sem a necessidade de saber previamente o tipo de óleo ou seu limite de saturação (ARGO-HYTOS 2020).

Figura 13 – Sensor de presença de água no óleo LubCos H2O.

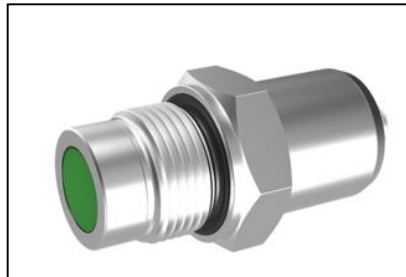


Fonte: Adaptado de ARGO-HYTOS (2023).

2.6.3 Sensor de partículas ferrosas em óleo

Segundo ARGO-HYTOS (2023), este sensor é responsável por monitorar o desgaste de componentes mecânicos, identificando a presença de partículas ferromagnéticas que circulam no óleo lubrificante (conforme apresentado na figura 14).

Figura 14 – Sensor de desgaste OPCOM FerroS.



Fonte: Adaptado de ARGO-HYTOS (2023).

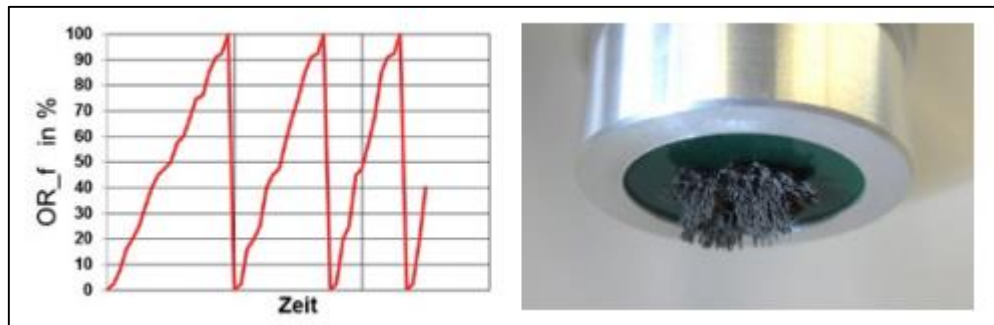
Essas partículas ficam presas em um ímã permanente localizado na cabeça do sensor. À medida que se acumulam, o sensor registra a quantidade de material por meio de um princípio de medição indutivo, ou seja, detecta variações no campo magnético geradas pelas partículas metálicas. O sensor também possui interfaces digitais e analógicas, permitindo que os dados sejam transmitidos de forma contínua para sistemas de monitoramento (ARGO-HYTOS 2023).

Entre suas principais funcionalidades, destacam-se:

- a) Capacidade de distinguir partículas pequenas (micrométricas) e grandes (milimétricas);
- b) Leitura da quantidade de partículas acumuladas, exibida como um valor percentual de 0 a 100%;
- c) Sistema de limpeza automática, que desativa temporariamente o ímã para liberar as partículas acumuladas e “zerar” a leitura.

No exemplo da figura 15 é possível observar a leitura de partículas de desgastes (eixo 'y') em comparação com as horas (eixo 'x'). Conforme a presença de partículas vai se acumulando no sensor, ao chegar em 100% da medição, ocorre a limpeza automática do mesmo, liberando as partículas que estavam atraídas por seu ímã permanente.

Figura 15 – Detecção de partículas finas com o sensor de desgaste OPCom FerroS.



Fonte: Adaptado de ARGO-HYTOS (2023).

2.7 Estudo de caso

O protótipo em estudo deverá melhorar e contribuir para a análise de óleo de forma preditiva em sistema de lubrificação, com foco em sistemas de circulação de óleo para mancais de uma usina hidrelétrica, localizada entre os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, servindo como complemento as atividades previamente executadas, com o intuito de reduzir intervenções indevidas, acompanhar o desgaste precoce de equipamentos e melhorar o processo de análise e monitoramento de óleo.

Atualmente são realizadas coletas de óleo uma vez por ano e encaminhada a amostra para análise laboratorial. As análises a serem realizadas durante o programa periódico contemplam os seguintes ensaios listados abaixo:

- a) Análise físico-químico de óleos lubrificantes:
 - a. Viscosidade a 40°C cST – ASTM D-445;
 - b. Viscosidade a 100°C cST – ASTM D-445;
 - c. Índice de Viscosidade – NBR 14358;
 - d. Índice de acidez (TAN - Total Acid Number) ASTM D-974;
 - e. Teor de água por Karl Fischer – ASTM D6304;
 - f. Espuma (sequência I) - ASTM D-892;
- b) Ferrografia analítica – ASTM D7690;
- c) Contagem de partículas óleo lubrificantes conforme Norma ISO-4406;

d) Análise por Espectrometria de absorção atômica ASTM D-5185 ou ASTM D-6595.

Semestralmente são realizadas coletas de amostras para análise de partículas pela equipe local, com a utilização do equipamento Fluid Control Unit FCU (unidade de controle de fluido) modelo FCU1310 da Hydac (conforme figura 16), sendo realizada análise da contaminação de partículas sólidas, temperatura e saturação da água.

Figura 16 – Unidade de controle de fluido FCU 1310.



Fonte: Adaptado de HYDAC (2025).

Na figura 17 estão especificados os critérios para avaliação, onde cita pontualmente quais aspectos principais devem ser avaliados para representar a qualidade do óleo como um todo. Além destes, são avaliados diversos fatores de acordo com a necessidade de cada ponto a ser analisado.

Figura 17 – Critérios para avaliação de óleos lubrificantes.

Item	Norma	Critérios de Avaliação		
		Bom	Anormal	Crítico
Viscosidade a 40°C (cST)	ISO 3448			
• ISO VG32		30,40 - 33,60	28,80 - 35,50	< 28,80 ou > 35,50
• ISO VG 46		43,70 - 48,30	41,40 - 50,60	< 41,40 ou > 50,60
• ISO VG 68		64,60 - 71,40	61,20 - 74,80	< 61,20 ou > 74,80
Água	D-1744	<400	400 - 499	≥500
Número de acizer	ASTM D-974	Utilizado somente como efeito comparativo entre as amostras		
Sequência de espuma I	ASTM D-892	Utilizado somente como efeito comparativo entre as amostras		
Espectrometria	ASTM D-5185	Utilizado somente como efeito comparativo entre as amostras		
Contagem de Partículas				
• Mancais de deslizamento	ISO 4406	Até 19/16/13	≥20/17/14	≥21/18/15
• Regulador de Velocidade	ISO 4406	Até 17/14/12	≥18/15/13	≥19/16/14
Umidade em Saturação (análises semestrais com maleta FCU 1000)		Até 59%	≥60%	≥80%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Caso sejam identificados resultados divergentes dos valores de referência, deverá ser realizada uma nova coleta e análise do óleo, seguida da comparação com o histórico e com as tendências registradas. Em seguida, deve-se identificar o tipo de anomalia observada, como aumento da concentração de água, incremento de partículas metálicas, elevação da acidez ou oxidação, ou presença de outros contaminantes. A partir dessa avaliação, devem ser executadas as ações corretivas necessárias, tais como filtragem do óleo lubrificante, substituição do fluido, realização de manutenção corretiva e limpeza dos componentes apontados ou comprovadamente responsáveis pela contaminação. Além disso, recomenda-se intensificar o acompanhamento da condição do óleo, com coletas e análises realizadas em intervalos menores, como mensalmente ou trimestralmente.

Adicionalmente os sistemas possuem um monitoramento contínuo de temperatura e porcentagem de água no óleo, sendo realizado o monitoramento através de um sistema de controle e supervisão digital (SCSD). Entretanto, nem todos os sistemas possuem um acompanhamento analógico para as supervisões mencionadas, sendo realizado o acompanhamento somente através de alarmes quando o sistema em si ultrapassa os limites de operação atuais, desta forma, não há possibilidade de realizar um acompanhamento gradativo para identificar possíveis falhas antecipadamente.

A planta conta com os seguintes sistemas de circulação de óleo:

- a) 3 Sistemas de circulação de óleo para o Mancal de Escora (um para cada unidade geradora)

Óleo utilizado: Shell Turbo T 68;

Quantidade de óleo: 11000 litros;

Temperatura normal de operação (operando como Gerador Síncrono): 40°C;

Água no óleo em operação: 148 ppm;

Contagem de partículas observadas na última análise: 18/14/11

- b) 3 Sistemas de circulação de óleo para o Mancal Guia da Turbina (um para cada unidade geradora):

Óleo utilizado: Shell Turbo T 68

Quantidade de óleo: 4000 litros;

Temperatura normal de operação (operando como Gerador Síncrono): 40,1°C;

Água no óleo em operação: 136 ppm;

Contagem de partículas observadas na última análise: 16/15/12

c) 3 Sistemas de circulação de óleo para o Mancal Guia do Gerador (um para cada unidade geradora):

Óleo utilizado: Shell Turbo T 68;

Quantidade de óleo: 4000 litros;

Temperatura normal de operação (operando como Gerador Síncrono): 41°C;

Água no óleo em operação: 179 ppm;

Contagem de partículas observadas na última análise: 18/16/12

d) 3 Sistemas de circulação de óleo para o Regulador de Velocidade Hidráulico (um para cada unidade geradora):

Óleo utilizado: Shell Turbo T 68;

Quantidade de óleo: 14000 litros;

Temperatura normal de operação: não é realizado o acompanhamento de temperatura;

Água no óleo em operação: 115 ppm;

Contagem de partículas observadas na última análise: 17/15/11

3 METODOLOGIA

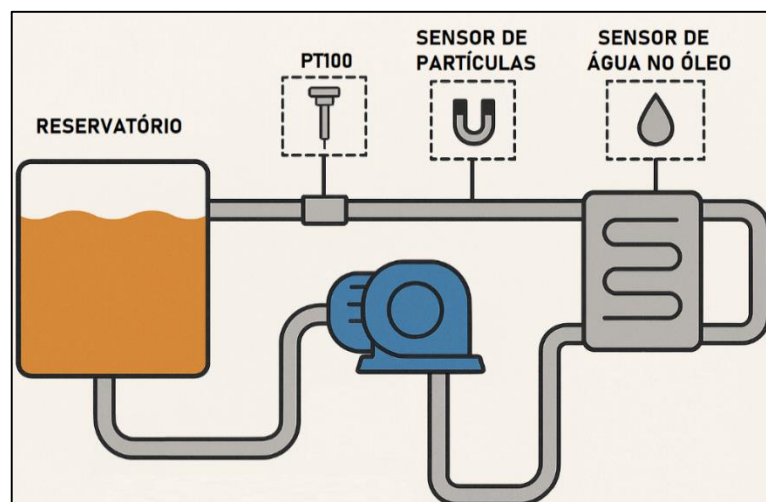
Neste capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos adotados no trabalho, abrangendo as especificações do projeto, os equipamentos utilizados no desenvolvimento e na calibração do protótipo, bem como a funcionalidade e as características dos componentes que o compõem.

3.1 Visão geral do sistema

O sistema físico proposto neste trabalho está resumido/representado na figura 18. Com a finalidade de monitorar continuamente a presença do teor de água no óleo, por meio da alteração de capacitância de um capacitor de placas paralelas com eletrodos o qual sofre interferência devido às propriedades característica do óleo e da água presente entre as placas.

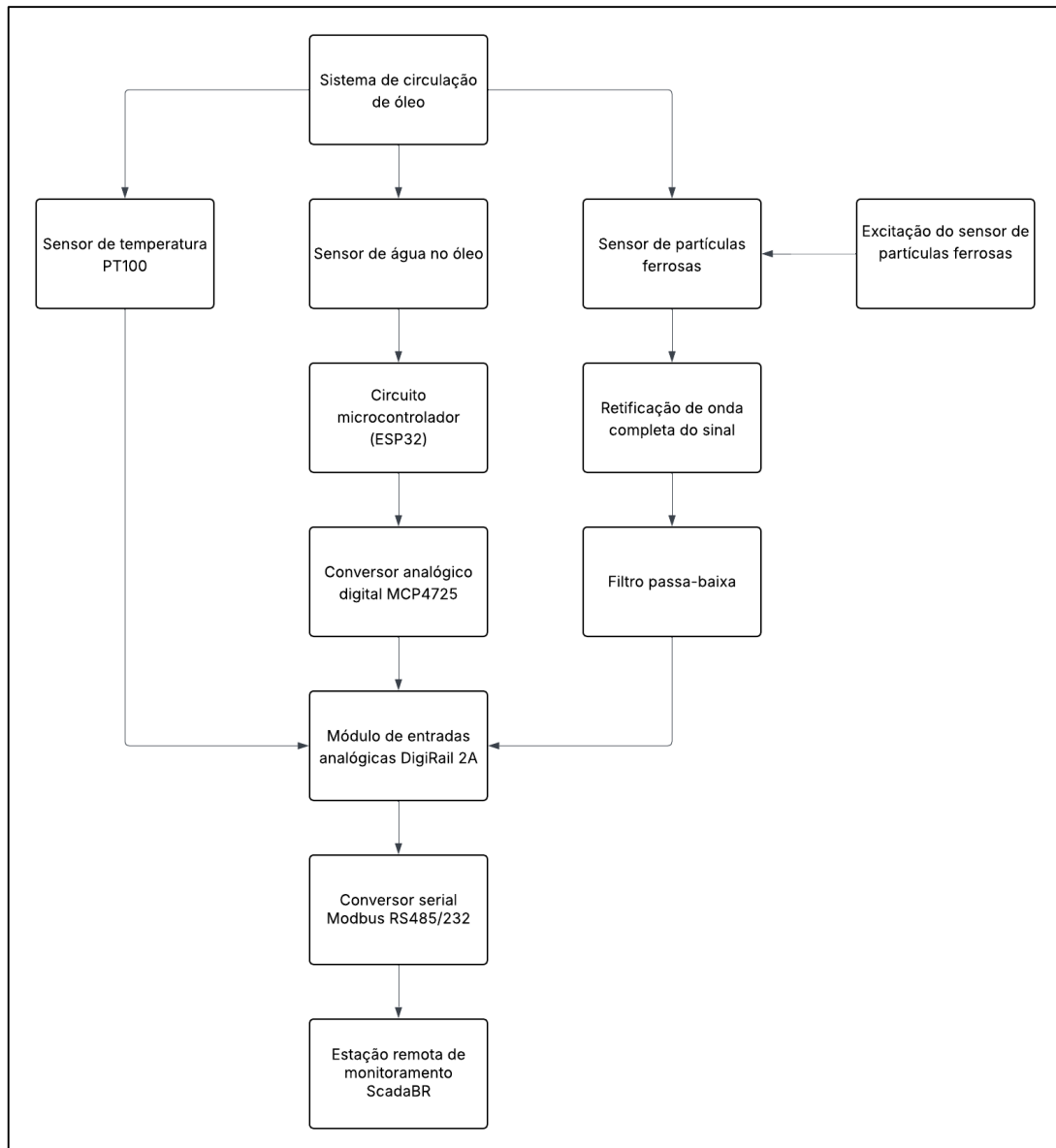
O sistema conta também com um sensor de temperatura PT100 a três fios, com o intuito de monitorar continuamente a temperatura de elevação do óleo. E por fim, está em estudo e desenvolvimento um sensor de partículas ferrosas, que através da alteração do campo magnético presente no sensor, ocorre a variação da tensão ao aproximar uma partícula ferrosa. A figura 19 apresenta o fluxograma 1, contendo as etapas do processo do sistema.

Figura 18 – Estrutura do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 – Fluxograma das etapas de funcionamento do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Sensor de água no óleo

O sensor realiza a detecção da presença da água no óleo por meio de um sensor capacitivo composto por placas de cobre, que atuam como elementos de transmissão e recepção do sinal elétrico proveniente do microcontrolador interno ao DHT11.

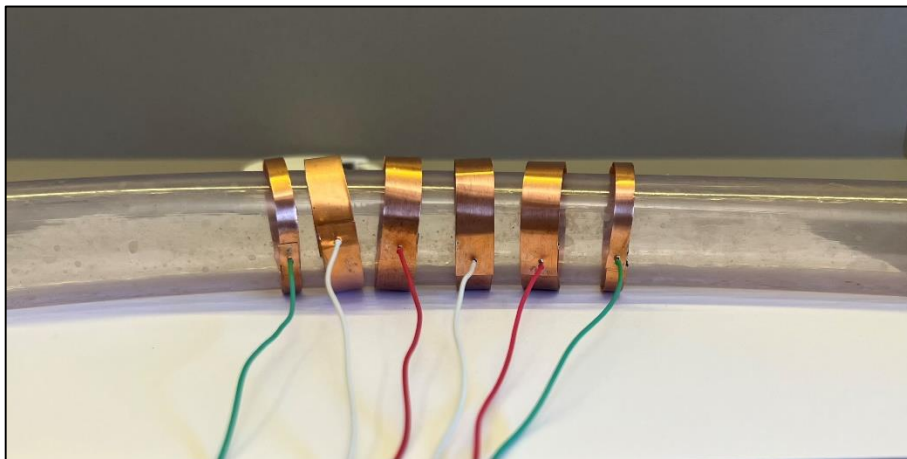
À medida que a quantidade de água na tubulação se altera, ocorre uma variação proporcional na permissividade elétrica do dielétrico, resultando em uma alteração da capacitância entre as placas.

Essa variação é processada e convertida em um sinal digital por meio do circuito interno do microcontrolador, que calcula e transmite o valor correspondente a quantidade de água presente no óleo no circuito hidráulico. À medida que o valor da capacitância aumenta, tem-se o indicativo de que o óleo foi contaminado pela água, perdendo suas características físico-químicas e propriedades de lubrificação.

O sensor desenvolvido consiste em um capacitor com quatro eletrodos, sendo composto por dois eletrodos para transmissão (TX) e dois eletrodos para recepção (RX). Os eletrodos são montados sobre uma placa de cobre flexível com 99,9% de pureza, com comprimento de 125mm, largura de 10mm e distância de 5mm entre os mesmos. A figura 20 apresenta a placa flexível com os eletrodos dispostos em formato circular na parte externa da tubulação, permitindo a moldagem adequada dos eletrodos ao seu contorno.

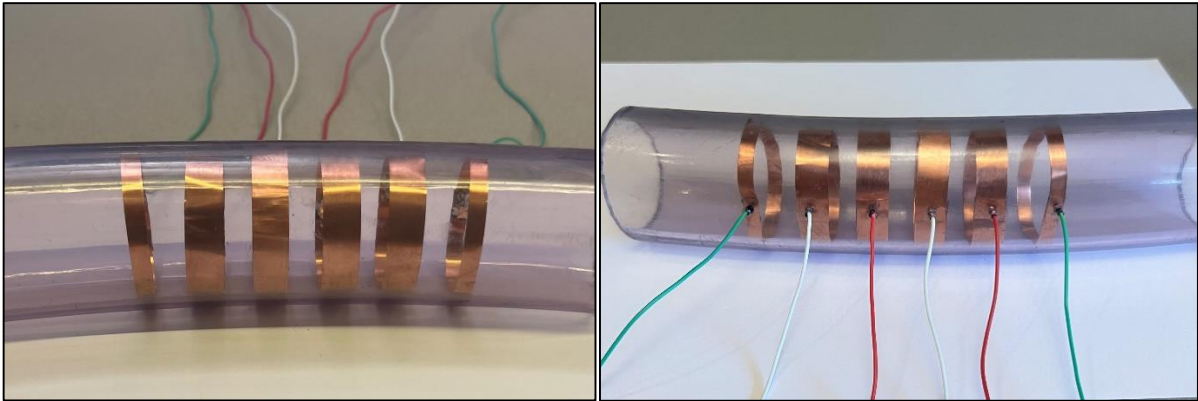
Os eletrodos das extremidades são eletrodos de guarda, possuem 125mm de comprimento, 5mm de largura e tem o intuito de confinar o campo elétrico na região sensora evitando interferências. Os eletrodos foram acondicionados em uma tubulação de 2 polegadas de diâmetro externo (conforme apresentado na figura 21), de modo a possibilitar sua inserção no sistema hidráulico de circulação de óleo.

Figura 20 – Eletrodos moldados na parte externa da tubulação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 – Eletrodos acondicionados no interior da tubulação.

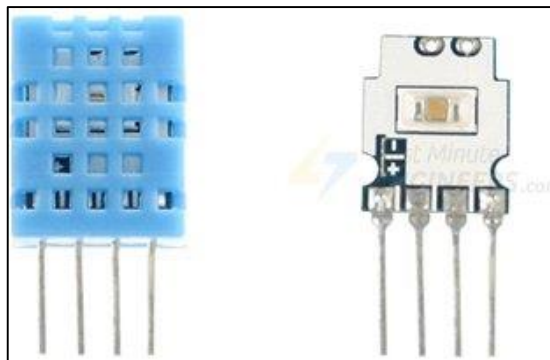


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o desenvolvimento do sensor de detecção de água no óleo, foi utilizado como base a estrutura do sensor DHT11. O sensor DHT11 mostrado na figura 22 é um sensor capacitivo para medição de umidade entre 20 e 90% e possui um termistor NTC para a medição de temperatura.

O DHT11 pode ser alimentado com tensão entre 3 e 5VCC e conta com um CI de 8 bits no encapsulamento SOIC-14, responsável por medir e processar o sinal analógico. Utilizando coeficientes de calibração armazenados, ele converte esse sinal em formato digital e fornece uma saída digital com os valores de temperatura e umidade (ENGINEER, 2022).

Figura 22 – Sensor DHT11 internamente.



Fonte: Adaptado de Engineers (2022)

3.2.1 Capacitância do sensor de água no óleo

A capacitância do sensor capacitivo com quatro eletrodos foi determinada através do método de placas planas, conforme equação (2), sugerida por Halliday, Resnick e Walker (2016):

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (2)$$

Em que:

C = capacitância (F);

ϵ_0 = constante dielétrica do vácuo = $8,85 \times 10^{-12}$ F/m

ϵ_r = constante dielétrica do óleo mineral = 2,2

ϵ_r = constante dielétrica da água = 80

A = área das placas paralelas (m²);

d = distância entre as placas paralelas (m);

Inserindo os dados do capacitor na Equação (2), considerando a constante dielétrica do óleo mineral obteve-se o resultado de 14,6pF, condição essa que é considerada a normal de operação, ou seja, somente com óleo. Considerando a constante dielétrica da água, e inserindo os dados do capacitor na Equação 2, obteve-se o resultado de 531pF.

3.3 Sensor PT100 a três fios

O sensor utilizado para a medição de temperatura escolhido é um RTD PT100 a três fios, conforme figura 23. A sonda para medição é feita em aço inox e possui 30mm de comprimento e 4mm de diâmetro, sendo possível realizar medições entre as faixas de temperatura de -70 °C à 420 °C.

Figura 23 – RTD PT100 a três fios.



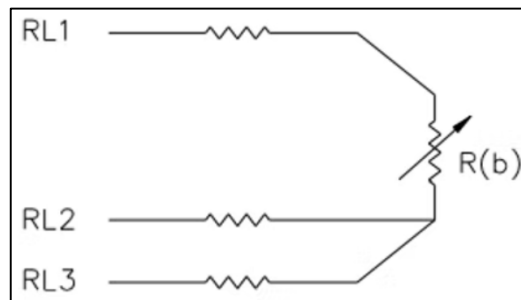
Fonte: Adaptado de Saraiva (2025).

O PT100 aplicado possui três fios condutores (conforme apresentado na figura 24), sendo dois fios para medição e outro para compensação. O valor real da medição é dado através da medição de resistência entre dois pontos (R1 e R2) e subtraída a resistência da referência

com o compensador (R_2 e R_3), deixando apenas a resistência do sensor RTD, conforme equação (3) (CORDEIRO, 2019):

$$RTD = (R_1 + R_2 + R_b) - (R_2 + R_3) \quad (3)$$

Figura 24 – Circuito de ligação RTD PT100 a três fios



Fonte: Adaptado de Cordeiro (2019).

3.4 Sensor de partículas ferrosas

Para o desenvolvimento do sensor de detecção de partículas ferrosas, foi utilizado o método indutivo, pois é o mais adequado para tubulações metálicas e não metálicas e os materiais associados para implementação do projeto possuem uma estrutura simples. Além disso, a sensibilidade desse método não é afetada pela qualidade do óleo e permite diferenciar com eficácia partículas metálicas ferrosas e não ferrosas.

Com o intuito de desenvolver um sensor altamente sensível e adequado para medições em condições de alta vazão do óleo lubrificante, o estudo propõe um modelo de sensor baseado em uma bobina de excitação e uma para detecção. Para validar sua sensibilidade, foram realizados testes experimentais que demonstraram o desempenho do sensor proposto.

Uma tensão de corrente alternada (CA) é aplicada a bobina de excitação através de um gerador de função, induzindo uma tensão e frequência na bobina de detecção, gerando um campo magnético no interior da bobina. Quando partículas ferrosas entram na tubulação em que o sensor está instalado, ocorre a interação entre a permeabilidade e as correntes parasitas.

Com isso, o fluxo magnético tende a aumentar, visto que as partículas ferrosas possuem maior permeabilidade magnética. Em seguida, correntes parasitas geradas dentro dessas partículas criam um campo magnético em sentido oposto ao original, o que reduz o fluxo magnético total na bobina.

Desta forma, quando ocorre a passagem das partículas no interior da bobina de detecção, verifica-se uma variação na diferença de potencial entre seus polos. Como essa variação apresenta baixa amplitude (na ordem de milivolt), torna-se necessário realizar o processamento do sinal por meio de retificação e filtragem da onda, a fim de possibilitar uma leitura mais estável e precisa dessa alteração.

O sensor desenvolvido (ilustrado na Figura 25) é composto por duas bobinas concêntricas, sendo a bobina de excitação montada sobre a bobina de detecção. O sensor foi elaborado sobre uma tubulação de PVC de $\frac{3}{4}$ polegadas, com diâmetro externo de 25mm. Ambas são confeccionadas com fio esmaltado 30 AWG. A bobina de excitação possui 4 camadas com 105 espiras por camada, totalizando 420 espiras, enquanto a bobina de detecção apresenta 10 camadas com 83 espiras por camada, totalizando 830 espiras.

Figura 25 – Bobinas do sensor de partículas ferrosas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No processo de bobinamento das bobinas de excitação e detecção, a tubulação foi fixada em uma parafusadeira, enquanto o carretel contendo o fio esmaltado foi posicionado em um suporte no interior de uma caixa, de modo a permitir sua rotação livre durante o procedimento (conforme observado na figura 26). Essa disposição possibilitou a formação de espiras mais uniformes e com espaçamento regular entre si, garantindo maior qualidade e precisão no enrolamento.

Figura 26 – Montagem das bobinas de excitação e detecção.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.1 Indutância do sensor indutivo

A indutância do sensor indutivo foi determinada através do método de indutância de um solenoide (bobina cilíndrica), conforme equação (4), sugerida por Halliday, Resnick e Walker (2016):

$$L = \mu \frac{N^2 A}{l} \quad (4)$$

Em que:

L = indutância (H);

μ = permeabilidade magnética do material (no vácuo é $= 4\pi \times 10^{-7}$ H/m);

N = número de espiras;

A = área da seção transversal das bobinas (m²);

l = comprimento das bobinas (m);

Inserindo os dados do indutor na equação (4), considerando a permeabilidade magnética do material como sendo o ar, visto que o mesmo não terá núcleo, obteve-se o valor da indutância de 6,7mH para a bobina de excitação e para a bobina de detecção 26,1mH.

3.4.2 Definição da alimentação da bobina de excitação

Considerando a necessidade de alimentar a bobina de excitação do sensor, realizaram-se testes variando a amplitude da tensão e a frequência do sinal, com o objetivo de determinar a faixa em que a bobina de detecção apresentava a melhor resposta. Para isso, aplicaram-se tensões entre 1V e 7V e frequências de 1kHz a 125kHz, analisando-se, por meio de um osciloscópio, o comportamento da diferença de potencial do sensor durante a aproximação de uma partícula ferrosa à região sensora.

O teste foi realizado em todas as etapas utilizando a mesma partícula ferrosa, sem variação de tamanho da partícula durante o procedimento (tabela 2).

Tabela 2 – Resposta do sensor com baixa amplitude de tensão e alta frequência.

Tensão gerador (V)	Frequência gerador (Hz)	Tensão osciloscópio (V)	Tensão osciloscópio com partícula (V)	DDP (V)
1	2,5k	1,02	1,22	0,2
1	5k	2,16	2,33	0,17
1	7,5k	2,82	2,91	0,09
1	10k	3,22	3,25	0,03
1	25k	3,62	3,62	0
1	50k	3,77	3,77	0
1	75k	4,03	4,03	0
1	100k	4,15	4,15	0
1	125k	4,7	4,71	0,01
2	2,5k	2,34	2,73	0,39
2	5k	4,74	5	0,26
2	7,5k	6,05	6,2	0,15
2	10k	6,81	6,91	0,1
2	25k	7,9	7,9	0
2	50k	8,26	8,26	0
2	75k	8,75	8,78	0,03
2	100k	9	9,02	0,02
2	125k	9,88	9,91	0,03
3	2,5k	3,77	4,4	0,63
3	5k	7,38	7,8	0,42
3	7,5k	9,34	9,55	0,21
3	10k	10,5	10,6	0,1
3	25k	12,1	12,1	0
3	50k	12,6	12,6	0
3	75k	13,3	13,3	0
3	100k	13,6	13,7	0,1
3	125k	14,8	14,9	0,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observou-se que, sob condições de baixa amplitude de tensão e alta frequência de excitação (por exemplo 1V e frequência variando de 25kHz a 125kHz conforme apresentado na tabela 2), não ocorreu variação perceptível na diferença de potencial medida no osciloscópio.

Entretanto, ao aplicar maiores amplitudes de tensão associadas a frequências mais baixas, verificou-se uma melhor resposta da bobina de detecção durante a aproximação da partícula ferrosa à região sensora, indicando melhor sensibilidade do sensor nessa faixa de operação.

Os resultados dos testes são apresentados na tabela 3, onde observa-se que o sensor apresentou melhor resposta quando alimentado com uma tensão de 7V e frequência de 2kHz.

Tabela 3 – Teste de sensibilidade com tensões e frequência do sensor.

Tensão gerador (V)	Frequência gerador (kHz)	Tensão osciloscópio (V)	Tensão osciloscópio com partícula (V)	DDP (V)
1	1	0,42	0,53	0,11
1	2	0,79	0,98	0,19
1	3	1,27	1,44	0,17
1	4	1,74	1,95	0,21
2	1	0,8	1,12	0,32
2	2	1,76	2,18	0,42
2	3	2,92	3,4	0,48
2	4	3,95	4,27	0,32
3	1	1,27	1,69	0,42
3	2	2,79	3,51	0,72
3	3	4,66	5,39	0,73
3	4	6,15	6,79	0,64
4	1	1,72	2,32	0,6
4	2	3,97	4,91	0,94
4	3	6,4	7,34	0,94
4	4	8,41	9,18	0,77
5	1	2,21	2,98	0,77
5	2	5,23	6,41	1,18
5	3	8,3	9,4	1,1
6	1	2,63	3,55	0,92
6	2	6,34	7,76	1,42
6	3	9,96	11,3	1,34
7	1	3,13	4,1	0,97
7	2	7,55	9,3	1,75

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando que a bobina de detecção foi conectada a um conversor analógico DigiRail-2A, cuja faixa de entrada é limitada entre 0 a 10V, tomou-se o cuidado de garantir que ao aproximar uma partícula ferrosa, a diferença de potencial gerada não ultrapassasse o limite máximo suportado pelo conversor.

Dessa forma, optou-se pela operação com tensão de 7V e frequência de 2kHz, assegurando uma resposta adequada do sensor sem risco de saturação do circuito de leitura. Essa configuração foi utilizada nos testes de calibração do sensor e na sua integração com o sistema supervisor.

3.4.3 Circuito retificador e filtro passa-baixa

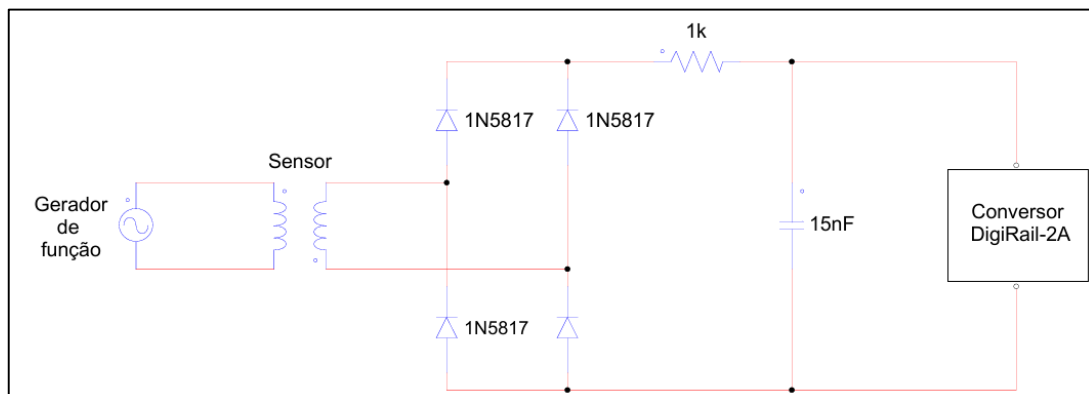
Com o objetivo de permitir a leitura do sinal pelo conversor analógico DigiRail-2A, foi necessário retificá-lo, convertendo-o para corrente contínua (CC) antes de chegar ao módulo. Como o sinal de leitura opera em regime de alta frequência, realizou-se uma retificação de onda completa com quatro diodos *Schottky* modelo 1N5817. Esses diodos foram escolhidos por sua comutação ultrarrápida e pelo tempo de recuperação reversa praticamente nulo, o que minimiza a geração de ruídos no sinal.

Após a retificação, realizou-se a filtragem do sinal através de um filtro passa-baixa passivo, composto por um resistor de 1000 Ω e um capacitor cerâmico de 15nF conectados entre si com a finalidade de rejeitar sinais indesejados de alta frequência. A frequência de corte foi definida através da Equação (5), obtendo um valor de 10.610Hz.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5)$$

O circuito retificador e filtro passa-baixa passivo implementado no sinal de saída do sensor de partículas ferrosas, é observado através na figura 27.

Figura 27 – Circuito retificador e filtro passa-baixa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5 Circuito microcontrolado

O circuito microcontrolado do protótipo para integração do sensor de água no óleo foi desenvolvido utilizando a placa de desenvolvimento ESP32 DevKit V1 a qual recebe através do pino GPIO 4, o sinal digital proveniente do microcontrolador de 8 bits do sensor DHT11 e com a utilização de um conversor analógico digital de 12 bits modelo MCP4725, é realizada a conversão do sinal digital para analógico, fornecendo tensão para a continuidade do envio do sinal.

O microcontrolador é programado para coletar e processar o sinal proveniente do microcontrolador de 8 bits do DHT11 que possui os eletrodos conectados em suas extremidades, ou seja, o programa inicializa a leitura dos eletrodos através do conversor do DHT11 e inicializa o conversor digital analógico MCP4725, realizando uma calibração automática que registra a porcentagem da água presente no óleo como ponto de referência (offset) inicial.

A partir disso, o microcontrolador lê continuamente o valor dos eletrodos, realiza o cálculo da porcentagem da água no óleo através da subtração entre o valor de leitura atual com base no valor de calibração, desta forma, obtendo a umidade corrigida. Por fim, converte esse valor de leitura corrigido proporcionalmente em um sinal analógico de 0 a 5V através do MCP4725.

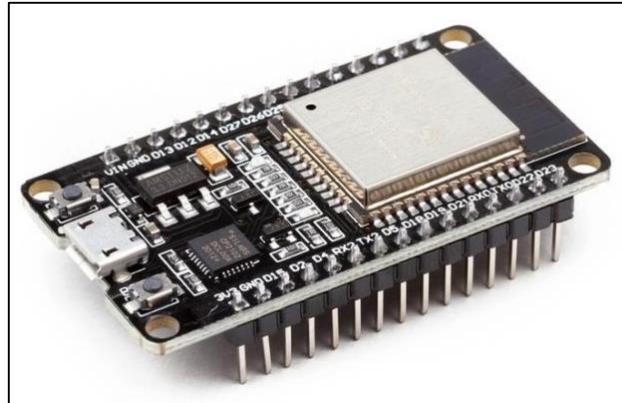
A medição da água no óleo só pode ser realizada quando a comunicação com os eletrodos estiver ativa, caso contrário, o microcontrolador gera um sinal em nível lógico alto através da GPIO 14 indicando a falha na leitura dos eletrodos. A saída da GPIO 14 está conectada a um relé SRD-05VDC-SL-C e os contatos comum e normalmente aberto do relé são conectados a entrada digital 4 do CLP TPW 04, possibilitando a visualização da falha do sensor através do sistema supervisorio.

3.5.1 ESP32 DevKit V1

A placa de desenvolvimento ESP32 DevKit V1, apresentada na figura 28, é amplamente utilizada em projetos de automação residencial, robótica e sistemas interativos. Ela conta com um processador dual-core de 32 bits, capaz de operar até 240 MHz, 520 KB de RAM e 4 MB de memória flash interna, além de Wi-Fi e Bluetooth integrados, o que facilita a criação de dispositivos conectados. O módulo possui 34 pinos GPIO, sendo 22 digitais e 12 analógicos, oferecendo grande flexibilidade para integração de sensores e atuadores (MELLO, 2023).

O ESP32 desenvolvido pela Espressif tem seu funcionamento normal com tensões entre 2,3 V e 3,6 V, sendo recomendado o uso de 3,3 V em uma única fonte de alimentação com corrente mínima de 500 mA (SYSTEMS, 2019).

Figura 28 – Placa de desenvolvimento ESP32 DevKit V1



Fonte: Mello (2023).

3.5.2 Visual Studio Code

O Visual Studio Code é o ambiente de desenvolvimento utilizado para a programação do microcontrolador deste projeto, através da linguagem de programação em C++. Consiste em um software moderno, intuitivo e de fácil utilização, que reúne diversos recursos voltados à edição, depuração e organização de códigos (conforme figura 29).

Sua estrutura flexível e personalizável permite a instalação de extensões para diferentes plataformas de hardware, tornando o processo de desenvolvimento mais dinâmico, produtivo e acessível.

3.5.3 Conversor digital-analógico

O MCP4725 (apresentado na figura 30) é o conversor digital-analógico (DAC) utilizado no projeto, possui um único canal, baixa potência e alta precisão, com resolução de 12 bits no sinal digital de saída e memória não volátil. Através do amplificador de saída presente em seu encapsulamento, permite a oscilação da saída analógica de forma proporcional ao valor digital em sua entrada, podendo variar de 0 a 4096 na entrada (correspondente a 12 bits) representando uma tensão de saída proporcional entre 0 a 5V.

Figura 29 – Interface do software Visual Studio Code.

```

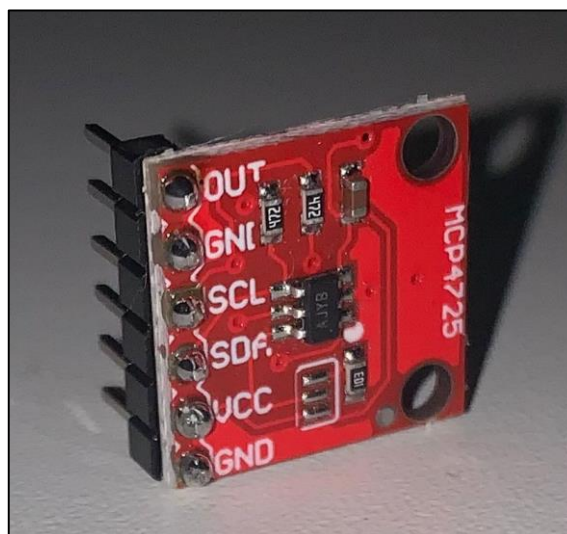
main.cpp x platformio.ini
Sensor de agua no oleo > src > main.cpp > myFunction(int, int)
1  #include <Arduino.h>
2
3  // put function declarations here:
4  int myFunction(int, int);
5
6  void setup() {
7      // put your setup code here, to run once:
8      int result = myFunction(2, 3);
9  }
10
11 void loop() {
12     // put your main code here, to run repeatedly:
13 }
14
15 // put function definitions here:
16 int myFunction(int x, int y) {
17     return x + y;
18 }

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

O ESP32 dispõe de um conversor digital-analógico nativo em sua placa, com resolução de 8 bits de 0 a 256 e tensão de saída entre 0 a 3,3V. Com o intuito de disponibilizar ao sistema supervisorio uma leitura mais estável, precisa e com melhor resolução do sensor, foi optado por utilizar o MCP4725 ao invés do conversor presente no ESP32, visto que sua saída possui uma faixa maior tornando a leitura mais confiável.

Figura 30 – Conversor MCP4725.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6 Conversor serial Modbus RS485/232

O conversor Modbus é responsável por realizar a integração e a adequação entre dispositivos que operam com diferentes interfaces físicas de comunicação, assegurando a integridade e a confiabilidade através da transmissão de dados de um equipamento a outro dentro de uma rede industrial.

O conversor permite que equipamentos com interfaces de comunicação como RS232, USB ou Ethernet se comuniquem com dispositivos que utilizam o padrão RS485, amplamente empregado em sistemas industriais devido à sua robustez e capacidade de operar em longas distâncias e ambientes com interferência eletromagnética.

No projeto, a comunicação entre os dispositivos físicos de campo e o sistema supervisório foi realizada utilizando um conversor de protocolo Modbus RS-485 (conforme observado na figura 31), conectado ao barramento da rede Modbus, possibilitando a conexão da rede no sistema supervisório via da porta serial USB. O supervisório utiliza Modbus Serial na codificação RTU, garantindo a troca de dados estruturada e confiável entre mestre e escravos.

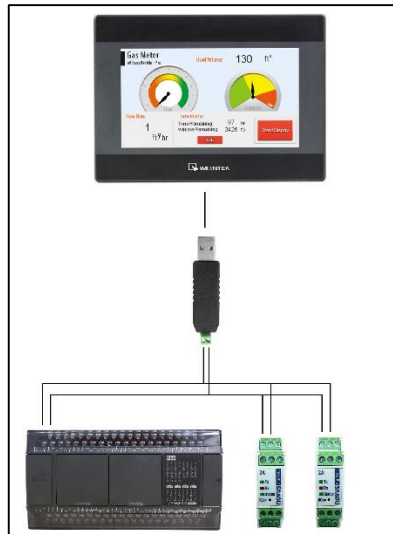
Figura 31 – Conversor Modbus RS-485.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por meio do conversor, foi implementada uma rede de comunicação Modbus (conforme ilustrado na figura 32), possibilitando a integração dos seguintes componentes ao sistema supervisório: CLP TPW04 (definido como escravo 1), conversor DigiRail-2A utilizado para supervisão de temperatura e porcentagem da água no óleo (definido como escravo 2) e um segundo conversor DigiRail-2A destinado à supervisão de partículas ferrosas (definido como escravo 3).

Figura 32 – Arquitetura da comunicação Modbus RS-485.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.7 Módulo de entradas analógicas universais DigiRail-2A

O desenvolvimento do projeto conta com o módulo Modbus de entradas analógicas universais modelo DigiRail-2A do fabricante NOVUS (conforme ilustrado na figura 33), sendo composto por uma unidade de medição com duas entradas analógicas configuráveis, com saída por protocolo de comunicação Modbus RS485, permitindo a leitura no sistema supervisor das entradas analógicas por meio de uma rede de comunicações Modbus.

Figura 33 – Módulo DigiRail-2A.

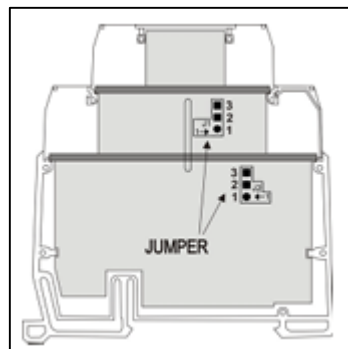


Fonte: Elaborado pelo autor.

O módulo é configurado através do software DigiConfig por meio da interface RS485 utilizando comandos Modbus RTU. O software permite a configuração de todos os recursos do módulo analógico como a definição do sinal de entrada (PT100, 0 a 5V, 0 A 10V, 4 a 20mA), velocidade de comunicação, paridade, bit de parada, endereço do escravo e entre outras configurações (conforme ilustrada na figura 35). Para alterar o tipo de entrada do conversor, além de configurar a entrada no software é necessário realizar a adequação do circuito eletrônico, através do jumper J1 presente internamente nas entradas 1 e 2 do conversor.

A fim de realizar a integração e possibilitar a leitura do sensor de água no óleo e partículas ferrosas, foi alterada a posição do jumper para a posição 1 e 2 (conforme ilustrado na figura 34), habilitando a leitura de entrada por meio de tensão. Para a utilização do sensor de temperatura PT100, foi adequada a posição do jumper para a posição 2 e 3, habilitando a leitura de entrada por meio de resistência ôhmica.

Figura 34 – Jumper para entrada 0-5Vcc e 0-10Vcc.

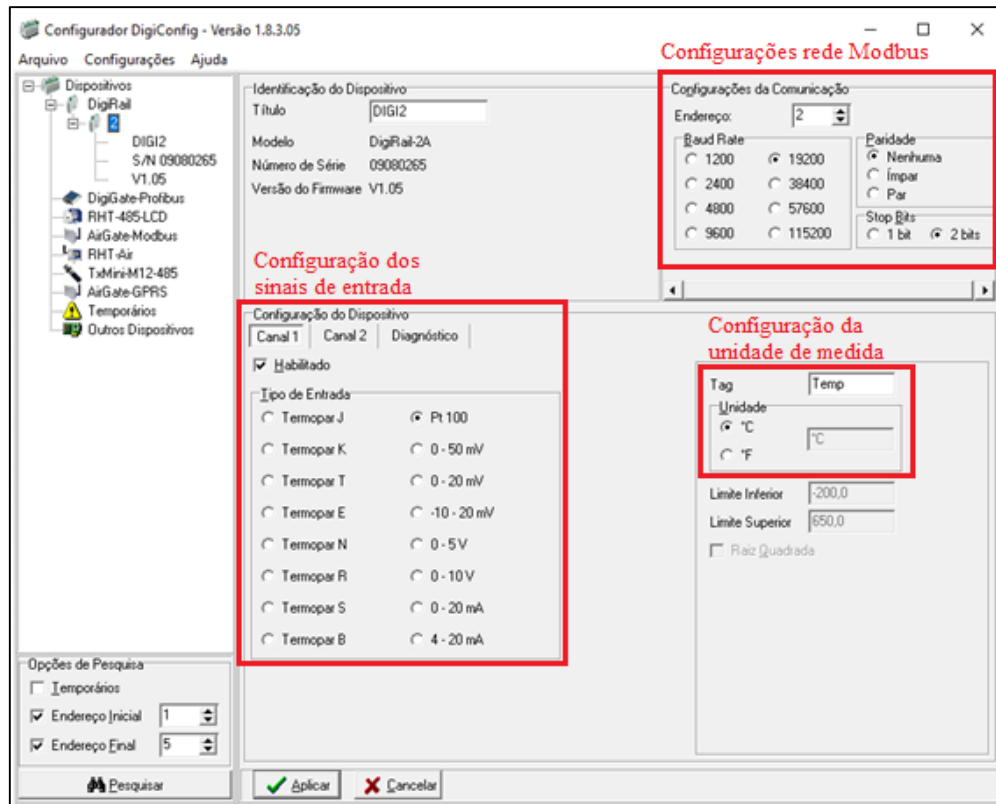


Fonte: Adaptado de Novus.

As configurações realizadas para as entradas analógicas e comunicação Modbus são apresentadas a seguir, sendo possível observá-las na tela geral do software através da figura 35:

- Velocidade (*baude rate*): 19200bps
- Endereço do escravo: 2 (PT100 e sensor de água no óleo) e 3 (sensor de partículas ferrosas)
- Paridade (*parity*): nenhuma
- Bit de parada (*stop bit*): 2
- Canal 1: entrada para PT100
- Canal 2: entrada para tensão de 0-5Vcc

Figura 35 – Configurações de entradas analógicas e comunicação Modbus.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.8 Controlador lógico programável TPW04

O projeto conta com o controlador lógico programável (CLP) modelo TPW04-360BR-A do fabricante WEG, desenvolvido para aplicações de automação industrial que exigem supervisão contínua, confiabilidade e comunicação eficiente. No projeto desenvolvido, o CLP foi utilizado realizando a aquisição de dados e o acionamento da motobomba por meio de comunicação Modbus RS-485, possibilitando a integração direta com o sistema supervisor.

Foram utilizadas suas entradas digitais para monitorar condições essenciais do processo, sendo a supervisão de bomba ligada (através da entrada X1), nível alto (através da entrada X2) e nível baixo (através da entrada X3) do reservatório de óleo, além da supervisão de falha do sensor de detecção de água no óleo (através da entrada X4). Sua saída digital Y1 foi definida para comandar o acionamento e desligamento da bomba de circulação do óleo.

Para estabelecer a comunicação Modbus com o sistema supervisor, foi implementada a lógica de controle em linguagem ladder utilizando o software TPW-PCLINK. A configuração do formato de comunicação foi realizada por meio do marcador D8120, responsável pela definição dos parâmetros para operação em Modbus RS-485.

Após definição do marcador, efetuou-se o cálculo necessário para ajustar os parâmetros de comunicação para 19200 8N2, resultando na configuração binária 10001001 (conforme observado através da figura 36), equivalente internamente ao contato K137 no CLP.

Figura 36 – Definição da configuração para comunicação Modbus do CLP TPW04.

Nome	D8120 & D8320 & D8300	
	Bit	Descrição
Comprimento dos dados.	(B0).	(0) : 7 bits. (1) : 8 bits.
Bit de paridade.	(B2, B1).	(0,0): sem paridade. (1,1): paridade par. (0,1): paridade ímpar.
Bit de parada	(B3).	(0) : 1 bit. (1) : 2 bits.
Taxa de transmissão (bps).	(B7, B6, B5, B4)	(0,1,1,0) : 4.800. (0,1,1,1) : 9.600. (1,0,0,0) : 19.200. (1,0,0,1) : 38.400. (1,0,1,0) : 57.600. (1,0,1,1) : 115.200. (1,1,0,0) : 128.000. (1,1,0,1) : 307.200. (1,1,1,0) : 500.000.
Caractere de início.	(B8).	(0): Nenhum. (1) : Ativo, padrão: STX (02 H).
Caractere final.	(B9).	(0): Nenhum. (1) : Ativo, padrão: ETX (03 H).
0	(B10).	Reservado.
0	(B11).	Reservado.
0	(B12).	Reservado.
0	(B13).	Reservado.
0	(B14).	Reservado.
0	(B15).	Reservado.

Fonte: Adaptado de WEG (2015).

3.9 Software ScadaBR

O ScadaBR é um software livre, gratuito e de código-fonte aberto que roda em navegador web, desenvolvido para a criação de sistemas SCADA (supervisão, controle e aquisição de dados), ou seja, é um software utilizado para o desenvolvimento de sistemas supervisórios, automação de equipamentos, aquisição de dados e controle remoto. Permite monitorar variáveis em tempo real, como temperatura, pressão, níveis, corrente e tensão, além de realizar o controle de equipamentos de forma remota.

O ScadaBR reúne todas as principais funções de um sistema SCADA tradicional, permitindo o monitoramento, controle e aquisição de dados de forma prática e acessível. Além disso, possibilita a criação de telas gráficas e sinóticas diretamente pelo navegador, sem necessidade de softwares adicionais.

Com o objetivo de realizar o monitoramento das variáveis analógicas dos sensores em tempo real a partir de uma estação remota, foi realizada a integração das medições dos sensores no ScadaBR. Para isso, foi adicionado um *data source* com as configurações para estabelecer a comunicação Modbus RS-485 entre o mestre (definido como o sistema Scada) e os escravos (definido como sendo os dois conversores DigiRail-2A e o CLP TPW04). É importante ressaltar que, para o correto funcionamento da comunicação, todos os equipamentos conectados na rede

precisam conter as mesmas configurações, exceto, o endereço de escravo, esse especificamente deverá ser único para cada dispositivo escravo da rede.

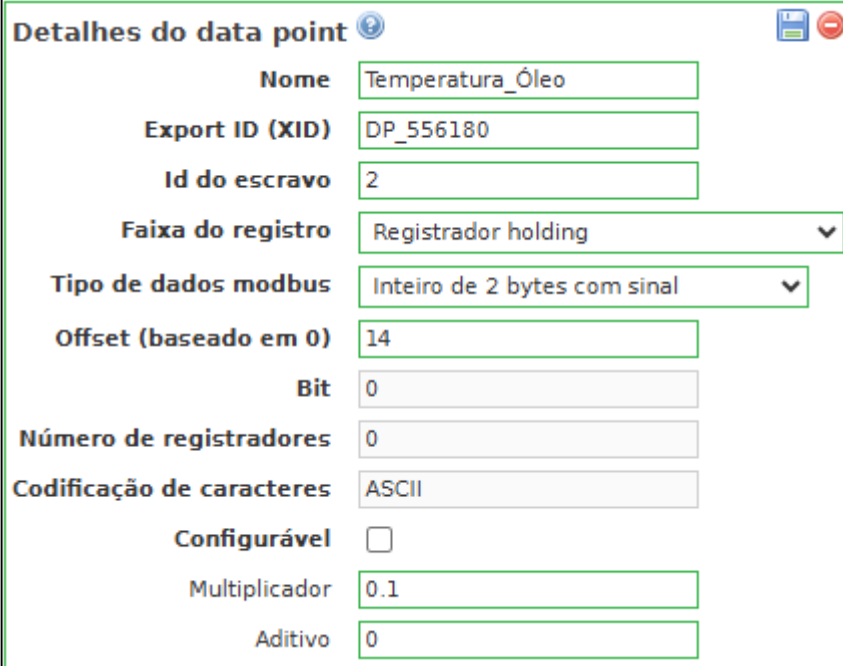
A comunicação serial foi configurada para 19200 8N2 através da configuração do *data source*, ou seja, a taxa de transmissão (velocidade de comunicação) foi definida em 19200bps, bits de dados (*data bits*) em 8, bit de parada (*stop bits*) em 2, sem paridade e comunicação através da porta serial número 14 (conforme observado através da figura 37).

Figura 37 – Configuração comunicação Modbus RS-485 sistema supervisório.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após ajustada a comunicação Modbus, foram inseridos os pontos de dados (*data points*) conforme apresentado na figura 38, contendo o nome, endereço de escravo (id do escravo), faixa do registro (sinal digital ou analógico), *offset* (registrador) e multiplicador para cada sinal adquirido através da comunicação para representação gráfica sinótica, permitindo visualizar o status dos equipamentos e variáveis dos sensores em tempo real, sem a necessidade de analisar cada dado individualmente. Os *data points* configurados através da comunicação Modbus (rede fiada), são apresentados através da figura 39.

Figura 38 – Configuração dos pontos de dados.



Detalhes do data point

Nome: Temperatura_Óleo

Export ID (XID): DP_556180

Id do escravo: 2

Faixa do registro: Registrador holding

Tipo de dados modbus: Inteiro de 2 bytes com sinal

Offset (baseado em 0): 14

Bit: 0

Número de registradores: 0

Codificação de caracteres: ASCII

Configurável:

Multiplicador: 0.1

Aditivo: 0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 39 – Data points provenientes da comunicação Modbus.

Nome	Tipo de dado	Status	Escravo	Faixa	Offset (baseado em 0)
Bomba_Ligada	Binário		1	Bobina (Coil Status)	1
Comando_Bomba	Binário		1	Registrador holding	256/0
Falha_sensor_água_óleo	Binário		1	Bobina (Coil Status)	4
Nível_Reservatório_Alto	Binário		1	Bobina (Coil Status)	2
Nível_Reservatório_Baixo	Binário		1	Bobina (Coil Status)	3
Partículas_Ferrosas	Numérico		3	Registrador holding	14
Temperatura_Óleo	Numérico		2	Registrador holding	14
Água_Óleo	Numérico		2	Registrador holding	15

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a criação dos *data points* da rede Modbus, foram configurados também os *data points* da rede virtual através da implementação do *data source meta*, capazes de realizar o condicionamento através de *script* para a atuação e desatuação dos alarmes, responsáveis por sinalizar ao operador, uma condição de perigo quando o equipamento ultrapassou os limites pré-configurados.

Após a definição dos *data points* provenientes da rede Modbus, foram configurados os *data points* da rede virtual utilizando o *data source meta*. Esse recurso permitiu a aplicação de *scripts* para o tratamento e condicionamento lógico das variáveis, necessário para a atuação e a

desatuação dos alarmes em tela conforme critérios pré-definidos. Através dos alarmes o operador tem o conhecimento quando da ocorrência de condições de risco para o equipamento sempre que os parâmetros monitorados ultrapassarem os limites configurados. Os *data points* da rede virtual, são apresentados na figura 40.

Figura 40 – Implementação dos *data points* virtuais.

Data points			
Nome	Tipo de dado	Status	
Temperatura_Óleo_Alta_	Binário		
Temperatura_óleo_Muito_Alta	Binário		
Água_Óleo_Alta	Binário		
Água_Óleo_Muito_Alta	Binário		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 41 é apresentado o script desenvolvido para a lógica de atuação do alarme de temperatura alta. O alarme é acionado sempre que o valor de leitura for igual ou superior a 80°C e é normalizado quando a temperatura for menor ou igual a 78°C, garantindo assim a histerese do sistema. Para a condição de temperatura muito alta, definiu-se o limite de 85°C para a atuação do alarme e 83°C para sua normalização. Esses parâmetros foram estabelecidos de forma a assegurar estabilidade operacional e evitar comutações indevidas do estado do alarme.

Figura 41 – Script para atuação e desatuação do alarme de temperatura de óleo alta.

Detalhes do data point

Nome:

Export ID (XID):

Tipo de dado:

Configurável:

Contexto do script:

Nome do ponto	Tipo de dado	Var
Sistema Supervisório - Temperatura_Óleo	Numérico	<input type="text" value="vtemp"/>

Script

```

if (vtemp.value >= 80)
return true;
else if (vtemp.value <= 78)
return false;

```

Atualizar evento:

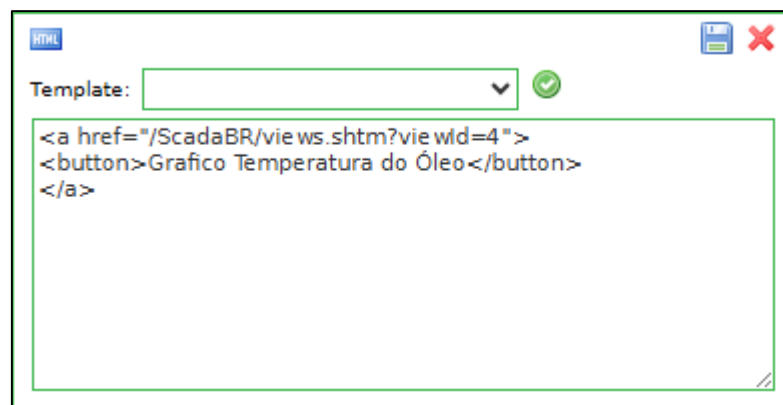
Atraso de execução (segundos):

Fonte: Elaborado pelo autor.

O *script* apresentado na figura 42 foi desenvolvido com o objetivo de inserir um botão na tela principal que ao ser acionado pelo usuário, realiza o redirecionamento para a tela do gráfico destinada ao monitoramento da temperatura do óleo. De forma análoga, foram implementados *scripts* adicionais para possibilitar a navegação para a tela de gráficos da porcentagem de água no óleo (por meio do visualizador 5) e para a tela de gráficos de partículas ferrosas (por meio do visualizador 6).

Dessa maneira o usuário pode monitorar em tempo real, os valores instantâneos de cada variável monitorada por meio dos gráficos de tendência, garantindo uma visualização contínua e atualizada dos parâmetros de operação.

Figura 42 – Script para troca da tela principal para tela de gráfico de temperatura.

A screenshot of an HTML editor window. The window title is "HTML". It features a "Template:" dropdown menu with a green checkmark icon to its right. Below the dropdown is a text area containing the following HTML code:

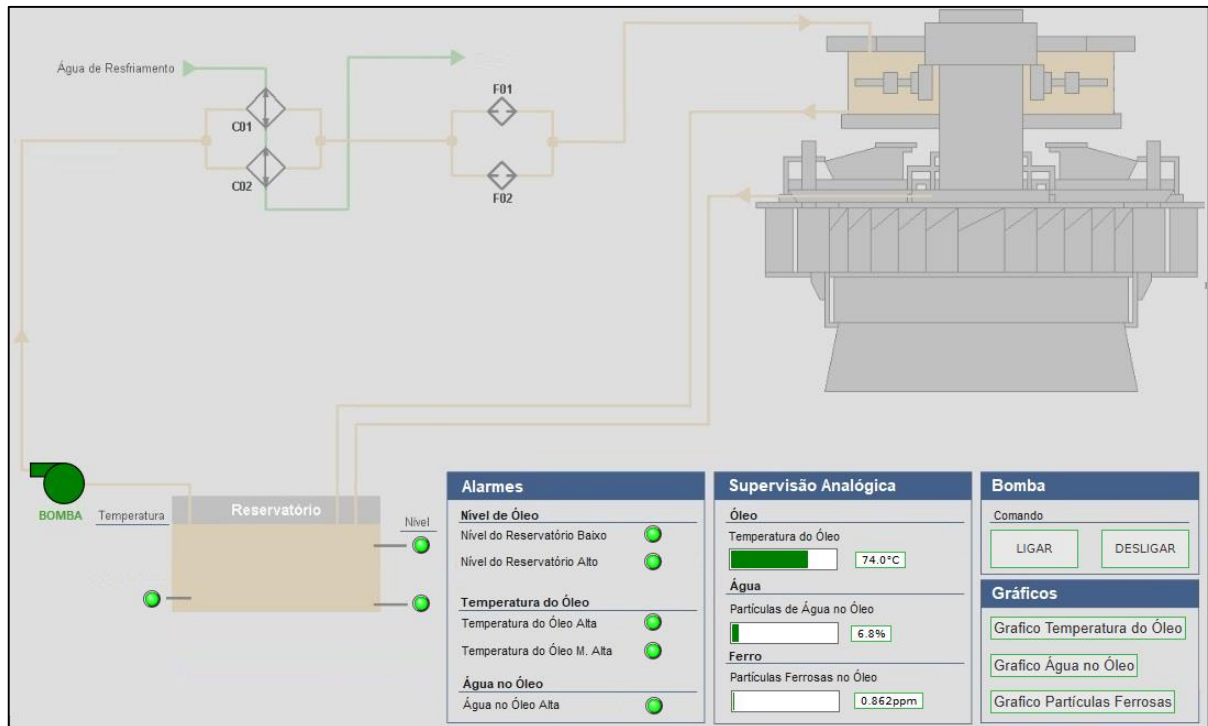
```
<a href="/ScadaBR/views.shtm?viewId=4">
<button>Gráfico Temperatura do Óleo</button>
</a>
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tela principal do sistema de controle e supervisão digital apresenta uma representação dinâmica do processo de lubrificação, incluindo o reservatório de óleo, as tubulações, os filtros, os trocadores de calor e o mancal, ilustrando o retorno do fluido ao reservatório e o fechamento do ciclo de circulação e resfriamento do lubrificante.

A estrutura da tela também inclui o comando de acionamento e desligamento da bomba de circulação, além de indicadores luminosos (através de leds dinâmicos) para sinalização de alarmes de nível alto e baixo do reservatório, temperatura alta e muito alta do óleo, bem como alta concentração de água no óleo. A tela ainda conta com comandos que permitem o redirecionamento do usuário para os gráficos de tendências. A tela principal do sistema de supervisão, é observada através da figura 43.

Figura 43 – Tela principal do sistema de controle e supervisão digital desenvolvido através do software ScadaBR.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.10 Calibração do sensor capacitivo

Com o objetivo de obter uma leitura no sistema supervisão mais próxima da medição real, realizou-se a calibração do sensor de detecção de água no óleo por meio de uma programação desenvolvida no controlador ESP32. Considerando que o sensor DHT11 apresenta medições confiáveis na faixa de 20% a 90%, identificou-se a necessidade de realizar uma calibração inicial a fim de permitir medições em toda a faixa desejada, compreendida entre 0% a 100%.

Durante os testes iniciais, ao inserir o sensor sem calibração em um recipiente contendo óleo mineral turbo T-68 puro (ou seja, sem presença de água), observou-se uma leitura inicial de 20%. Tal valor não correspondia à condição real da amostra, evidenciando a necessidade de calibração para corrigir o desvio de medição e possibilitar uma representação mais fiel da porcentagem da água no óleo monitorado.

Afim de realizar a correção da faixa de leitura do sensor, utilizou-se a memória não volátil do controlador ESP32 para armazenar o valor de calibração e carregá-lo automaticamente na inicialização do sistema. Através do comando `prefs.getFloat("offset", 0.0)` o programa tenta ler o valor gravado na memória.

Se o valor de calibração estiver previamente armazenado, ele será carregado e aplicado no código subsequente, caso contrário, o ESP32 realiza uma nova leitura do sensor, definindo o valor obtido como *offset* e gravando esse valor utilizando o comando `prefs.putFloat("offset", offset)`. Desta forma, ao desligar o controlador, o valor de calibração permanece armazenado e é automaticamente carregado na próxima inicialização. Através da figura 44 é apresentada a verificação do *offset*.

Figura 44 – Utilização da memória não volátil para armazenar o valor do *offset*.

```
prefs.begin("calibracao", false);

if (prefs.isKey("offset")) {
  offset = prefs.getFloat("offset", 0.0);
  Serial.print("Offset carregado da memória: ");
  Serial.println(offset);
} else {
  offset = dht.readHumidity();
  prefs.putFloat("offset", offset);
  Serial.print("Calibração inicial realizada e salva. Offset = ");
  Serial.println(offset);
}

prefs.end();
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após realizar a verificação inicial durante o funcionamento contínuo do sistema, cada leitura de umidade é ajustada com base no valor de referência armazenado. O valor atual medido pelo sensor é subtraído ao valor do *offset*, compensando desta forma a faixa inicial que não era contemplada pelo sensor (0 a 20%). Caso o valor corrigido resulte em um número negativo, ele é limitado a zero, conforme observado através da figura 45.

Figura 45 – Subtração do valor de *offset* para obter valor de leitura atual.

```
if (!isnan(hum)) {
  float hum_calibrada = hum - offset;
  if (hum_calibrada < 0) hum_calibrada = 0;
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

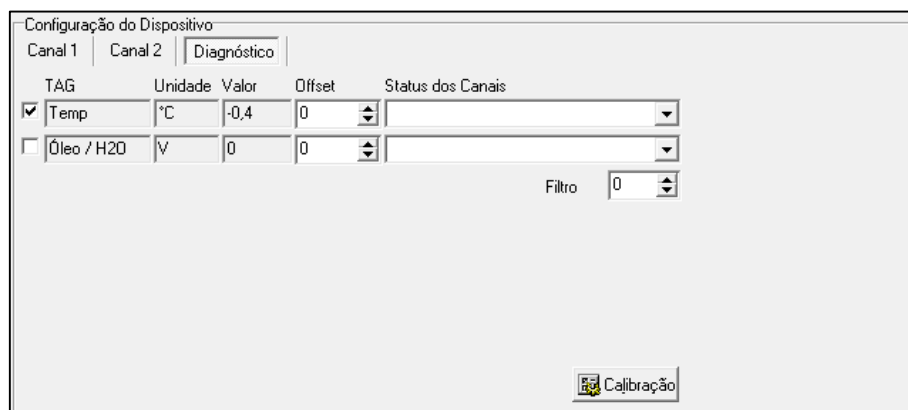
3.11 Calibração do sensor de temperatura

A fim de realizar a calibração do sensor de temperatura, foi utilizado o processo de fusão do gelo. Sabe-se que o ponto de fusão da água é de 0°C em relação ao nível do mar, ou seja, quando o gelo se encontra na temperatura de 0°C, ocorrerá a sua mudança de estado, passando do estado sólido para o estado líquido.

Tendo em vista a propriedade de fusão do gelo, foi utilizado um copo de acrílico com gelo no seu interior e aguardado o seu derretimento, garantindo através de suas características, que ao derreter a água interna do copo estava com temperatura em 0°C. Dessa forma, ao chegar no ponto de fusão do gelo, foi iniciada a calibração do sensor de temperatura PT100, através do software DigiConfig, tendo em vista que a variável analógica de temperatura foi conectada no módulo de entradas analógicas DigiRail-2A.

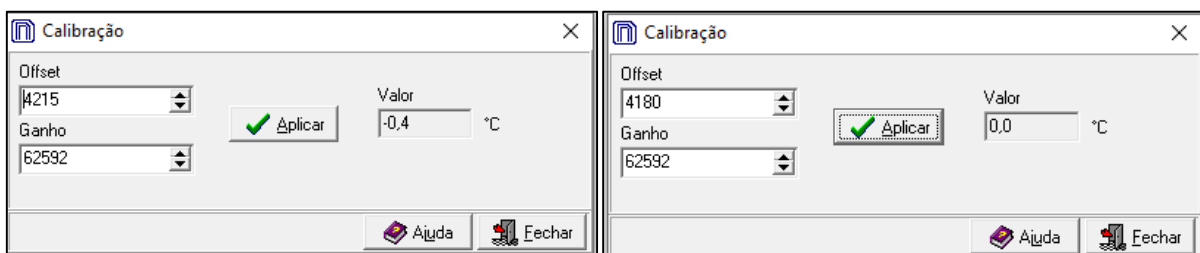
Na aba ‘Diagnóstico’ foi verificado que o sensor estava com uma medição em tempo real de -0,4°C (conforme observado na figura 46), onde, no momento da leitura deveria estar com 0°C. Através da aba ‘Calibração’ foi realizado o ajuste do *offset* da leitura do sensor, corrigindo-o para o valor de leitura de 0°C (conforme observado na figura 47). O *offset* inicial estava em 4215 e após alteração ficou com 4180, calibrando a leitura do sensor desta forma.

Figura 46 – Tela Diagnóstico e verificação do erro de leitura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 47 – Calibração da entrada do sensor de temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Entretanto, após realizar a calibração do sensor em 0°C, foi verificado que o sistema supervisor não estava lendo temperaturas negativas, sendo necessário alterar o tipo de dados Modbus para a medição de temperatura (conforme observado na figura 48). Com o sinal configurado para ‘Inteiro de 2 bytes sem sinal’, ao ler valores negativos o valor informado ao

sistema supervisorio era apresentado em final de escala (6552). Após alterar para ‘Inteiro de 2 bytes com sinal’, foi possível realizar a representação no sistema supervisorio dos valores negativos do sensor (conforme apresentado na figura 49).

Figura 48 – Ajuste do tipo de dados Modbus.

The image shows two side-by-side screenshots of the 'Detalhes do data point' configuration window. Both windows have the following fields: Nome: Temperatura_Óleo; Export ID (XID): DP_556180; Id do escravo: 2; Faixa do registro: Registrador holding; Offset (baseado em 0): 14; Bit: 0; Número de registradores: 0; Codificação de caracteres: ASCII; Configurável: [checkbox]; Multiplicador: 0.1; Aditivo: 0. The left window has 'Tipo de dados modbus' set to 'Inteiro de 2 bytes sem sinal', while the right window has it set to 'Inteiro de 2 bytes com sinal'. Both dropdown menus are highlighted with a red box.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 49 – Valores de leitura da temperatura do óleo.

Watch list		
Supervisorio - Temperatura_Óleo	6552.900000000001	21:53:09
Watch list		
Supervisorio - Temperatura_Óleo	-0.7001	21:52:13

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.12 Cálculo das incertezas

A avaliação das incertezas nas medições foi realizada por meio da comparação entre os valores obtidos pelo protótipo apresentados pelo software ScadaBR e as leituras de instrumentos de medição (multímetro digital Fluke 17B+ e osciloscópio Tektronix TBS1102). Para quantificar essas incertezas, foram aplicados métodos estatísticos, incluindo erro absoluto, erro relativo e desvio padrão. Essa abordagem permitiu verificar a compatibilidade entre as medições e analisar a precisão e a confiabilidade dos resultados fornecidos pelo protótipo.

3.12.1 Erro absoluto

O erro de medição também conhecido como erro absoluto segundo INMETRO (2008), representa a diferença direta entre o valor medido e o valor considerado verdadeiro ou de referência, sendo sempre expresso na mesma unidade da grandeza analisada. Esse indicador foi utilizado para verificar a proximidade das medições do protótipo considerando os 3 sensores em relação aos valores obtidos pelos instrumentos e pelo SCADA BR.

A fórmula proposta pelo INMETRO (2008), apresentada na Equação (6), foi utilizada para o cálculo do erro absoluto dos sensores de água no óleo, partículas ferrosas e temperatura desenvolvidos.

$$\text{Erro absoluto} = |\text{Valor medido} - \text{Valor real}| \quad (6)$$

A fim de determinar o erro absoluto, considerou-se como *Valor real* a medição obtida no equipamento de referência e, como *Valor medido* o resultado das três medições feitas com o protótipo em cada amostra.

3.12.2 Erro relativo

O erro relativo é utilizado para avaliar a precisão de uma medição, indicando o quanto o valor obtido se aproxima do valor considerado verdadeiro ou de referência. Esse indicador mostra a influência do erro na confiabilidade do resultado: quanto menor o erro relativo, maior a qualidade e a precisão da medição (INMETRO, 2008).

O cálculo do erro relativo das medições do protótipo foi realizado conforme a Equação (7), apresentada pelo INMETRO (2008):

$$\text{Erro relativo} = \frac{\text{Erro absoluto}}{\text{Valor real}} \quad (7)$$

Para determinar o erro médio relativo, somaram-se os erros relativos de todas as amostras e dividiu-se pelo número total de medições. Esse valor fornece uma média percentual, refletindo a precisão geral do protótipo.

3.12.3 Desvio padrão

O desvio padrão é uma medida estatística que indica o quanto os valores de um conjunto de dados variam em relação à média, representando o grau de dispersão das medições. Um desvio padrão baixo significa que os valores estão concentrados próximos da média, indicando

maior uniformidade, enquanto um desvio padrão alto indica que os dados apresentam maior variação, evidenciando medições dispersas (GOMES, 2024).

A partir das medições realizadas por intermédio do protótipo, foi calculado o desvio padrão de cada amostra por meio da função DESVPAD.A no Microsoft Excel e determinado o desvio padrão médio a partir dos valores de desvio padrão de cada amostra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

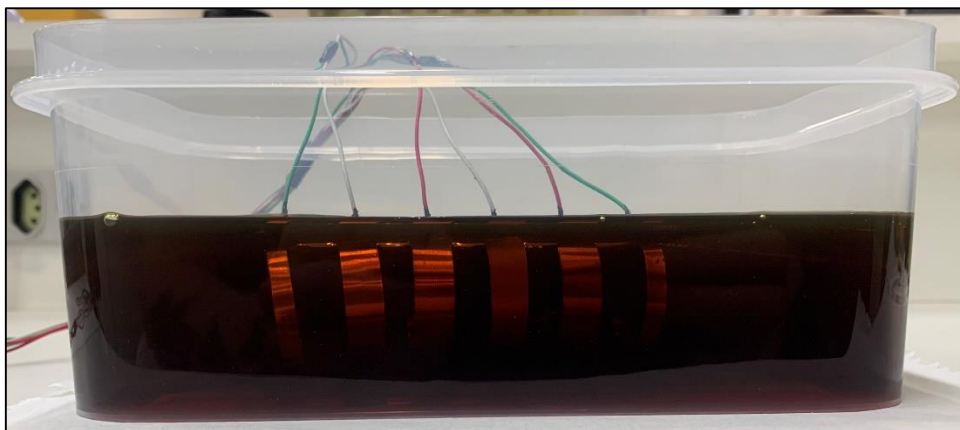
Este capítulo apresenta os resultados das medições realizadas com os sensores desenvolvidos para monitorar a porcentagem da água do óleo, partículas ferrosas e temperatura, integrados ao software ScadaBR, sendo realizados testes individuais em laboratório para cada sensor. Para avaliar a precisão e a sensibilidade do projeto, os dados foram comparados com medições obtidas por instrumentos de referência, como multímetro e osciloscópio.

Diante destas informações, foram calculados o erro absoluto, o erro relativo e o desvio padrão das medições dos protótipos desenvolvidos, permitindo analisar seu desempenho e confiabilidade.

4.1 Teor de água no óleo determinada pelo sensor capacitivo

Os testes do sensor capacitivo para detecção de água no óleo foram realizados em bancada, através da submersão do sensor em um recipiente contendo óleo mineral Turbo T-68 (conforme observado na figura 50). A primeira medição consiste na verificação da porcentagem do teor de água do sensor no óleo, onde foi possível obter o teor de água real do sensor após a sua calibração.

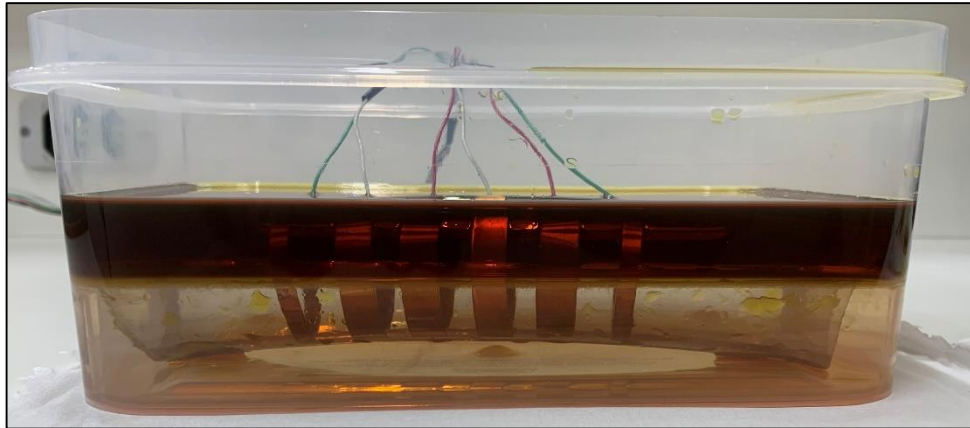
Figura 50 – Teste no sensor capacitivo com 100% de óleo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, quantidades controladas de água foram adicionadas de forma gradual e proporcional. O recipiente possui volume total de 1,5 litros de óleo, a cada inserção de 150 mililitros de água, retirava-se o mesmo volume de óleo, de modo a manter constante o volume total do sistema durante todo o experimento (observado através da figura 51).

Figura 51 – Teste no sensor capacitivo com amostra contendo 70% de água.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 4 apresenta um comparativo entre as medições obtidas pelo sensor e a instrumentação utilizada.

Tabela 4 – Comparação entre os sistemas de medição.

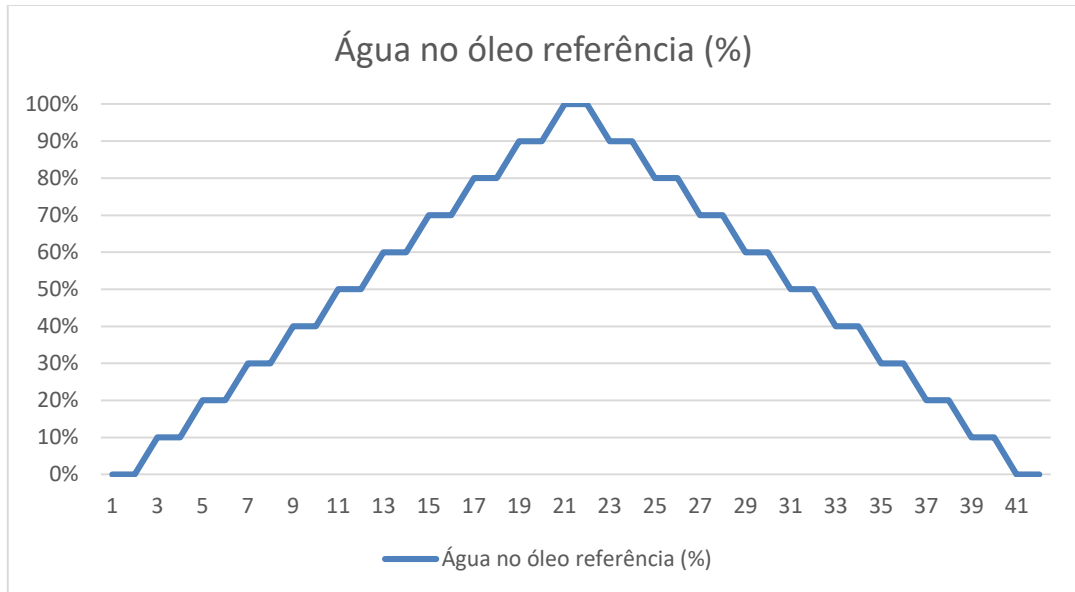
Amostra	Água (L)	Óleo (L)	Multímetro (V)	Oscilógrafo (V)	ScadaBR (%)	Visual Code (%)
1	0	1,5	0,001	0,048	0,08	0
2	0,15	1,35	0,532	0,55	10,2	10
3	0,3	1,2	1,105	1,1	20,9	20,5
4	0,45	1,05	1,599	1,63	32	31
5	0,6	0,9	2,017	2,06	40,33	39
6	0,75	0,75	2,686	2,72	53,68	52
7	0,9	0,6	3,049	3,08	60,91	59
8	1,05	0,45	3,508	3,54	70,08	68
9	1,2	0,3	3,99	4,02	80,16	78
10	1,35	0,15	4,49	4,52	90,24	88
11	1,5	0	4,498	5,01	100,32	98

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a verificação da precisão das leituras do sensor, apresentadas através do sistema supervisor, foi utilizada a reta de linearização, obtida a partir da relação entre os valores medidos pelo sistema e as amostras de referência conhecidas. Esse procedimento permitiu avaliar o grau de linearidade entre a leitura do sensor e os valores reais de concentração de água no óleo, possibilitando verificar se a resposta do sensor apresentava comportamento proporcional à variação das amostras.

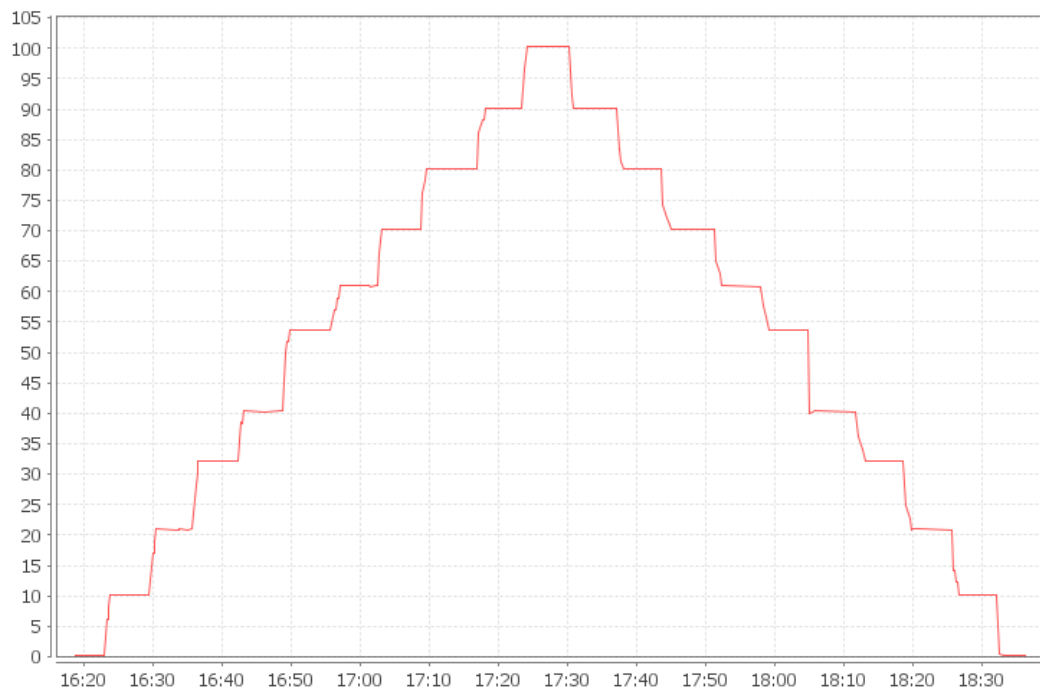
O gráfico 1 apresenta a leitura esperada do sensor, determinada a partir das amostras de referência, enquanto a figura 52 apresenta o registro das leituras coletadas através da tela de gráficos do software ScadaBR correspondentes às mesmas condições de amostragem. Os testes demonstraram uma variação proporcional da medição em função da saturação por água, evidenciando a capacidade de detecção da contaminação do óleo pela água.

Gráfico 1 – Curva de linearização determinada pelas amostras de referência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 52 – Medição de água no óleo registrada no sistema supervisório.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados demonstraram uma variação uniforme e progressiva das medições em função do aumento e da redução da concentração de água no óleo, evidenciando a precisão e a estabilidade do sensor ao longo de toda a faixa analisada. Além disso, o comportamento observado confirma a capacidade do sensor em detectar a presença de água no óleo, indicando situações de contaminação que comprometem suas propriedades de lubrificação e, conseqüentemente, o desempenho do sistema.

4.1.1 Determinação das incertezas do sensor capacitivo de água no óleo

Ao comparar os resultados obtidos, foi possível determinar o erro absoluto, relativo e desvio padrão apresentado pelo protótipo nas medições realizadas. A tabela 5 apresenta a porcentagem determinada das amostras de referência.

Tabela 5 – Porcentagem determinada das amostras de referência.

Amostra	Valor real (%)
1	0
2	10
3	20
4	30
5	40
6	50
7	60
8	70
9	80
10	90
11	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tendo o conhecimento das medições de referência, realizaram-se três medições da porcentagem da água no óleo em cada amostra com o sensor desenvolvido (conforme tabela 6), utilizando como base para o cálculo das incertezas, a porcentagem determinada das amostras. A cada etapa do ensaio, ao ser retirada uma porcentagem da mistura, era adicionada uma nova amostra com concentração específica, garantindo o controle e a rastreabilidade das condições de teste.

Tabela 6 – Resultados obtidos pelo protótipo nas medições de água no óleo através do software ScadaBR

Amostra	Medição 1 ScadaBR (%)	Medição 2 ScadaBR (%)	Medição 3 ScadaBR (%)
1	0,08	0	0,04
2	10,2	10,25	10,2
3	20,9	20,9	20,24
4	32	31,54	30,73
5	40,33	40,15	40,41
6	53,68	52,42	52,14
7	60,91	59,74	60,27
8	70,08	70,36	70,13
9	80,16	80,55	80,07
10	90,24	89,78	90,11
11	100,32	99,76	100,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das medições realizadas nos equipamentos, os resultados foram analisados, sendo calculada a média das três leituras obtidas pelo protótipo para cada amostra e posteriormente confrontada com os valores medidos pelo equipamento de referência.

Ao comparar os resultados obtidos, foi possível determinar o erro absoluto apresentado pelo sensor nas medições realizadas, conforme apresentados na tabela 7. Com base na determinação do erro absoluto para cada amostra, foi calculado o erro médio absoluto, que resultou em 0,572%.

Tabela 7 – Erro absoluto apresentado pelo sensor nas medições de água no óleo.

Amostra	Erro absoluto (%)
1	0,040
2	0,217
3	0,680
4	1,423
5	0,297
6	2,747
7	0,307
8	0,190
9	0,260
10	0,043
11	0,093

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela 8 é possível observar o erro relativo do sensor, determinado a partir da comparação entre as amostras de referência e as leituras registradas pelo sistema desenvolvido para o teor de umidade das amostras. A partir dos erros relativos individuais das amostras, obteve-se o erro médio relativo do sistema, cujo valor corresponde a 0,016%.

Tabela 8 – Erro relativo apresentado pelo sensor nas medições de água no óleo.

Amostra	Erro relativo (%)
1	0
2	0,022
3	0,034
4	0,047
5	0,007
6	0,055
7	0,005
8	0,003
9	0,003
10	0,000
11	0,001

Fonte: Elaborado pelo autor.

O desvio padrão das medições realizadas pelo sensor, em relação aos resultados de referência, é apresentado na tabela 19. A partir desses valores, calcula-se o desvio padrão médio das medições do protótipo, resultando em 0,32%.

Tabela 9 – Desvio padrão apresentado a partir das leituras realizadas pelo sensor de água no óleo.

Amostra	Desvio padrão (%)
1	0,04
2	0,03
3	0,38
4	0,64
5	0,13
6	0,82
7	0,59
8	0,15
9	0,26
10	0,24
11	0,29

Fonte: Elaborado pelo autor.

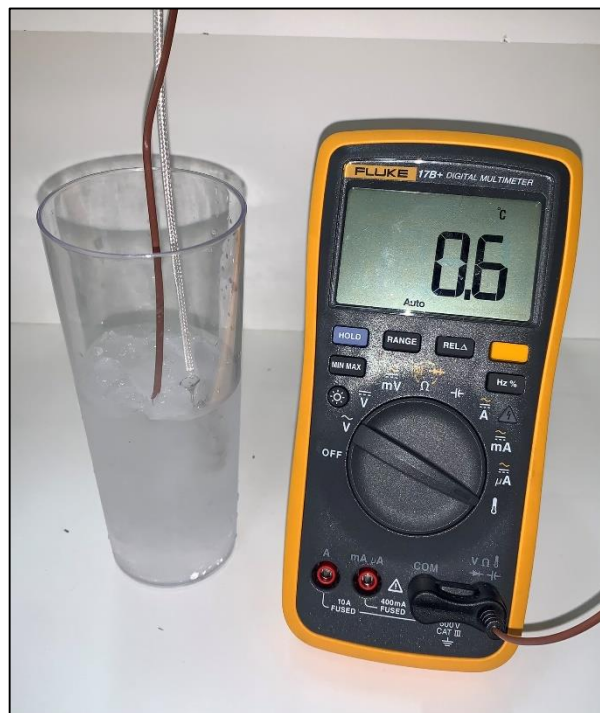
4.2 Testes no sensor de temperatura RTD PT100 a três fios

Os testes do sensor de temperatura foram realizados em bancada, posicionando-o em um copo de acrílico transparente. Como referência, utilizou-se o multímetro digital Fluke 17B+ na função de medição de temperatura, por meio de um termopar conectado aos seus terminais que forneceu os valores reais de temperatura durante os testes.

A variação de temperatura foi obtida por meio do aquecimento gradual da água, permitindo a realização das medições em uma faixa de 0 °C a 100 °C. Esse procedimento permitiu avaliar o grau de concordância entre as leituras entre o sensor e os valores de referência, verificando se a resposta do sensor apresentava comportamento proporcional à variação térmica aplicada.

A medição foi realizada por meio do software ScadaBR, permitindo observar em tempo real a temperatura da água após a calibração da entrada do sensor no conversor DigiRail-2A. O primeiro ensaio consistiu na verificação da temperatura inicial do sensor, obtida pela inserção de gelo no interior do copo e pela observação da leitura a partir do ponto de fusão, assegurando assim a precisão da leitura na faixa próxima de 0 °C (conforme observado através da figura 53).

Figura 53 – Medição de temperatura com o ponto inicial em 0°C.

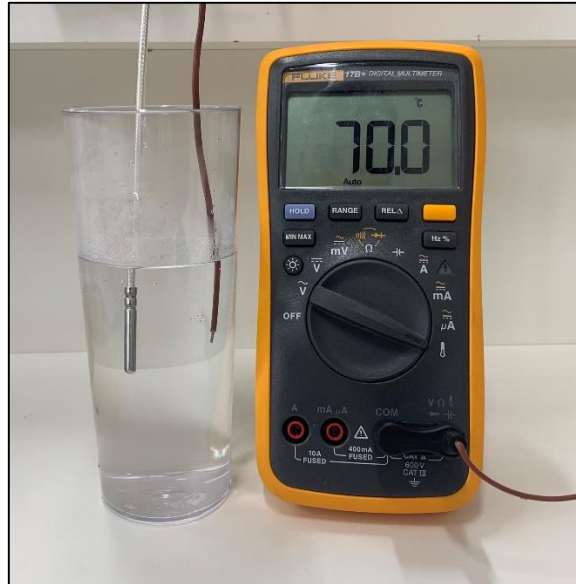


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na seqüência, realizou-se a elevação gradual da temperatura da água, partindo de 0 °C chegando a 100 °C, com o objetivo de verificar a resposta do sensor em diferentes faixas

térmicas (conforme observado na figura 54). O aquecimento foi conduzido por meio de uma fonte de calor controlada, garantindo o aumento progressivo e estável da temperatura durante as medições.

Figura 54 – Medição de temperatura com a referência de 70°C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, procedeu-se ao resfriamento gradual da água, permitindo observar o comportamento do sensor durante a redução térmica. As leituras foram monitoradas continuamente no software ScadaBR, possibilitando avaliar a precisão e a estabilidade das medições em todo o intervalo analisado.

A tabela 10 apresenta um comparativo entre as medições obtidas pelo sensor e a instrumentação utilizada.

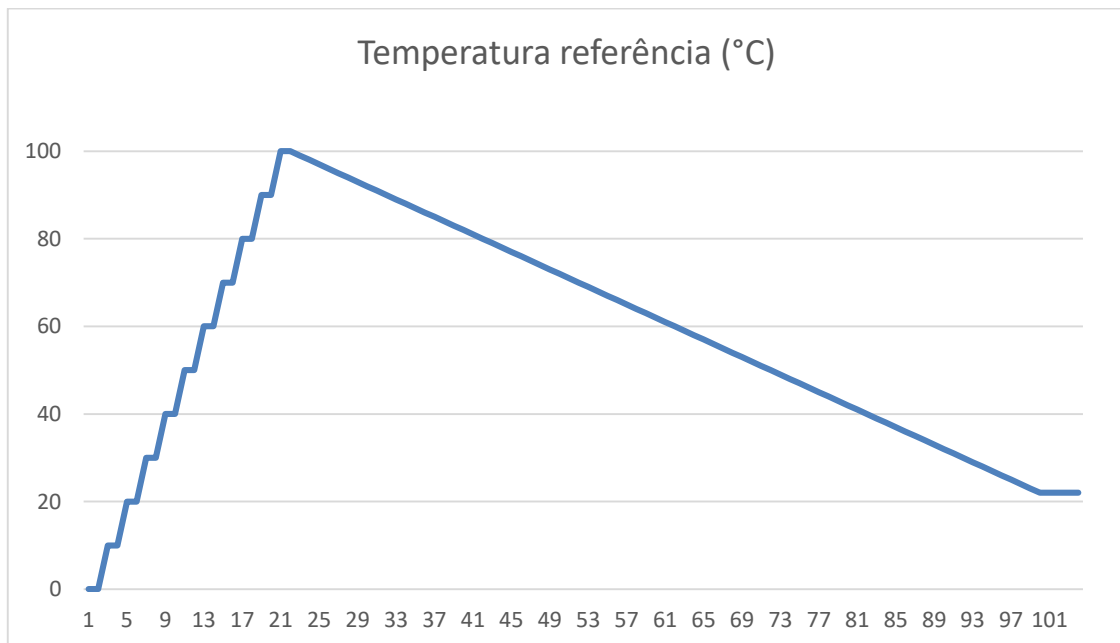
O gráfico 2 apresenta a leitura esperada do sensor, determinada a partir das medições do instrumento de referência, enquanto a figura 55 mostra o registro das leituras coletadas na tela de gráficos do software ScadaBR, correspondentes às mesmas condições experimentais. Os resultados demonstraram uma variação linear das medições em função da elevação e redução da temperatura, evidenciando a precisão e a estabilidade do sensor ao longo de toda a faixa analisada.

Tabela 10 – Comparação entre a medição do sensor apresentada no multímetro e ScadaBR.

Etapa	Referência Fluke (°C)	Medição 1 ScadaBR (°C)	Medição 2 ScadaBR (°C)	Medição 3 ScadaBR (°C)
1	0,6	0	0	0
2	10	9,5	9,55	9,68
3	20	19,8	19,7	19,9
4	30	30,3	30,2	30
5	40	40,2	40,32	40,15
6	50	50,3	50,14	50
7	60	60,4	60,39	60,32
8	70	69,8	69,7	69,8
9	80	80,6	80,4	80,1
10	90	90,4	90,6	90,25
11	100	100,6	100,4	100,12

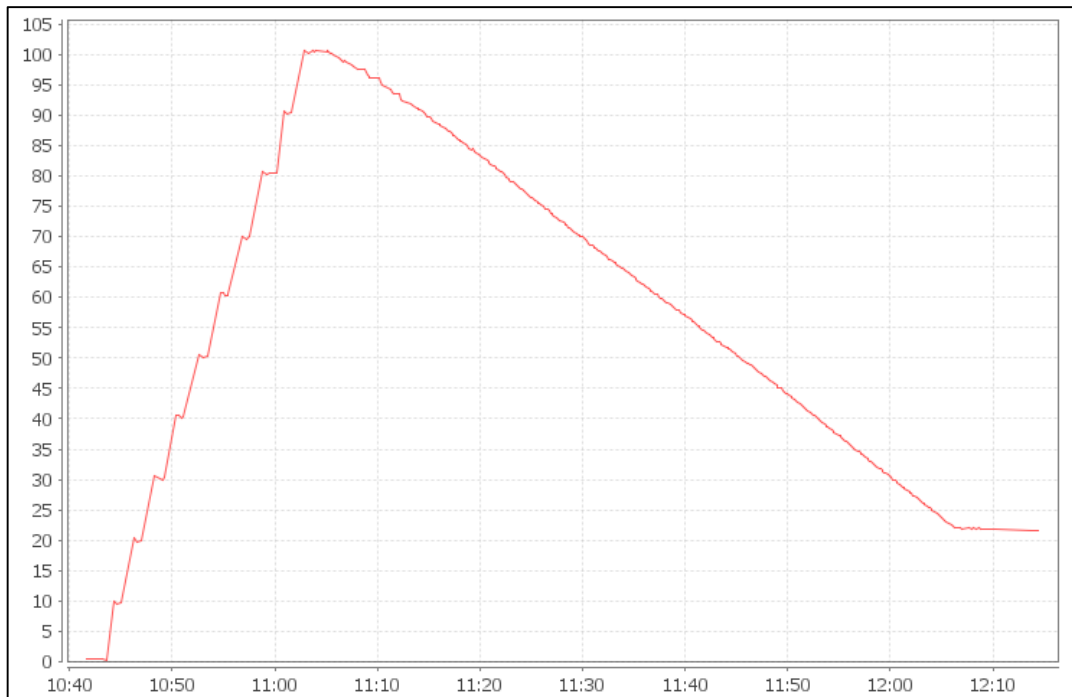
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 2 – Medição de temperatura conforme leitura do equipamento de referência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 55 – Medição de temperatura registrada no sistema supervisório.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1 Determinação das incertezas do sensor de temperatura

Ao comparar os resultados obtidos, foi possível determinar o erro absoluto, relativo e desvio padrão apresentado pelo protótipo nas medições realizadas. A tabela 11 apresenta a porcentagem determinada através das etapas de referência.

Tabela 11 – Temperatura determinada através das etapas de referência.

Etapa	Referência Fluke (°C)
1	0,6
2	10
3	20
4	30
5	40
6	50
7	60
8	70
9	80
10	90
11	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nas medições de referência, foram realizadas três leituras da temperatura da água para cada etapa utilizando o sensor desenvolvido (conforme apresentado na tabela 12). Para o cálculo das incertezas, considerou-se como base a temperatura previamente determinada pelas medições de referência através da escala de temperatura do multímetro Fluke 17B+. Durante cada etapa do ensaio, as medições foram realizadas de forma controlada e sequencial, garantindo a repetibilidade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Tabela 12 – Resultados obtidos pelo sensor PT100 nas medições de temperatura através do software ScadaBR

Etapa	Medição 1 ScadaBR (°C)	Medição 2 ScadaBR (°C)	Medição 3 ScadaBR (°C)
1	0	0	0
2	9,5	9,55	9,68
3	19,8	19,7	19,9
4	30,3	30,2	30,0
5	40,2	40,32	40,15
6	50,3	50,14	50,0
7	60,4	60,39	60,32
8	69,8	69,7	69,8
9	80,6	80,4	80,1
10	90,4	90,6	90,25
11	100,6	100,4	100,12

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das medições realizadas com os equipamentos, os resultados foram comparados, sendo calculada a média das três leituras obtidas pelo protótipo para cada amostra e confrontada com os valores medidos pelo instrumento de referência.

Com essa comparação, foi possível determinar o erro absoluto apresentado pelo sensor em cada medição, conforme demonstrado na tabela 13. A partir desses valores, calculou-se o erro médio absoluto, que resultou em 0,32°C, evidenciando a boa precisão do sistema desenvolvido.

Na tabela 14 é apresentado o erro relativo obtido para o sensor de temperatura, determinado a partir da comparação entre os valores medidos pelo sistema desenvolvido e as medições de referência. A partir dos erros relativos individuais de cada ponto de medição, foi calculado o erro médio relativo do sistema, cujo valor corresponde a 0,10%, demonstrando a elevada precisão e confiabilidade do sensor nas leituras realizadas.

Tabela 13 – Erro absoluto apresentado pelo sensor nas medições de temperatura.

Etapa	Erro absoluto (°C)
1	0,60
2	0,42
3	0,20
4	0,17
5	0,22
6	0,15
7	0,37
8	0,23
9	0,37
10	0,42
11	0,37

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14 – Erro relativo apresentado pelo sensor nas medições de temperatura.

Etapa	Erro relativo (%)
1	1,000
2	0,042
3	0,010
4	0,006
5	0,006
6	0,003
7	0,006
8	0,003
9	0,005
10	0,005
11	0,004

Fonte: Elaborado pelo autor.

O desvio padrão das medições realizadas pelo sensor de temperatura, em comparação com os valores obtidos pelo instrumento de referência, é apresentado na tabela 15. A partir desses resultados, foi determinado o desvio padrão médio das medições do protótipo, que corresponde a 0,12°C, indicando boa repetibilidade e estabilidade nas leituras realizadas.

Tabela 15 – Desvio padrão apresentado a partir das leituras realizadas pelo sensor de temperatura.

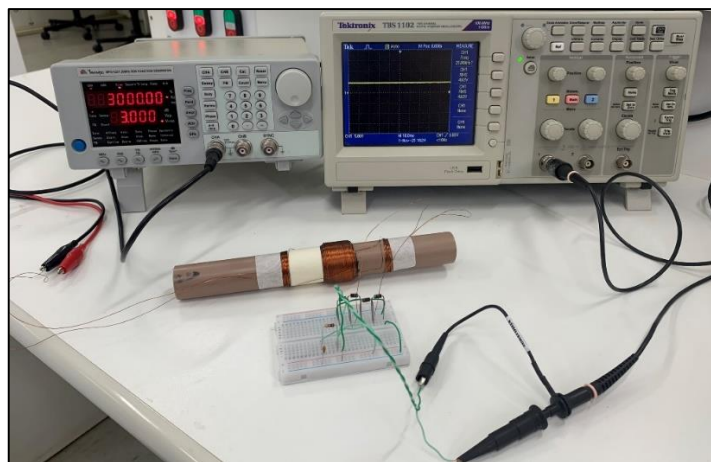
Etapa	Desvio padrão (°C)
1	0,000
2	0,093
3	0,100
4	0,153
5	0,087
6	0,150
7	0,044
8	0,058
9	0,252
10	0,176
11	0,241

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Sensor indutivo de detecção de partículas ferrosas

Os testes do sensor de partículas ferrosas foram realizados utilizando um gerador de funções Minipa MFG-4221 (20 MHz), um circuito retificador, um filtro passa-baixa e o módulo conversor de entradas analógicas DigiRail-2A (conforme observado na figura 56). A análise baseou-se na variação da diferença de potencial gerada quando o sensor foi submetido à interferência de um campo magnético, com os resultados sendo exibidos em tempo real no sistema supervisorio através do ScadaBR sendo realizada a comparação das leituras com o osciloscópio.

Figura 56 – Testes no sensor de detecção de partículas ferrosas.



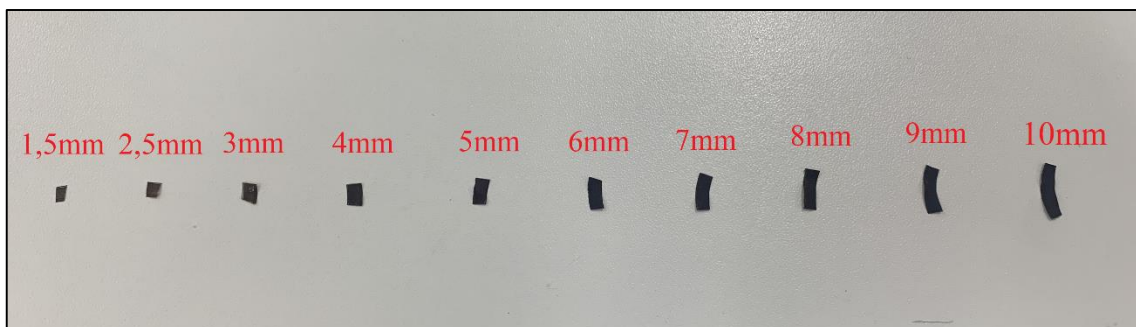
Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, realizaram-se testes para determinar a faixa de tensão de alimentação da bobina de excitação que proporcionava a melhor sensibilidade na bobina de detecção diante da presença de partículas ferrosas. Com base nos resultados obtidos, definiu-se como configuração padrão a alimentação da bobina de excitação com amplitude de 7V e frequência de 2kHz, considerando o limite máximo de tensão suportado pelo conversor analógico DigiRail-2A.

Em seguida, realizaram-se testes utilizando amostras de partículas ferrosas com diferentes dimensões, com o objetivo de avaliar a variação da diferença de potencial e a sensibilidade do sensor diante de partículas de tamanhos distintos. Com o auxílio de um paquímetro digital, as partículas foram medidas, cortadas e agrupadas conforme suas dimensões, e com a utilização de um cordão, foram presas separadamente, permitindo sua inserção controlada na região sensora da bobina de detecção.

As amostras utilizadas apresentam os seguintes tamanhos: 1,5 mm, 2,5 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm e 10 mm (conforme apresentado na figura 57).

Figura 57 – Separação das partículas ferrosas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o software DigiConfig foi realizada a calibração do conversor analógico, assim como o ajuste da entrada correspondente no ScadaBR. Dessa forma, a representação digital do sinal passou a utilizar um multiplicador de 0,1 em relação ao valor real medido, evitando que o sistema exibisse valores elevados quando não havia partículas no óleo.

Em seguida, as partículas foram inseridas individualmente no centro do sensor e movimentadas ao longo de toda sua extensão, do início ao final, simulando um fluxo constante no interior do dispositivo. Esse procedimento permitiu observar o comportamento do sensor durante a aproximação, passagem e afastamento das partículas ferrosas. As leituras foram acompanhadas em tempo real pelo sistema de supervisão do ScadaBR, possibilitando analisar a resposta e sensibilidade do sensor em função do tamanho das partículas e também avaliar a precisão das medições.

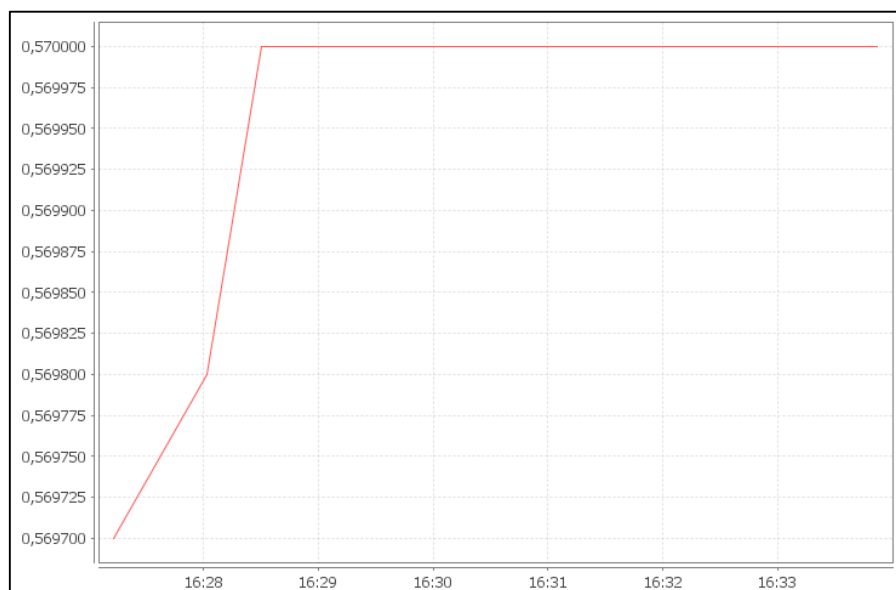
A tabela 16 apresenta um comparativo entre as medições realizadas pelo sensor e pela instrumentação. Observa-se que, na condição sem partículas no interior do sensor, a amplitude de tensão registrada pelo osciloscópio foi de 5,71V, enquanto o sistema supervisorio indicou 0,57V (conforme observado na figura 58, onde o eixo 'y' representa a tensão medida e o eixo 'x' o período). Dessa forma, a tabela também apresenta a diferença de potencial das medições realizadas com relação a tensão apresentada sem a presença de partículas ferrosas.

Tabela 16 – Medições obtidas a partir do osciloscópio e do ScadaBR com a presença de partículas ferrosas.

Partícula (mm)	Tensão Osciloscópio (V)	DDP Osciloscópio (mV)	Tensão ScadaBR (V)	DDP ScadaBR (V)
0	5,71	0	0,570	0
1,5	5,72	10	0,5802	0,0102
2,5	5,73	20	0,5874	0,0174
3	5,73	20	0,5896	0,0196
4	5,73	20	0,5936	0,0236
5	5,73	20	0,5945	0,0245
6	5,74	30	0,5978	0,0278
7	5,74	30	0,598	0,028
8	5,74	30	0,602	0,032
9	5,74	30	0,6044	0,0344
10	5,78	70	0,642	0,072

Fonte: Elaborado pelo autor.

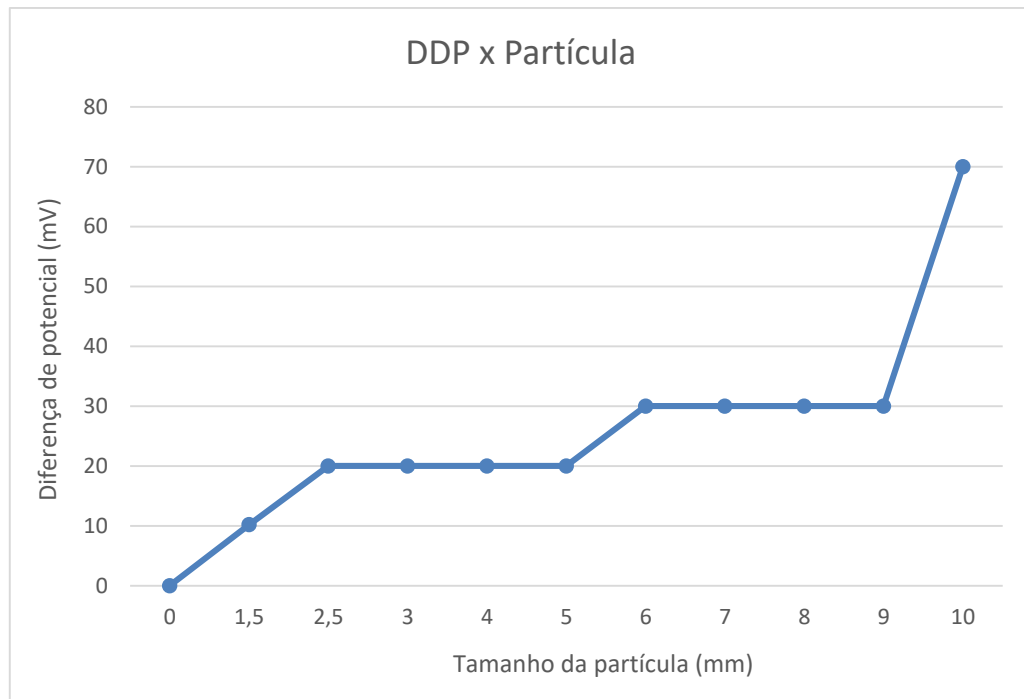
Figura 58 – Registro no sistema supervisorio sem a presença de partícula ferrosa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

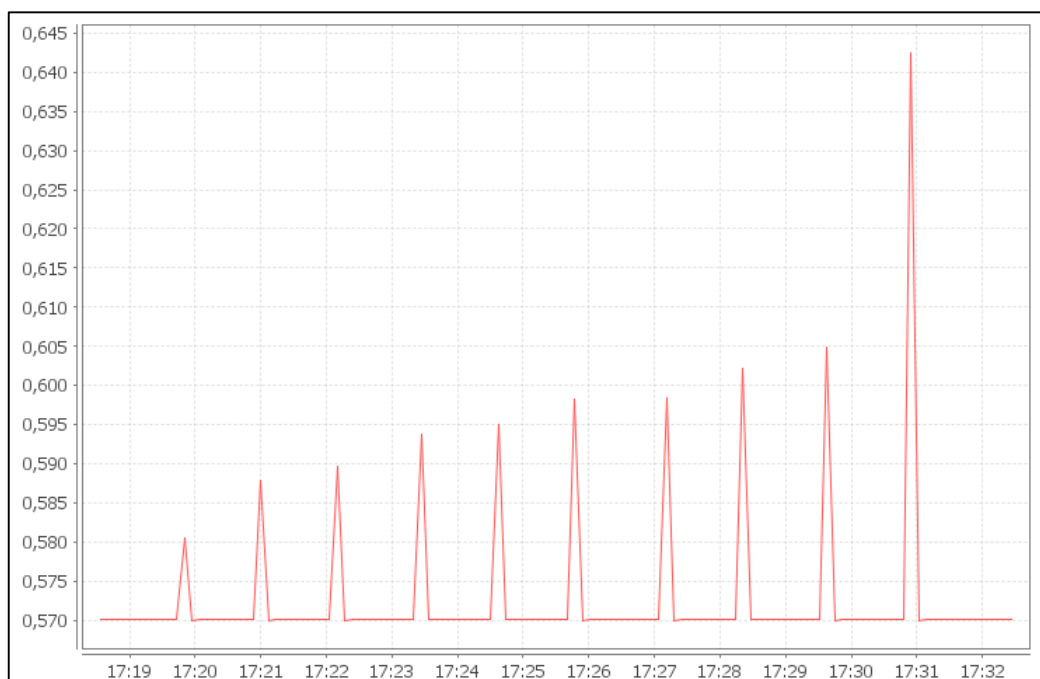
O gráfico 3 apresenta a progressão da diferença de potencial registrada para cada amostra de partículas, com base nas medições realizadas com o osciloscópio. A figura 59 exibe o registro correspondente das leituras coletadas a partir tela de gráficos do ScadaBR, sob as mesmas condições experimentais.

Gráfico 3 – Relação entre a diferença de potencial por tamanho de amostra.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 59 – Medição de partículas registrada no sistema supervisor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados demonstraram uma relação proporcional e coerente entre as leituras do sistema supervisor e do osciloscópio durante a passagem das partículas pelo sensor, destacando a sensibilidade do sensor às variações causadas pelas partículas ferrosas.

Observou-se que, à medida que as partículas atravessavam o interior do sensor, ocorria uma alteração progressiva na diferença de potencial. Verificou-se também que partículas de maior dimensão geravam variações com maior amplitude no sinal, evidenciando uma maior sensibilidade do sensor a partículas maiores. Ou seja, o aumento no tamanho da partícula resultou em um incremento proporcional da diferença de potencial medida, reforçando a capacidade do sistema em distinguir diferentes magnitudes de contaminação metálica.

Além disso, o comportamento do sinal indicou boa linearidade na resposta às diferentes amostras, bem como consistência durante a aproximação, passagem e afastamento das partículas. Esses resultados confirmam a capacidade do protótipo em identificar e quantificar variações relacionadas à presença de partículas ferrosas na tubulação, reforçando sua aplicabilidade em sistemas de monitoramento em tempo real.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da relevância de monitorar continuamente as condições do óleo lubrificante para evitar falhas prematuras, desgaste excessivo de componentes e paradas não planejadas, através da realização da manutenção preditiva, este trabalho propôs o estudo e o desenvolvimento de um sistema de monitoramento e análise de óleo em tempo real com a finalidade de detectar variáveis críticas como temperatura, presença de partículas ferrosas e teor da água no óleo.

Por meio da implementação de um sensor de temperatura baseado na medição de resistência ôhmica, juntamente com o desenvolvimento de um sensor capacitivo e de um sensor indutivo, buscou-se criar uma solução prática, eficaz e de fácil aplicação em sistemas de lubrificação hidráulica.

Essa abordagem é motivada pelo fato de que a contaminação por água ou por partículas ferrosas, bem como o aquecimento excessivo do lubrificante, constituem os principais fatores responsáveis pela redução significativa da capacidade de lubrificação, ocasionando desgaste prematuro dos componentes, acelerando processos corrosivos e comprometendo a confiabilidade operacional dos equipamentos. Dessa forma, reforça-se a necessidade de um sistema capaz de identificar essas condições de maneira rápida, precisa e contínua.

Durante o desenvolvimento do projeto, foram identificados os sensores mais adequados, aprofundado o entendimento de seus princípios de funcionamento e conduzidas as etapas de construção e ensaio dos sensores destinados à detecção de partículas ferrosas e ao monitoramento do teor de água no óleo. Os resultados obtidos nos testes, demonstraram a viabilidade técnica da proposta e confirmaram o desempenho esperado dos sensores.

O sensor capacitivo apresentou resposta progressiva e consistente à variação do teor de água no óleo, evidenciada pelo aumento significativo na capacitância à medida que maiores volumes de água foram adicionados às amostras. O sensor RTD PT100 demonstrou comportamento linear e confiável na medição de temperatura, com resultados compatíveis com os valores de referência obtidos por termopar, validando sua precisão em diferentes faixas de térmicas. O sensor indutivo por sua vez, demonstrou capacidade de detectar partículas ferrosas de pequenas dimensões, apresentando variações nítidas de tensão observadas tanto no osciloscópio quanto no sistema supervisor, comprovando sua sensibilidade às alterações no campo magnético.

Os componentes empregados permitiram a construção de um sistema acessível, modular e de fácil integração. O conjunto de scripts implementado no software ScadaBR, aliado à comunicação Modbus RS-485 dos dispositivos, viabilizou a supervisão em tempo real, a

identificação de falhas críticas através de alarmes e o acionamento do circuito de circulação de óleo, elevando a eficiência operacional do conjunto. O desenvolvimento do sistema supervisório também proporcionou uma interface gráfica intuitiva e de fácil utilização, reforçando a aplicabilidade e a viabilidade prática da solução proposta.

Os resultados obtidos demonstraram comportamento estável e repetitivo, validando tanto o método de detecção quanto o circuito de condicionamento de sinal. Além disso, a resposta do sistema evidenciou sua capacidade de identificar níveis de contaminação capazes de comprometer a lubricidade do óleo, permitindo a adoção de ações preventivas antes que ocorram danos mais severos.

Desta forma, conclui-se que o sistema desenvolvido é viável, funcional e adequado para aplicações de monitoramento contínuo, apresentando facilidade de operação, integração direta com sistemas supervisórios e viabilidade para uso em aplicações industriais. A solução proposta contribui de forma significativa para estratégias de manutenção preditiva, ao permitir a identificação rápida e confiável da presença de contaminantes, reduzindo o risco de falhas, custos de manutenção e o tempo de máquina parada, além de aumentar a segurança operacional e a vida útil dos equipamentos lubrificados.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para a continuidade deste trabalho, alguns aprimoramentos podem ser explorados em pesquisas futuras, como a implementação de um circuito amplificador operacional diferencial, por meio do desenvolvimento de uma bobina adicional de detecção e outra de excitação para o sensor de partículas ferrosas. Além disso, recomenda-se a elaboração de uma placa de circuito impresso dedicada, integrando o circuito retificador, o filtro passa-baixa ativo e o estágio de amplificação operacional.

REFERÊNCIAS

- ABECOM. **Análise de óleo:** importante ferramenta para monitorar as condições de um equipamento. [S. l.: s. n], 21 fev. 2024. Disponível em: <<https://www.abecom.com.br/analise-de-oleo/>>. Acesso em: 13 mai. 2025.
- ABECOM. **Lubrificação industrial:** Dicas de métodos, ferramentas e tipos de lubrificantes industriais. [S. l.: s. n], 15 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.abecom.com.br/lubrificacao-industrial-mecanica/>>. Acesso em: 06 mai. 2025.
- ABECOM. **Quais as diferenças entre Manutenção Preditiva e Preventiva?** [S. l.: s. n], 25 jan. 2022. Disponível em: <<https://www.abecom.com.br/manutencao-preditiva-e-preventiva-diferencas/>>. Acesso em: 12 mai. 2025.
- ALMEIDA, Abel Resina de. **Monitoramento das condições dos lubrificantes.** In: GEARS & TRANSMISSIONS Workshop, 2003; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 5 jun. 2003, Portugal. Título original: Lubricant Condition Monitoring. Disponível em: <https://www.academia.edu/69851903/Lubricant_Condition_Monitoring>. Acesso em: 01 mai. 2025.
- ARAÚJO, Gustavo Santos Rodrigues; OLIVEIRA, Lucas Batista; JÚNIOR, Valter Angelo Fonseca; MACHADO, Jefferson: **ANÁLISE DOS ÓLEOS LUBRIFICANTES EM EQUIPAMENTOS MÓVEIS DE GRANDE PORTE NA MINERAÇÃO.** Anais do 1º Simpósio de TCC, das faculdades FINOM e Tecsoma. 2019; 1154-1167p. Disponível em: <<https://finom.edu.br/assets/uploads/cursos/tcc/2021042218042324.pdf>>. Acesso em: 13 mai. 2025.
- ARGO-HYTOS. **Manual de Operação:** OPCom FerroS. [S. l.], Argo-Hytos, set. 2023. Título original: Operating Manual: OPCom FerroS. Disponível em: <https://www.argo-hytos.com/fileadmin/user_upload/Manual_OPCom_Ferros_100.55_EN_1124.pdf>. Acesso em: 19 mai. 2025.
- ARGO-HYTOS. **Manual de Operação:** Sensor de Condição de óleo – LubCos H2O. [S. l.], Argo-Hytos, mai. 2020. Título original: Operating Manual: Oil Condition Sensors – LubCos H2O. Disponível em: <https://www.argohtyos.com/fileadmin/user_upload/Manual_LubCos_H2O_100.00_EN_1124.pdf>. Acesso em: 19 mai. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5462/1994:** Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- BENÍTEZ, L. Cálculo do erro absoluto e do erro relativo. YuBrain, 2020. Disponível em: . Acesso em: 20 nov. 2024.
- CORDEIRO, Erik. **O papel dos lubrificantes industriais.** [S. l.], Revista Manutenção, 07 nov. 2022. Disponível em:

<<https://revistamanutencao.com.br/literatura/tecnica/manutencao/o-papel-dos-lubrificantes-industriais.html>>. Acesso em: 09 mai. 2025.

CORDEIRO, Maurício. **Diferença entre RTD de 2 fios, RTD de 3 fios e RTD de 4 fios.** [S. l.], WIX, 27 dez. 2019. Disponível em: <<https://mauricioscordeiro.wixsite.com/instrumentacao/post/diferen%C3%A7a-de-rtd-2-fios-3-fios-e-4-fios>>. Acesso em: 08 jun. 2025.

COSTA, Mardey. **Tabela PT100 com variação da resistência e temperatura.** [S. l.], Viver de Elétrica, 06 set. 2024. Disponível em: <<https://viverdeeletrica.com/tabela-pt-100/>>. Acesso em: 16 mai. 2025.

DE PAULI, Evandro Armini; ULIANA, Fernando Saulo. **Mecânica: Lubrificação.** Espírito Santo: SENAI, 1997. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM285/Conte%FAdos/Complementos/Apostila%20Lubrificacao.pdf>>. Acesso em: 07 mai. 2025.

DEY, Anup Kumar. **O que é pump SKID e quais são suas vantagens?.** [S. l.], What is piping, set. 2023. Título original: What is a Pump Skid and what are its advantages? Disponível em: <<https://whatispiping.com/pump-skids/>>. Acesso em: 20 mai. 2025.

ENGINEERS, L. M. **Interface DHT11 Module With Arduino.** [S. l.: s. n], 2022. Disponível em: <<https://lastminuteengineers.com/dht11-module-arduino-tutorial/>>. Acesso em: 07 jun. 2025.

GOMES, Pedro César Tebaldi. **Desvio padrão: conceito, cálculo e aplicações práticas.** [S. l.], datageeks, 13 mai. 2024. Disponível em: <<https://www.datageeks.com.br/desvio-padrao/>>; Acesso em 14 out. 2025.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física - Eletromagnetismo.** Grupo Gen - LTC, v. 3, ed. 10, Rio de Janeiro, 2016.

INEGI. **Laboratório de análises de lubrificantes.** [S. l.: s. n], Inegi driving science & innovation [entre 2012 e 2025]. Disponível em: <<https://www.inegi.pt/pt/servicos/servicos-laboratoriais/laboratorios/laboratorio-de-analise-de-lubrificantes/>>. Acesso em: 11 mai. 2025.

INFRASPEAK. **Diferenças entre manutenção preventiva e manutenção preditiva.** [S. l.], Infrasppeak blog, 15 abr. 2024. Disponível em: <<https://blog.infrasppeak.com/pt-br/manutencao-preventiva-manutencao-preditiva/>>. Acesso em: 12 mai. 2025.

INMETRO. **Avaliação de dados de medição - Guia para expressão da incerteza de medição.** Grupo de trabalho para tradução do GUM 2008, ed. 1, Rio de Janeiro, 2008.

MELLO, Marcio. **Placa ESP32: Descubra o que é, para que serve e muito mais!** [S. l.], Victor Vision, 6 nov. 2023. Disponível em: <<https://victorvision.com.br/blog/placa-esp32/#:~:text=A%20ESP32%20%C3%A9%20uma>>. Acesso em: 26 set. 2025.

MENDES, Sarah Silveira. **ESTUDO DA DINÂMICA DE LUBRIFICAÇÃO EM UM SISTEMA MECÂNICO MANCAL DESLIZANTE**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Graduação em Engenharia Mecânica. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2014. Disponível em: <<https://www2.ufjf.br/mecanica/files/2016/07/TccSarahMendes.pdf>>. Acesso em: 10 mai. 2025.

NOVUS. **DigiRail-2A Manual de Instruções**. [S. l.: s. n.: s.d].

NORIA. **Uma história da análise de óleo**. [S. l.: s. n], 2 mai. 2023. Disponível em: <<https://www.noria.com.br/uma-historia-da-analise-de-petroleo/>>. Acesso em: 12 mai. 2025.

POLEY, Jack; MURPHY, Michael. **A História da Análise de Óleo**. [S. l], Noria, 2007. Título original: The History of Oil Analysis. Disponível em: <<https://www.machinerylubrication.com/Read/1113/history-of-oil-analysis>>. Acesso em: 08 abr. 2025.

RADETIĆ, Radojle; PAVLOV-KAGADEJEV, Marijana; MILIVOJEVIĆ, Nikola. **A linearização analógica de característica de trabalho PT100**. Sérvia: Serbian Journal of Electrical Engineering, 03 out. 2015. Título original: The Analog Linearization of Pt100 Working Characteristic. Disponível em: <<https://doiserbia.nb.rs/Article.aspx?id=1451-48691503345R>>. Acesso em: 14 mai. 2025.

SARAIVA. **Sensor de temperatura sonda 4mm x 30mm 1 metro RTD PT100**. [S. l.], Saraiva materiais técnicos, 2025. Disponível em: <<https://www.saravati.com.br/sensor-de-temperatura-sonda-4mm-x-30mm-1-metro-rtd-pt100.html>>. Acesso em: 08 jun. 2025.

SILVA, Renan Favarão. **Crescimento da confiabilidade no processo de lubrificação de redutores com Sistema de blindagem**. 2015. Monografia (Especialização) – Pós Graduação em Engenharia da Confiabilidade. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 07 mar. 2015. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/18670>>. Acesso em: 10 mai. 2025.

SIQUEIRA, Patrícia. **Qual o significado da nomenclatura “PT100 Ω a 0°C”?**. [S. l.], Treetech Tecnologia, 3 ago. 2022. Disponível em: <<https://sac.treetech.com.br/pt-BR/support/solutions/articles/69000799368-qual-o-significado-da-nomenclatura-pt100-%CF%89-a-0-c->>. Acesso em: 16 mai. 2025.

SYSTEMS, E. **ESP32 Series - Datasheet**. 2019.

TEXAS INSTRUMENTS. **Analog Linearized 3-Wire PT100 RTD to 2-Wire 4-20mA Current Loop Transmitter Reference Design**. [S. l.], Texas Instruments Incorporated, out. 2015. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ug/tiduac6/tiduac6.pdf?ts=1749369003759>>. Acesso em: 08 jun. 2025

TEXAS INSTRUMENTS. **XTR105 4-20mA current transmitter with sensor excitation and linearization**. [S. l.], Texas Instruments Incorporated, 2024. Disponível em:

<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/xtr105.pdf?ts=1749411945832&ref_url=https%253A%252F%252Fbr.mouser.com%252F>. Acesso em: 08 jun. 2025.

VEDAN, Alex. **Lubrificação industrial:** tipos de lubrificantes e métodos. [S. l.], Tractian, 28 abr. 2025. Disponível em: <<https://tractian.com/blog/lubrificacao-industrial-entenda-os-tipos-e-sua-importancia>>. Acessado em: 07 mai. 2025.

WEG. **Manual de programação.** Série: TPW-040. [S. l.: s. n], nov. 2023.

WEG. **Manual do usuário.** Série: TPW-040. [S. l.: s. n], nov. 2023.