



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

João Alexandre da Câmara Silva

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO PARA  
ANÁLISE DE ÓLEOS INDUSTRIAIS  
PROJETO DE I&D LUBSYSTECH**

**VOLUME 1**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica na  
Especialidade de Produção e Projeto orientado pelo Professor Doutor Amílcar Lopes  
Ramalho e pelo Professor Doutor Jaime Batista dos Santos, apresentada ao  
Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias.**

Junho de 2019



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

## **Desenvolvimento de um protótipo para análise de óleos industriais**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

### **Development of a prototype for industrial oils analysis**

**Autor**

**João Alexandre da Câmara Silva**

**Orientadores**

**Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho**

**Professor Doutor Jaime Batista dos Santos**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Orientador** Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho  
Professor Catedrático da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor Mário António Simões Correia  
Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Leiria

**Colaboração Institucional**

---



**Instituto de soldadura e qualidade**

**Coimbra, junho, 2019**



” The future depends on what you do today”

Mahatma Gandhi

À minha família e amigos



## Agradecimentos

*Um agradecimento especial às pessoas que colaboraram e me ajudaram na realização deste trabalho:*

*Ao Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho  
pela oportunidade, orientação e ensinamentos*

*Ao meu colega João Vasco Mendes Pereira  
por toda a disponibilidade e ajuda demonstrada*

*A minha família  
por todo o apoio e incentivo dado durante este percurso académico*

*Aos meus amigos e namorada  
pelos momentos de alegria e espírito de entreatajuda proporcionados ao longo destes anos*





## Resumo

A manutenção condicionada é um tipo de manutenção subordinada a um acontecimento predeterminado. As ações de manutenção são desencadeadas quando se atingem valores críticos associados ao funcionamento do equipamento. Este tipo de manutenção é caracterizada pelo uso de sensores cuja informação obtida através destes é confrontada com valores de alarme predefinidos, requerendo para isso uma vigilância periódica ou permanente dos equipamentos em causa.

O objetivo primordial deste trabalho é auxiliar o desenvolvimento de um dispositivo para análises de óleos industriais, que terá como objetivo da sua utilização a implementação neste género de manutenção. Utilizando o mercado atual como ponto de partida, a intenção passa por melhorar diversas características no que diz respeito a recolha e caracterização dos óleos. A otimização destes parâmetros foi feita através de diversos processos iterativos, com a finalidade de produzir um protótipo capaz de competir com os concorrentes de mais alto nível no mercado atual.

Este trabalho expõe as principais técnicas utilizadas na produção do protótipo em causa e explica o impacto que diferentes parâmetros tem na caracterização do óleo e, consequentemente, da sua importância a nível industrial.

No final, o trabalho de otimização e calibração dos sensores contou com mais de trinta ensaios, em que se observou o comportamento do dispositivo quando solicitado aos diferentes testes impostos, de modo a perceber a sua resposta perante parâmetros críticos na análise de óleos.

O resultado do projeto culminou em um protótipo capaz de analisar vários parâmetros do óleo diretamente relacionados com a sua degradação assim como perceber o estado de saúde do equipamento que alimenta, permitindo assim às equipas de manutenção agir proactivamente.

**Palavras-chave:** Monitorização, Calibração, Otimização, Óleo, Partículas, Manutenção.



## Abstract

Condition based maintenance is a type of maintenance that is subordinated to a default event. Maintenance actions are unleashed when critical values associated to the operation of the equipment are reached. This kind of maintenance is characterized by the use of sensors. The information that is captured is confronted with predefined alarms, requiring a periodic or permanent control of the equipment.

The principal goal of this dissertation is to assist the development of a device intended to analyze industrial oils, that are aimed to be used in this kind of maintenance. Using the current market as a starting point, the objective is to improve several characteristics as far as collecting and analyzing oils is concerned. The optimization of these parameters was performed through several iterative processes, in order to produce a prototype capable of competing with the top manufacturers of the current market.

This paper presents the techniques used in the production of this prototype and explains the impact of different parameters on the characterization of the oil and, consequently, its industrial importance and relevance.

In the end, the work of optimization and calibration of the sensors counted more than thirty tests, in which the performance of the device was observed when requested by different tests, with the purpose to understand the answer towards critical parameters in an oil analyzes.

The result of the project culminated in a prototype capable of analyzing various oil parameters directly related with the degradation as well as to perceive the state of the equipment that it feeds, thus allowing the maintenance team to act proactively.

**Keywords** Monitoring, Calibration, Optimization, Oil, Particle, Maintenance.



## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xi
Simbologia e Siglas .....	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas .....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Projeto de I&D LubSysTech.....	2
1.2. Contribuição do Autor .....	3
1.3. Estrutura do Trabalho .....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1. Impacto do Projeto .....	5
2.2. Função dos Óleos e Sua Utilização na Indústria.....	6
2.3. Óleo em Manutenção Condicionada.....	7
2.4. Mercado Atual .....	8
2.4.1. Tipos de Equipamentos .....	8
2.1. Caracterização do Óleo .....	12
2.1.1. Contaminação .....	12
2.1.2. Viscosidade.....	13
2.1.3. Fluídos não Newtonianos .....	13
2.1.4. Oxidação.....	14
2.1.5. Permissividade.....	15
2.1.6. Presença de Água.....	16
2.1.7. Humidade Relativa .....	16
2.1.8. Partículas .....	17
2.1.9. Morfologia das Partículas.....	18
2.1.10. Número Total de Ácido .....	18
2.1.11. Flashpoint.....	19
2.2. Noções Teóricas de Calibração de Sensores.....	19
2.2.1. Modelos Lineares .....	20
2.3. Noções Teóricas da Utilização de Ultrassons.....	21
3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL .....	23
3.1. Metodologia .....	23
3.1.1. Presença de Água.....	23
3.1.2. Presença de Partículas .....	25
3.2. Equipamentos e <i>Software</i> Utilizados na Aquisição de Dados .....	25
3.2.1. Placa LAUNCHXL-F28379D .....	26
3.2.2. Módulo GPRS Quad Band .....	26
3.2.3. Sensores .....	27
3.2.4. LubCos Visc + .....	27
3.2.5. LubCos H <sub>2</sub> O .....	28

3.2.6.	OPCom FerroS .....	29
3.2.7.	Ultrassons .....	29
3.2.8.	Bomba Peristáltica.....	30
3.2.9.	Célula Laboratorial.....	31
3.2.10.	Shell Tellus S2 M 46 .....	32
3.2.11.	Balança de Precisão AND GH-202 .....	33
3.2.12.	Placa de Aquecimento .....	34
3.2.13.	Multímetro .....	34
4.	CALIBRAÇÃO DOS SENSORES .....	37
4.1.	Sensor de Temperatura .....	37
4.2.	Sensor de Viscosidade .....	40
4.3.	Sensor de Partículas Ferromagnéticas .....	43
4.4.	Sensor de Humidade Relativa.....	46
5.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	49
5.1.	Resposta do Sensor de Temperatura.....	49
5.2.	Resposta do Sensor de Viscosidade.....	51
5.3.	Resposta do Sensor de Presença de Água .....	52
5.4.	Resposta do Sensor de Partículas Ferromagnéticas.....	54
5.5.	Resposta do Sensor Permissividade .....	55
5.6.	Interferências Cruzadas .....	56
6.	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	59
6.1.	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	61
	ANEXO A.....	64
	[ANEXO B].....	66
	APÊNDICE A .....	68
	APÊNDICE B .....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. <i>MiniLab 153</i> (Spectro Scientific, 2017).....	9
Figura 2.2. <i>MicroLab 40</i> (Spectro Scientific, 2017).....	9
Figura 2.3. <i>PCM500</i> (Pall Corporation, janeiro 2017).....	10
Figura 2.4. <i>X-Supreme8000</i> (Oxford Instruments, 2015).....	11
Figura 2.5. <i>OTS100AF</i> (Megger, 2016).....	11
Figura 2.6. <i>Curvas de tensão de cisalhamento versus taxa de deformação</i> (Eliomar Evaristo FerreiraI; et al., 2005) .....	14
Figura 2.7. Exemplo da diversidade de partículas presentes numa amostra de óleo e sua respectiva classe (AMETEK, 2013).....	18
Figura 2.8. Princípio de funcionamento de um sensor de ultrassons (Thomsen, 2011).....	22
Figura 3.1. <i>Microcontrolador F28379D</i> (Texas Instruments, 2018) . .....	26
Figura 3.2. <i>GSM GL685-Quad</i> (Telit Communications, 2016).....	26
Figura 3.3 <i>Sensor LubCos Visc +</i> (Argo-Hytos, 2015).....	28
Figura 3.4 <i>Sensor LubCos H<sub>2</sub>O</i> (Argo-Hytos, 2015). .....	28
Figura 3.5 <i>Sensor OPCom FerroS</i> (Argo-Hytos, 2015).....	29
Figura 3.6 <i>Sonda ultrassons</i> (Olympos®, 2006).....	30
Figura 3.7 <i>Bomba peristáltica</i> . .....	30
Figura 3.8. <i>Célula laboratorial</i> (LubSysTech, 2019): (a) Modelação 3D; (b) Montagem final.....	31
Figura 3.9 <i>Shell Tellus S2 M 46</i> (Tellus, 2010).....	33
Figura 3.10 <i>Balança de alta precisão A&amp;D Company, Ltd GH-202</i> . .....	34
Figura 3.11 <i>Placa de aquecimento</i> . .....	34
Figura 3.12 <i>Multímetro Brymen®</i> , <i>BM252s</i> . .....	35
Figura 4.1 <i>Gráfico representante da relação entre a temperatura real e a resposta do sensor, contendo os pontos de calibração obtidos através do teste estático e a respetiva reta de calibração</i> . .....	39
Figura 4.2 <i>Gráfico representante da relação entre a viscosidade real e a resposta do sensor, contendo os pontos de calibração obtidos através da análise da figura apresentada no ANEXO A</i> . .....	43
Figura 4.3 <i>Gráfico representante da relação entre as partículas ferromagnéticas e a resposta do sensor, contendo os pontos de calibração obtidos através dos testes às amostras P1, P2, P3 e P4</i> . .....	45

Figura 4.4 <i>Gráfico representante da relação entre a variação da humidade relativa e a resposta do sensor, contendo os pontos de calibração obtidos através dos testes às amostras HR1, HR2, HR3 e HR4.</i> .....	47
Figura 5.1 <i>Resultados do sensor LubCos Visc +, canal correspondente à temperatura.</i> ...	50
Figura 5.2 <i>Derivada do sinal LubCos Visc +, canal correspondente à temperatura.</i> .....	50
Figura 5.3 <i>Resultados do sensor LubCos Visc +, canal correspondente à viscosidade.</i> ....	51
Figura 5.4 <i>Resultados do sensor LubCos H<sub>2</sub>O, canal correspondente à humidade relativa (Teste 1).</i> .....	52
Figura 5.5 <i>Derivada do sinal LubCos H<sub>2</sub>O, canal correspondente à humidade relativa (Teste 1).</i> .....	53
Figura 5.6 <i>Resultados do sensor LubCos H<sub>2</sub>O, canal correspondente à humidade relativa (Teste 2).</i> .....	53
Figura 5.7. <i>Resposta do sensor OPCom FerroS: (a) Amostra com 350 ppm; (b) Amostra com 500 ppm.</i> .....	55
Figura 5.8 <i>Resultados do sensor LubCos Visc +, canal correspondente à permissividade.</i> .....	55
Figura 5.9 <i>Derivada do sinal LubCos Visc +, canal correspondente à permissividade.</i> .....	56
Figura A0.1 <i>Gráfico representante da evolução da viscosidade com a temperatura do Shell Tellus S2 M 46.</i> .....	64
Figura A.1 <i>Célula laboratorial 0.1, vista de lado (LubSysTech, 2019).</i> .....	68
Figura A.2 <i>Célula laboratorial 1.1, vista de lado (LubSysTech, 2019).</i> .....	68
Figura A.3 <i>Célula laboratorial 2.1, vista de lado (LubSysTech, 2019).</i> .....	69
Figura B.1 <i>Célula laboratorial, vista de lado (LubSysTech, 2019).</i> .....	70
Figura B.2 <i>Célula laboratorial, vista de frente (LubSysTech, 2019).</i> .....	70



---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Preparação das amostras destinadas aos testes de Humidade Relativa. ....	24
Tabela 3.2. Preparação das amostras destinadas aos testes de presença de partículas ferromagnéticas. ....	25
Tabela 3.3. Características físicas do Shell Tellus S2 M 46 (Tellus, 2010).....	33
Tabela 4.1. Resultados obtidos para calibração do sensor de temperatura LubCos Visc +	38
Tabela 4.2. Valores retirados do diagrama da Erro! A origem da referência não foi encontrada. (Tellus, 2010).....	41
Tabela 4.3. Resultados obtidos para calibração do sensor de viscosidade LubCos Visc +.	42
Tabela 4.4. Resultados obtidos para calibração do sensor de partículas OPCom FerroS ...	44
Tabela 4.5. Resultados obtidos para calibração do sensor de água LubCos H <sub>2</sub> O. ....	46
Tabela 5.1. Interferências cruzadas na resposta dos sensores, adição de água, partículas ferromagnéticas e sílica .....	57



## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$\mu$  – Viscosidade dinâmica

$B_0$  – Offset da resposta

$B_1$  – Sensibilidade do sistema

$C$  – Velocidade do som

$C_0$  – Capacitância da célula vazia

$C_x$  – Capacitância da célula cheia de óleo

$d$  – Distância

$E$  – Campo eléctrico

$M_{H_2O}$  – Massa de água

$M_{\text{óleo}}$  – Massa de óleo

$P$  – Polarização

$Ppm_{H_2O}$  – Quantidade de água em partes por milhão

$T$  – Tempo

$\epsilon_0$  – Permissividade do vácuo

$\epsilon_r$  – Constante dielétrica

$\rho$  – Massa específica do fluido

$\nu$  – Viscosidade cinemática

$\chi$  – Suscetibilidade

### Siglas

ADC – Conversos Analógico-Digital

ASTM – American Society for Testing and Materials

FEADER – Fundo Europeu Agrícola de Desenvolvimento Regional

FEAMP – Fundo Europeu dos Assuntos Marítimos e das Pescas

FEDER – Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional

FSE – Fundo Social Europeu

GPRS – General Packet Radio Service

HR – Humidade Relativa

IR – Espectroscopia de Infravermelho

ISO – International Organization for Standardization

KOH – Hidróxido de Potássio

NAs – Ácidos Naftênicos

PF – Partículas Ferromagnéticas

POCI – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização

SI – Sistema de Incentivo às Empresas

TAN – Número Total de Ácido

TBN – Número de Base Total

XRF – Fluorescência de Raio-X

## 1. INTRODUÇÃO

As primeiras análises eram feitas em laboratórios especializados que se situavam a uma grande distância do local de recolha da amostra. Consoante a análise de óleos foi aumentando e tornando-se cada vez mais popular a exigência por um processo mais rápido tornava-se cada vez mais uma obrigação. Nos anos 80 os laboratórios responsáveis por este tipo de análises começaram a abrir filiais de forma a cobrir uma maior área geográfica com o objetivo de diminuir o tempo de retorno dos resultados (Poley, 2007).

É então que com o melhoramento do peso e do tamanho dos sensores, conjugado com o desenvolvimento tecnológico, tornou possível novas formas de proceder a este tipo de análise. No entanto, com os primeiros instrumentos analíticos usados para analisar os óleos a apresentar problemas com a sensibilidade, precisão, repetibilidade e fiabilidade fez com que vários fabricantes, apesar de os terem fabricado, não avançassem para a fase de produção por estes não apresentarem valores suficientemente discriminatórios em relação aos resultados obtidos em laboratório (Poley, 2007).

Com a constante evolução destes componentes ao longo dos anos, hoje em dia, os sensores são cada vez mais precisos e específicos, abrangendo propriedades como a viscosidade, a água, a contagem de partículas, entre outras propriedades mais singulares. A substituição da tradicional análise dos óleos, em deterioramento de um novo dispositivo portátil capaz de fornecer a mesma quantidade de informação, deixa espaço para a elaboração de novas pesquisas científicas assim como o desenvolvimento de novas técnicas de medição, na qual assenta esta dissertação de mestrado.

O protótipo a ser construído, representa a necessidade de um dispositivo portátil capaz de fornecer a informação necessária, com um elevado nível de credibilidade, em relação às análises provenientes dos laboratórios especializados, reduzindo assim o tempo entre a recolha da amostra e a obtenção de resultados. O princípio base no desenvolvimento deste dispositivo consiste na elevada precisão dos sensores aliadas a uma excelente calibração, garantindo assim resultados admissíveis. Um dos aspetos chave no projeto em causa é identificar os parâmetros a ser analisados e a sua consequência na vida útil do óleo

e do equipamento, de modo a perceber a necessidade do seu estudo e do seu aparecimento aquando da apresentação de resultados.

O objetivo deste trabalho foi então criar um dispositivo capaz de responder as solicitações exigidas. O desenho do protótipo foi efetuado recorrendo ao Solidworks como *software* CAD, onde se procedeu a diferentes tipos de iterações até chegar ao modelo contruído. Posto isto, foi necessário verificar todos os restantes componentes que complementaram o dispositivo, desde vedantes a ligações roscadas necessárias para o correto funcionamento do mesmo. Foi também efetuada a soldadura de diversos componentes com o intuito de não só tornar o equipamento mais robusto, mas também vedar melhor o circuito por onde percorre o óleo de modo a evitar contaminações exteriores.

Este trabalho expõe toda a metodologia adotada ao longo do projeto, permitindo perceber quais as otimizações feitas e os passos percorridos para que o dispositivo final seja o mais compacto possível e apresente níveis de credibilidade semelhantes aos obtidos pelos laboratórios.

### **1.1. Projeto de I&D LubSysTech**

Portugal 20 trata-se de um acordo de parceria entre Portugal e a Comissão Europeia sustentado por cinco Fundos Europeus Estruturais e de Investimento – FEDER, Fundo de Coesão, FSE, FEADER e FEAMP.

No âmbito do domínio “Competitividade e Internacionalização” do Portugal 20 o Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) tem como principal objetivo reforçar a competitividade da economia portuguesa e a sua presença no mercado internacional. Este programa tem como finalidade contribuir para a criação de uma economia mais competitiva, baseada em atividades de conhecimento, bens e serviços transacionáveis.

O projeto I&D LubSysTech, cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do POCI, nos termos do Aviso 03/SI/2017 do Portugal 20, de acordo com o Sistema de Incentivo às Empresas (SI), regulado pela portaria 57-A/2015 de 27 fevereiro, foca-se no desenvolvimento de capacidades inovadoras de inspeção e monitorização de lubrificantes industriais em serviço e no desenvolvimento de algoritmos de diagnóstico e previsão que permitam, em tempo reduzido, auxiliar a gestão da

manutenção na tomada de decisões relativa às ações a tomar sobre os lubrificantes e sobre a manutenção dos equipamentos.

## **1.2. Contribuição do Autor**

O presente projeto pretende desenvolver um dispositivo móvel que permita avaliar a monitorização da condição dos óleos utilizados em ambiente industrial. Os dados obtidos são recolhidos através da análise dos sensores utilizados para o efeito, em tempo real.

As constantes alterações a que um óleo fica sujeito ao longo da sua vida útil não podem ser evitadas, no entanto podem ser controladas através da sua monitorização. A quantificação destas alterações é realizada tendo por base diversas normas ISO (International Organization for Standardization) e ASTM (American Society for Testing and Materials). Para a presença de água no óleo temos por base a norma ASTM D95, para a viscosidade a ISO 3448 e para as partículas a norma ISO 4406. Contudo, é importante referir que as normas apresentadas não são exclusivamente referentes a monitorização da condição do óleo, no entanto irão servir de suporte para o presente estudo.

## **1.3. Estrutura do Trabalho**

O presente relatório encontra-se dividido em seis capítulos: Introdução, revisão bibliográfica, desenvolvimento experimental, calibração dos sensores, apresentação de resultados e consequente discussão, conclusão e sugestões para trabalhos futuros. Primeiramente, na introdução apresenta-se um breve resumo do tema em estudo assim como os objetivos que se pretendem alcançar. No capítulo dois, revisão bibliográfica, são descritos os conceitos base utilizados ao longo do trabalho, salientando os diversos parâmetros na caracterização e discriminação do óleo, assim como uma análise de mercado fundamental no desenvolvimento de um projeto. Também são apresentadas as noções base da utilização dos óleos em ambiente industrial assim como a monitorização da condição dos mesmos para a implementação de uma manutenção proativa nos equipamentos. O capítulo três aborda o desenvolvimento experimental utilizado no presente estudo, onde se descreve em pormenor todos os equipamentos utilizados para a obtenção dos resultados que servem de base para a realização desta dissertação, assim como o método como foram obtidos e tratados esses

mesmo dados. De seguida, no capítulo quatro é feita a descrição do procedimento referente à calibração dos sensores assim como as respetivas retas de calibração. No capítulo cinco é feita a apresentação dos resultados obtidos e conseqüente discussão dos mesmos. Por fim, no sexto e último capítulo expõem-se as conclusões alcançadas e apresentam-se algumas sugestões de possíveis trabalhos futuros relativamente a monitorização da condição de óleos industriais através de um dispositivo portátil.



## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O presente capítulo, revisão bibliográfica, serve como auxílio para uma melhor análise e interpretação dos dados obtidos para a realização do relatório, assim como uma análise do mercado atual.

O objetivo é fornecer ao leitor os fundamentos necessários para uma correta compreensão das análises feitas nesta dissertação, assim como do impacto do presente projeto na indústria de hoje.

### **2.1. Impacto do Projeto**

O acompanhamento do desenvolvimento do projeto LubSysTech permitiu-me expandir o meu conhecimento na área de gestão e lubrificação, mais especificamente na recolha e análise de óleos, áreas estas que são de extrema importância na indústria nos dias de hoje, especialmente no que toca à manutenção preventiva.

A boa qualidade do óleo encontra-se diretamente relacionada com a longevidade dos equipamentos e com a sua otimização do custo do ciclo de vida, sendo, portanto, importante a sua monitorização ao longo do tempo. Como uma das principais funções do óleo é promover a limpeza das superfícies do equipamento, durante o seu funcionamento este fica munido de partículas que se encontram em suspensão no óleo, sendo estas uma fonte de informação crucial no que toca ao diagnóstico de avarias das máquinas bem como para condicionar o programa de manutenção preventiva.

Existem diversos tipos de análises que traduzem a qualidade do óleo, desde testes de insolubilidade, temperatura do flash point, viscosidade, oxidação, entre outros. Estas análises, regra geral, são feitas em laboratórios especializados através de amostras de óleo periodicamente recolhidas ao longo da vida dos equipamentos. Este processo sendo tradicionalmente conhecido como um processo demoroso abre espaço para uma enorme redução temporal. O desenvolvimento deste projeto permite reduzir drasticamente este tempo, permitindo as equipas de manutenção um maior poder no que toca ao desenvolvimento de um programa de manutenção preventiva. A construção de um

dispositivo portátil capaz de apresentar resultados num curto espaço de tempo com um elevado grau de credibilidade permite às empresas a implementação de uma manutenção proativa aumentando assim o potencial dos equipamentos assim como a sua taxa de produção reduzindo ainda os riscos de falhas em funcionamento.

## **2.2. Função dos Óleos e Sua Utilização na Indústria**

A função primária do uso de lubrificantes na indústria traduz-se na redução do desgaste e da fricção, proteção contra a corrosão e ferrugem, refrigeração, limpeza do sistema e remoção de contaminantes que surjam nos sistemas de lubrificação (Wakiru, Pintelon, Muchiri, & Chemweno, 2019). Os lubrificantes formam uma película de óleo na superfície dos metais, reduzindo assim o atrito sólido provocado pelo contacto metálico entre estas. No entanto, mesmo com a redução do atrito, existe sempre o aquecimento das mesmas que é produzido pelo deslizamento dos metais uns sobre os outros. Por conseguinte o calor necessita de ser dissipado, caso contrário poderá provocar problemas no equipamento, pelo que isso é também uma das funções dos lubrificantes (Reisec, 2017).

Os equipamentos que são usados por um longo período de tempo podem levar a problemas de desgaste, corrosão ou a envelhecimento, produzindo partículas que se acumulam no óleo. Este tipo de partículas diminui a vida útil dos equipamentos, pelo que uma das funções dos lubrificantes é limpar estas substâncias que vão sendo originadas ao longo do tempo. Com os metais a produzirem ferrugem quando entram em contacto com a água e oxigénio, o óleo tem o objetivo de controlar a formação da mesma, prolongando assim a vida útil do equipamento mantendo as superfícies revestidas pelo filme lubrificante.

O termo lubrificante geralmente representa óleo lubrificante ou massa lubrificante. Um lubrificante é feito através da mistura de óleos básicos com diversos aditivos. Os aditivos são produtos químicos usados para melhorar e modificar as propriedades dos lubrificantes.

Devido ao elevado número de lubrificantes industriais existentes no mercado, torna-se importante a sua classificação de forma a facilitar a sua identificação, estabelecer diferentes níveis de qualidade e promover uma mais fácil comunicação entre as partes interessadas, incluídos as equipas de manutenção. Os óleos, por exemplo, podem ser classificados tendo em conta a sua viscosidade, sendo esta classificação dada pela

International Standards Organization (ISO) e a Society of Automotive Engineers (SAE) (Wakiru et al., 2019).

O conhecimento dos óleos e dos seus aditivos ajuda a importantes decisões de manutenção, ao selecionar por exemplo um óleo que contenha aditivos incompatíveis com certas características do equipamento, estaríamos a promover uma degradação precoce da máquina e do óleo. Para lidar com este tipo de situações os programas de monitorização da condição dos lubrificantes são projetados não só para garantir uma elevada vida útil do óleo, mas também para indicar o estado de saúde dos equipamentos e identificar potenciais causas de falhas e riscos.

### **2.3. Óleo em Manutenção Condicionada**

O principal objetivo da manutenção condicionada deve-se à implementação de um sistema de inspeção que permita aos centros de decisão definir as ações a realizar tendo em conta o estado do equipamento, através de medições do seu estado e da sua comparação com limites previamente estabelecidos. Nas últimas décadas, as funções de manutenção evoluíram drasticamente devido aos avanços tecnológicos, sendo possível a monitorização de praticamente todos os equipamentos existentes no mercado (Karanović, Jocanović, Wakiru, & Orošnjak, 2018).

A implementação da manutenção condicionada em equipamentos industriais reduz significativamente os modos de falhas dos mesmos, resultando numa poupança a nível monetário, de tempo e na reputação da empresa no mercado (Karanović et al., 2018).

A monitorização dos lubrificantes é uma importante fonte de informação para uma prévia deteção de falhas, semelhantemente às análises feitas ao sangue de um ser humano para a deteção de doenças. Na indústria moderna, os óleos representam uma parte crucial na manutenção dos equipamentos. Nos últimos anos a monitorização da vida útil dos óleos tem-se tornado um tópico fundamental quer na pesquisa académica quer na indústria (Zhu, Yoon, He, Qu, & Bechhofer, 2013). O método tradicional que tem sido geralmente utilizado para a avaliação dos mesmos consiste na recolha de amostras que são retiradas de um reservatório e posteriormente enviadas para análise num laboratório especializado. Uma avaliação no local permitiria a implementação da manutenção condicionada nesta área, de tal forma que o planeamento e os custos de intervenção sejam reduzidos através da deteção prévia de falha.

Nos dias de hoje, a ação de manutenção depende sobretudo do julgamento humano (José Salgueiro, 2011). Com a realização deste trabalho, pretende-se desenvolver um protótipo capaz de avaliar quantitativamente e qualitativamente amostras de óleo recolhidas para monitorização no local de vários parâmetros associados aos lubrificantes.

No final do corrente projeto pretende-se obter um equipamento tão isento de falhas quanto possível. Deste modo, um processo de análise utilizando o dispositivo contruído, regendo-se apenas aos resultados apresentados pelo equipamento, pode ser implementado na manutenção, permitindo um diagnostico do tempo disponível para a intervenção.

## **2.4. Mercado Atual**

A constante procura de soluções aos tradicionais laboratórios de análises, e a variada concorrência do mercado atual, traduz a busca das marcas em inovarem os seus produtos. Isso facilitou o aparecimento de novos tipos de equipamentos de análise de óleos, que se apresentam no subcapítulo seguinte.

### **2.4.1. Tipos de Equipamentos**

Ao longo do tempo, diversos construtores desenvolveram diferentes ideias e conceitos, melhorando sucessivamente os equipamentos em causa tendo em conta a sua precisão e fiabilidade, que foram surgindo devido a evolução da tecnologia.

Temos como exemplo o MiniLab 153, que foi projetado tendo em conta a necessidade de monitorizar as condições do óleo em máquinas rotativas, como engrenagens, compressores e turbinas. Este equipamento fornece vários parâmetros de análise, entre eles a existência de indicativos de desgaste da máquina, contaminação e degradação química. Os limites traçados para os diferentes parâmetros são de extrema importância para o engenheiro, de forma a este determinar quando se deve tomar ações de manutenção. O MiniLab 153 inclui testes como contagem de partículas, tamanho de partículas e análise de forma, viscosidade e degradação do óleo, oxidação e número total de ácido (TAN).

Este equipamento caracteriza-se ainda por dispensar preparação da amostra, e de químicos para limpeza. Sendo apenas necessário 3 ml de óleo para fazer todos os testes

mencionados anteriormente. O *hardware* do MiniLab 153 encontra-se representado na Figura 2.1.



**Figura 2.1.** *MiniLab 153* (Spectro Scientific, 2017).

A manutenção de equipamentos móveis é diferente do caso das turbinas e caixas de engrenagens. As decisões devem ser tomadas quando o veículo ainda se encontra no centro de análises, fornecendo para isso não apenas medições, mas também um diagnóstico em tempo real, de preferência conjugado com algumas recomendações. O MicroLab 40 (Figura 2.2) é projetado para uma rápida análise do óleo. Este equipamento inclui análise ao nível do elemento para metais de desgaste, um espectrômetro IR para a química do óleo, um viscosímetro de dupla temperatura e um contador de partículas para monitorizar a contaminação de óleos hidráulicos.



**Figura 2.2.** *MicroLab 40* (Spectro Scientific, 2017).

Os principais atributos do MicroLab 40 são a automação do sistema aliado a um sistema integrado com diagnósticos e respetivas recomendações. Apenas apertando um botão, o óleo a ser analisado é retirado do frasco e os testes são executados automaticamente. Após o teste, é impresso um relatório com os diagnósticos e as recomendações pré-

estabelecidas. Um agente de limpeza é então automaticamente bombeado para o sistema para limpar todos os componentes e conexões, estando pronto para a próxima amostra.

O PCM500 (Figura 2.3), um equipamento da Pall Corporation, usa uma tecnologia de bloqueamento de malha para relatar códigos de limpeza ISO 4460 com uma elevada precisão e em menos de seis minutos.

Para além da possibilidade de obter resultados normalizados pela norma ISO, este equipamento é também capaz de monitorizar os níveis de contaminação do fluido, viscosidade e o teor de água. O PCM500 pode ser instalado permanentemente para monitorizar equipamentos críticos ou usado como um dispositivo portátil, devido à sua longa duração da bateria. Os procedimentos de autolimpeza permitem obter um elevado grau de precisão e a existência de uma interface simples de usar tornam este equipamento um dos mais populares do mercado.



**Figura 2.3.** *PCM500* (Pall Corporation, janeiro 2017).

Fabricado pela Oxford Instruments, o X-Supreme8000 (Figura 2.4) utiliza a fluorescência de raios X (XRF). Este fenómeno é utilizado para uma análise ao nível do elemento, assim como uma análise química. Os benefícios trazidos pela XRF prendem-se ao facto de não ser necessária preparação da amostra, ser feita uma análise não destrutiva ao óleo e a elevada flexibilidade para controlo de qualidade e controlo de processos em diversas indústrias como minas, petroquímicas, produtos florestais, cimento, alimentação, entre outras.

Sendo capaz de analisar dez amostras de uma vez e num curto espaço de tempo, o X-Supreme8000 tem uma elevada taxa de produtividade. A passagem de uma análise para a análise seguinte rege-se apenas a alteração da amostra, utilizando o respetivo recipiente

tendo em conta a natureza da amostra a ser analisada, não sendo necessário qualquer tipo de limpeza.



**Figura 2.4.** *X-Supreme8000* (Oxford Instruments, 2015).

Um dos testes que pode ser utilizado na determinação da qualidade do óleo é o teste de tensão de rotura, onde é medida a capacidade de o óleo aguentar o *stress* elétrico. Uma baixa tensão de rotura pode significar a presença de contaminantes, água ou outro tipo de partículas. Neste caso, deve-se tomar em especial atenção aquando da preparação da amostra e consequente limpeza do equipamento, de forma a não aparecerem contaminantes exteriores ao processo.

Os equipamentos de análise de óleos da Megger utilizam este tipo de tecnologia nos seus produtos, como é o caso do modelo OTS100AF (Figura 2.5). Com uma capacidade *standart* de 400 ml, com opção de 150 ml para testes com baixo volume, o OTS100AF é utilizado para análises com um elevado volume de óleo.



**Figura 2.5.** *OTS100AF* (Megger, 2016).

## **2.1. Caracterização do Óleo**

O planeamento e conceção de um protótipo de análise de óleos industriais requer conhecer todos os parâmetros e condições a que diz respeito a vida útil de um óleo e equipamento. Geralmente existem vários parâmetros principais que devemos ter em conta aquando deste tipo de análise.

### **2.1.1. Contaminação**

A contaminação do óleo é uma das causas de falhas mais importantes na indústria, sendo este responsável por 75 a 80 % das mesmas. Algumas destas origens relativas as contaminações do óleo devem-se ao desgaste interno produzido pelo equipamento, infiltrações de substâncias externas graças a uma fraca vedação, à montagem e fabrico dos componentes ou ainda a baixa pureza dos óleos novos (Mačužić & Jeremić, 2004).

A contaminação mais prejudicial para um equipamento trata-se da contaminação por partículas solidas. Estas partículas são divididas em extremamente duras, duras e macias, sendo as primeiras as principais responsáveis por provocar danos consideráveis nos sistemas se não forem retiradas num curto espaço de tempo, como as partículas metálicas ou de ferrugem. As partículas macias, como fibras, borrachas ou plásticos, provenientes da abrasão dos vedantes, mangueiras, entre outros, são de dano reduzido.

A segunda contaminação mais ruínosa para os sistemas é a presença de água, uma vez que esta acelera a oxidação natural do óleo, promove o risco de ataque microbial e a formação de sedimentos. A água dissolvida demonstra uma potencial causa de falha quando ultrapassa certos limites, no entanto, a presença de água condensada nos sistemas de lubrificação é considerada um caso crítico.

Os fabricantes, laboratórios de análises e técnicos especializados propõem valores limites de contaminação para garantir um bom funcionamento da película lubrificante, estando ciente da necessidade de estar consciente em relação à sua evolução. É importante perceber que a contaminação não pode ser impedida, mas sim controlada para diminuir as suas consequências através de uma manutenção proativa.



### **2.1.2. Viscosidade**

A viscosidade é um parâmetro de extrema importância para uma boa performance do óleo. Perceber o conceito da viscosidade torna possível diminuir o desgaste, melhorar a economia do equipamento e permitir uma maior potência disponível.

A viscosidade é a propriedade física que caracteriza a resistência de um fluido ao escoamento (Kane, Mishra, & Dutta, 2016), traduz a medida do atrito interno que ocorre no óleo quando este flui. Fluidos viscosos tendem a aderir a superfícies sólidas que contactam com o fluido (Kane et al., 2016). Para baixas temperaturas o óleo apresenta um alto atrito interno, isto é, uma alta viscosidade. À medida que se aumenta a temperatura do óleo o atrito interno vai-se reduzindo, diminuindo assim a viscosidade (Kumbár & Votava, 2014).

A diminuição da viscosidade pode levar a problemas como o contacto metal-metal, devido a diminuição da camada lubrificante ou até mesmo a destruição da mesma. Elevados valores deste parâmetro não são também desejáveis, promovendo o aparecimento de oxidação e perdas de energia, fazendo com que os componentes trabalhem a velocidades inferiores à estipulada. A correta seleção deste parâmetro é então fundamental para prolongar a vida útil de um equipamento, sendo este responsável pela redução das forças de atrito e de contacto.

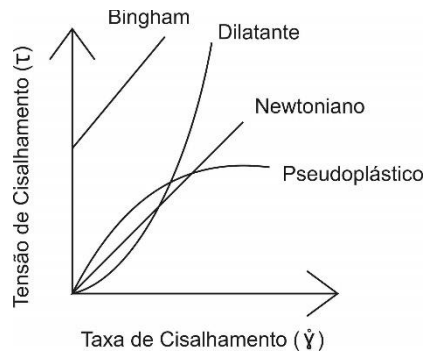
A taxa à qual a viscosidade de um óleo varia ao longo do tempo é conhecida como índice de viscosidade. Se a viscosidade de um lubrificante cair drasticamente com o subir da temperatura temos um índice de viscosidade baixo, pelo contrário, se a viscosidade é pouco afetada com o subir de temperatura estamos perante um índice de viscosidade elevado (Rajesh Kanna, S, S, Raj A, & sudheer, 2017).

O estudo deste parâmetro no que diz respeito a análise de óleo para manutenção condicionada é então de fundamental para o desenvolvimento do presente projeto, regendo-se esta análise à norma ISO 3448.

### **2.1.3. Fluidos não Newtonianos**

Os fluidos podem ser classificados como compressíveis e não compressíveis tendo em conta a sua resposta quando aplicada uma certa pressão. Uma segunda classificação diz respeito a sua resposta a uma tensão de cisalhamento aplicada, sendo estes chamados de fluidos newtoniano e não newtonianos (Franco & Partal, 2002)

Os fluídos não newtonianos, como o óleo, tem um comportamento complexo e não linear, sendo o coeficiente de viscosidade deste tipo de fluídos não constante. Isto é, um fluido não-newtoniano não segue as leis da física de Newton, podendo a sua viscosidade ser alterada quando aplicada uma carga sobre o fluído.



**Figura 2.6.** Curvas de tensão de cisalhamento versus taxa de deformação (Eliomar Evaristo Ferreira; et al., 2005)

Os fluídos não newtonianos apresentam propriedades diferentes dos fluídos newtonianos, nomeadamente o facto da tensão de cisalhamento não ser diretamente proporcional à taxa de deformação. Conclusão disto, é o facto deste tipo de fluídos não apresentarem uma viscosidade bem definida.

#### 2.1.4. Oxidação

Sendo este o responsável primário pela degradação do óleo, dever-se-á também ter em conta quando se requer uma correta análise da condição do óleo em estudo.

O surgimento da oxidação é muitas vezes provocado devido à exposição do óleo a elevadas temperaturas na presença de oxigénio, ou a um esgotamento dos aditivos provocados por um elevado tempo de utilização (Abel Almeida, 2003). A estabilidade e a deterioração oxidativa dependem por isso da sua composição inicial, concentração de aditivos com características antioxidantes e do seu armazenamento, podendo estar sujeito a diversas diferenças de temperaturas (Crapiste, Brededan, & Carelli, 1999).

O ácido contido no óleo está diretamente relacionado com a proteção contra a oxidação, pelo que, para valores elevados de ácido temos uma reduzida proteção contra a mesma, provocando assim problemas de corrosão. Analisando então o número de base (TBN, quantidade de KOH (hidróxido de potássio [mg]) necessário para neutralizar os

ácidos) e comparando ao número de base inicial obtemos assim um indicador da degradação por oxidação (Friess GmbH, 2012).

As diversas consequências provocadas pela oxidação são o aparecimento de odores, gorduras, bem como a degradação das propriedades funcionais do óleo (Crapiste et al., 1999).

### 2.1.5. Permissividade

A permissividade é uma constante física que determina a capacidade de uma substância resistir a um campo elétrico induzido (Stroski, 2018). Este parâmetro é determinado tendo em conta a habilidade do material de se polarizar, isto é, formar dipolos elétricos na sua estrutura que se orientam relativamente ao campo elétrico, fazendo com que este se anule parcialmente (Stroski, 2018). Estando este parâmetro diretamente relacionado com a oxidação é de extrema importância o seu conhecimento e caracterização.

Também conhecida como constante dielétrica, esta é calculada através da razão entre a capacitância quando a célula se encontra cheia de óleo com a capacitância quando esta se encontra vazia, como se demonstra na equação (2.3) (Rajab, Sulaeman, Sudirham, & Suwarno, 2011).

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0}, \quad (2.1)$$

onde  $\varepsilon_r$  é a constante dielétrica do óleo,  $C_x$  a capacitância da célula cheia de óleo e  $C_0$  a capacitância da célula vazia. A constante dielétrica está relacionada com a suscetibilidade do material dielétrico (equação(2.2)), que é a medida de quão fácil um dielétrico se polariza em resposta a um campo elétrico, como demonstra a equação (Rajab et al., 2011)

$$\varepsilon_r = \chi + 1, \quad (2.2)$$

$$P = \chi \varepsilon_0 E \quad (2.3)$$

onde  $\chi$  é a suscetibilidade,  $P$  a polarização,  $\varepsilon_0$  a constante dielétrica do vácuo e  $E$  o campo elétrico.

Com o aumento da temperatura, torna-se mais difícil a orientação dos dipolos devido a agitação térmica. Mantendo então a mesma magnitude do campo elétrico, tendo por base a equação (2.3), temos uma diminuição da suscetibilidade e conseqüentemente da

permissividade, muito devido a dificuldade de polarização do material. Concluímos então que a constante dielétrica dos óleos diminui com o aumento da temperatura.

### **2.1.6. Presença de Água**

A presença de água no óleo é considerada a segunda maior contaminação destrutiva para um sistema de lubrificação, a seguir a contaminação por partículas (Leigh-Jones, 2004).

A contaminação provocada pela água é proveniente de sistemas exterior ao nosso equipamento ou da condensação originada no interior do mesmo, promovendo a corrosão, oxidação, mudança na viscosidade, entre outros tipos de degradação.

A água pode existir no óleo em três fases distintas, água dissolvida, caracterizada por moléculas individuais de água dispersas no óleo abaixo do ponto de saturação. Excedido o limite máximo para esta permanecer dissolvida, o óleo não tem mais capacidade de absorção, ficando este saturado, segunda fase. Por fim, como terceira fase, temos que com a adição de mais água à mistura óleo/água levará a separação dos dois fluidos, formando uma camada livre de água que se localiza no fundo do depósito de óleo (Leigh-Jones, 2004).

Este parâmetro, para além de ter um efeito nocivo direto na vida dos equipamentos, também desempenha um papel importante na vida útil de um lubrificante. A presença de água nos lubrificantes pode aumentar os processos de oxidação em dez vezes, resultando no envelhecimento prematuro do óleo (Peter Murray, 2014).

A água presente no óleo utilizado para manutenção dos equipamentos deve ser por isso mantida o mais baixo possível, devido a sua natureza destrutiva. De modo a controlar este parâmetro, analisar-se-á a humidade relativa presente no óleo em percentagem.

### **2.1.7. Humidade Relativa**

A humidade relativa é a quantidade de vapor de água presente no ar ambiente em relação à quantidade total de vapor que este pode conter a determinada temperatura (Wolkoff, 2018). O mesmo raciocínio passa para o óleo, a humidade relativa presente no óleo, expressa em percentagem, é a quantidade de água que este é capaz de dissolver antes do ponto de saturação, variando esta de 0 a 100%, sendo os 100% o valor limite de saturação a partir do qual aparece água condensada na mistura óleo/água.

Os gráficos psicométricos são uma excelente representação gráfica da relação entre a humidade relativa e a variação da temperatura (Karthiyini & Philomina, 2010). A humidade relativa varia no sentido inverso ao da temperatura, ou seja, para a mesma quantidade de água, a humidade relativa aumenta com o diminuir da temperatura, diminuindo assim o ponto de saturação da mistura óleo/água. Isto é, para elevadas temperaturas o óleo é capaz de absorver maiores quantidades de água do que para temperaturas mais baixas.

### **2.1.8. Partículas**

Partículas sólidas acumulam-se nos óleos durante a sua fabricação, armazenamento e uso (Yin, Li, Xue, Wang, & Jiang, 2018). As análises das partículas presentes no óleo são essenciais para perceber o estado de saúde do equipamento assim como para diagnosticar potenciais causas de falhas. Sendo esta a principal causa de falhas dos equipamentos, requer uma especial atenção relativa ao seu monitoramento.

A contaminação por partículas é uma das causas mais comuns de deterioração do óleo. A existência deste parâmetro no óleo deve-se a diversos fatores internos e externos como a erosão do equipamento, fadiga, corrosão devido a existência de água no óleo, contaminação devido a uma substituição de um componente, entre outros (Peter Murray, 2014).

O aparecimento destas partículas provoca uma cascata de acontecimentos (Smith, 2004). Acontece que com um primeiro desgaste inicial a provocar alterações e folgas nos componentes, proporcionando um aumento das tensões superficiais, a erosão das superfícies aumenta significativamente, dando origem a partículas de maiores dimensões (Smith, 2004). O desgaste dos componentes mecânicos pode ser visualizado através da deteção e estudo do tamanho das partículas assim como da sua composição, de forma a controlar o mesmo, aumentando assim a vida útil do equipamento (Yin et al., 2018).

Concluimos então que o tamanho e forma das partículas estão dependentes de certas condições e forças de funcionamento, que são influenciadas não só pelo material, mas também pelo modo e a maneira como se desenvolve o desgaste. Com isto, para uma eficiente análise à saúde do equipamento é necessário saber não só a quantidade e distribuição das partículas, mas também a sua morfologia.

### 2.1.9. Morfologia das Partículas

Numa amostra de óleo é possível encontrar diversos tipos de partículas. Através de uma análise ferrográfica obtemos as diversas formas representadas na Figura 2.7.

Como podemos constatar, as partículas apresentam formas e tamanhos diferentes, sendo estas associados a vários tipos de desgaste que ocorrem nos equipamentos. A morfologia das partículas permite-nos perceber o desgaste que ocorre no equipamento assim como a origem da contaminação através das características das mesmas, sendo estas divididas em classes de fadiga, corte, fibras, não metálicas, deslizamento e água.



Figura 2.7. Exemplo da diversidade de partículas presentes numa amostra de óleo e sua respectiva classe (AMETEK, 2013).

### 2.1.10. Número Total de Ácido

Os ácidos naftênicos (NAs) presentes no óleo são os principais contribuintes para a acidez do mesmo. A acidez dos óleos provenientes do petróleo é expressa como o número total de ácido (TAN), que se traduz na quantidade de hidróxido de potássio em miligramas necessária para neutralizar os ácidos presentes em uma grama de óleo (Mandal, Abdullah, & Rahman, 2016).

Os NAs são criados através da degradação microbiana aeróbica de hidrocarbonetos existentes no petróleo (Mandal et al., 2016). Estes ácidos provocam muitos problemas na indústria petrolífera e de gás, provocando falhas nos equipamentos, elevados custos de manutenção, redução na qualidade do produto e um elevado impacto ambiental.

Para níveis superiores a 1,5 mg KOH/g ocorre a corrosão dos equipamentos. Para além disso, os NAs provocam emulsões nos processos de refinamento que tem como resultados um elevado teor de TAN, sendo estes óleos considerados como óleos de baixo valor comercial (Mandal et al., 2016).

Reduzir o TAN presente nos óleos através da remoção dos ácidos naftênicos é considerado um dos processos mais importantes na produção de óleo (Rana, Cho, Cho, & Kim, 2018).

#### **2.1.11. Flashpoint**

Tal como a viscosidade, o teste do ponto de ignição (*Flashpoint*) sempre foi um parâmetro a ter em conta aquando da análise de lubrificantes. Tendo em conta o seu baixo custo, simplicidade e versatilidade, é um dos testes mais popular entre a comunidade na análise de óleos industriais.

De acordo com a ASTM, que foi a primeira entidade a padronizar este teste em 1924, o *flashpoint* é a temperatura mínima na qual os vapores de um material volátil se inflamam quando sujeitos a uma fonte de ignição (Rajesh Kanna et al., 2017).

Existem dois tipos de medições capazes de determinar este ponto de inflamação: recipiente aberto ou recipiente fechado. No primeiro caso, a amostra encontra-se num recipiente aberto que é aquecido ao longo do tempo, onde é introduzida uma chama em intervalos de tempo constantes à sua superfície, de forma a determinar o ponto de inflamação (Rajesh Kanna et al., 2017).

O flash point não só é utilizado para indicar o risco de incêndios, mas também as perdas por evaporação a elevadas temperaturas. Isto indica-nos a temperatura à qual um óleo pode operar, sendo aplicado como meio de identificação de contaminantes presentes nos lubrificantes (Rajesh Kanna et al., 2017).

## **2.2. Noções Teóricas de Calibração de Sensores**

Um sensor transforma um fenómeno físico num sinal elétrico através de transdutores que alimentam o sistema. Existem dois grandes tipos de sensores, os analógicos e os digitais dependendo do tipo de saída dos mesmos (Vinhais & Abreu, 2004). No nosso caso será utilizado sensores analógicos em que os sinais serão posteriormente convertidos em digitais através de um conversor analógico-digital (ADC).

Os sensores analógicos produzem um sinal de saída diretamente proporcional ao sinal de entrada (Vinhais & Abreu, 2004), sendo estes ótimos para determinar certas grandezas físicas. Temos diversas variáveis físicas que são contínuas na natureza e podem

ser medidas através de sensores analógicos, como a temperatura, a humidade relativa, aceleração, pressão, entre outras (Vinhais & Abreu, 2004).

O desenvolvimento de um método para efetuar a calibração dos sensores de um sistema de medida depende de diversos fatores (Tiago et al., 2016). É necessário considerar diversos aspetos quando estamos a proceder a calibração de um sistema como por exemplo o tipo de grandeza sob medição, as suas especificações, as suas capacidades e limitações, o ambiente onde se insere, entre outros (Tiago et al., 2016). Os testes a que estes sensores serão submetidos no decorrer do primeiro processo de calibração necessitam de certas condições específicas para se poder retirar resultados credíveis. Para uma correta calibração do sensor é fundamental controlar as grandezas que estão a ser medida, ou seja, os *inputs* que o sistema recebe. Isto implica conhecer e controlar as grandezas que se encontra a ser medida durante um período de tempo desejado, conhecendo os seus valores reais. Outro aspeto fundamental aquando da calibração de sensores é ter a capacidade de medir as grandezas que se pretendem calibrar através de meios independentes ao sistema de calibração. Para tal, recorreremos a um equipamento externo ao processo que possa medir a mesma grandeza com um elevado nível de credibilidade. Estes valores serão aceites como valores reais de medida que serviram como base de comparação. No fim do processo de calibração, o sistema fará as medições por ele próprio num ambiente não controlado.

### 2.2.1. Modelos Lineares

Normalmente o comportamento mais comum de se encontrar nos sistemas é o linear, sendo este o mais simples de se calibrar. O mesmo acontece no nosso estudo, a utilização de sensores lineares é a que melhor se adequa as grandezas físicas que estamos a medir. Para definir corretamente uma reta são necessários pelo menos dois pontos de interpolação. Conhecendo então esses dois pontos temos  $[X_1, Y_1]$  e  $[X_2, Y_2]$ , pelo que:

$$B_0 = X_1 - B_1 Y_1, \quad (2.4)$$

$$B_1 = \frac{X_2 - X_1}{Y_2 - Y_1}, \quad (2.5)$$



onde o parâmetro  $B_0$  representa o *offset* da resposta, isto é o valor real lido para determinado sinal, e  $B_1$  a sensibilidade do sistema.

### 2.3. Noções Teóricas da Utilização de Ultrassons

O ouvido humano é capaz de detetar frequências entre os 20 e 20000 Hz (Spada, 2006). Falamos de ultrassons quando as frequências emitidas são superiores a 20000 Hz (Ribeiro, 1978). O som é uma onda mecânica capaz de se propagar em diferentes meios, sólido, líquido e gasoso. As ondas sonoras propagam-se a diferentes velocidades dependendo do meio de propagação, sendo estas mais rápidas nos sólidos

Os sensores de ultrassons funcionam emitindo ondas sonoras de frequências elevadas. Após estas ondas serem emitidas ocorre a reflexão das mesmas, sendo estas detetadas pelo sensor, calculando-se então a distância a que se encontra o objeto através do tempo de recessão da onda (Cook, 2018). Embora alguns sensores ultrassônicos usem um emissor e um recetor de som separados, também é possível combina-los num único dispositivo como é o caso da sonda que será posteriormente utilizada nesta dissertação.

Contrariamente aos radares, ou aos sensores baseados na reflexão de luz, que tem alguma dificuldade em processar objetos transparentes, os sensores de ultrassons não apresentam esse tipo de problemas, não sendo, portanto, afetados pela cor do material (Cook, 2018).

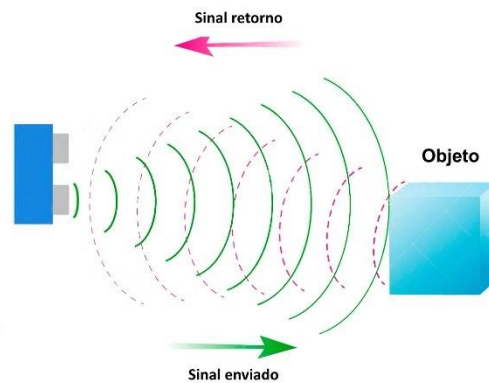
De forma a medir a distância específica entre a sonda e as partículas, o sensor utiliza por base a seguinte fórmula:

$$d = \frac{1}{2}T \times C \quad (2.6)$$

Onde  $d$  é a distância,  $T$  é o tempo entre a emissão e a receção da onda sonora e  $C$  a velocidade do som.

Quando um pulso de alta voltagem é transmitido ao transdutor ultrassónico, este vibra com uma frequência específica e gera uma elevada quantidade de ondas sonoras. Sempre que aparecerem partículas à frente do sensor, as ondas sonoras serão refletidas de volta na forma de eco e gerarão um pulso elétrico no sensor. Tendo em conta o tempo entre o envio e a receção do eco e o padrão do eco recebido, através da sua comparação com diversos padrões de ondas sonoras é possível determinar a condição do sinal detetado (ELPROCUS, 2013).

Na Figura 2.8 encontra-se representado o princípio de funcionamento anteriormente descrito.



**Figura 2.8.** Princípio de funcionamento de um sensor de ultrassons (Thomsen, 2011).

As principais vantagens da utilização destes sensores para a deteção de partículas é o facto, como já foi mencionado anteriormente, de não ser afetado pela transparência dos objetos, sendo praticamente todos os materiais refletores de ondas sonoras, poder ser usado em ambientes escuros, terem uma maior precisão na medição da espessura e da distância das partículas em relação a muitos outros métodos e o facto de ser um método não destrutivo, pelo que conserva as propriedades do óleo.

### **3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL**

Neste capítulo será exposta a metodologia experimental adotada assim como os equipamentos utilizados na aquisição de dados. Este estudo tem como principal objetivo verificar a utilidade deste dispositivo em meio industrial e conseqüentemente a resposta e calibração dos sensores.

#### **3.1. Metodologia**

O presente estudo envolve uma das análises mais importantes na implementação da manutenção condicionada. O procedimento requerido para o tipo de análise em estudo é composto por três fases: a fase de preparação, que inclui retirar a amostra que se pretende analisar do equipamento e prepara-la , a fase de disposição da amostra no depósito da célula e a fase final, que se traduz pela circulação da amostra por todo o circuito e conseqüente análise da mesma.

O estudo envolve a utilização de quatro sensores, suportados por uma célula laboratorial construída propositalmente para o efeito. Todos os sensores foram selecionados tendo em conta sua precisão, fiabilidade e credibilidade na obtenção dos resultados pretendidos, aliados a um objetivo de aproximar o máximo possível a célula laboratorial contruída à célula industrial final que se pretende obter no desfecho do projeto.

De modo a garantir a menor admissibilidade possível, o estudo obriga a utilização de óleos onde sejam conhecidas as suas propriedades iniciais com o intuito de obter uma comparação dos resultados obtidos. O óleo utilizado para o efeito foi o óleo Shell Tellus S2 M 46.

O estudo envolve a obtenção de dados através de diversos testes criados propositalmente para cada parâmetro, permitindo através de uma análise e discussão meticulosa dos mesmos perceber a utilidade do dispositivo contruído para a indústria.

##### **3.1.1. Presença de Água**

Na área que envolve a presença de água no óleo, foi feita uma preparação meticulosa de cinco amostras de modo a conhecermos a percentagem de humidade relativa

da água dissolvida no óleo à temperatura ambiente assim como obter a respetiva resposta do sensor para a calibração do mesmo. Na preparação destas amostras foi utilizado um óleo mineral novo, onde se adicionou uma quantidade controlada de água que representou na amostra HR5 da Tabela 3.1 o nosso valor máximo de admissibilidade, ou seja, 100% de humidade relativa. Todas estas preparações tiveram em conta o ponto de saturação do óleo, 0,05%, ou seja, 500 ppm. Utilizou-se então uma balança de alta precisão onde se adicionou aproximadamente 1000 ppm em massa de modo a garantir a existência de água condensada na mistura. Recorreu-se então a equação (3.1)

$$ppm_{H_2O} = \frac{M_{H_2O}}{M_{\text{óleo}}} 1 \times 10^6, \quad (3.1)$$

onde  $M_{H_2O}$  é a massa de água adicionada,  $M_{\text{óleo}}$  a massa de óleo da amostra e  $ppm_{H_2O}$  a quantidade de água adicionada em partes por milhão, onde obtivemos a quantidade exata adicionada à mistura óleo/água.

$$ppm_{H_2O} = \frac{0,1967g}{175,8g} 1 \times 10^6 = 1119. \quad (3.2)$$

Quantidade esta que corresponde a 100% de humidade relativa.

Posto isto, foram então preparadas as cinco amostras que se encontram resumidas na Tabela 3.1. De salientar que na preparação destas amostras não era conhecida a quantidade de água inicial já existente na mistura, pelo que se teve isso em conta aquando das quantidades ótimas a adicionar.

**Tabela 3.1.** Preparação das amostras destinadas aos testes de Humidade Relativa.

Amostra	Massa de óleo (g)	Massa de água(g)	Ppm <sub>H<sub>2</sub>O</sub>
HR1	175,8	0	0
HR2	175,7961	0,0101	57
HR3	175,8041	0,027	156
HR4	175,83	0,0484	275
HR5	175,8	0,1967	1119

### 3.1.2. Presença de Partículas

Na verificação da resposta do sensor à presença de partículas foi adicionada uma quantidade conhecida das mesmas de modo a percebermos a resposta do sensor para um nível máximo de admissibilidade imposto. Este procedimento contou com quatro testes cuidadosamente preparados. Utilizou-se novamente abalança de alta precisão onde se preparou um total de cinco amostras apresentadas na Tabela 3.2, utilizou-se mais uma vez a Equação (3.1) como método eficaz no cálculo das quantidades a adicionar, mas desta vez vocacionada para a presença de partículas.

**Tabela 3.2.** Preparação das amostras destinadas aos testes de presença de partículas ferromagnéticas e sílica.

Amostra	Massa de óleo (g)	Massa de partículas(g)	Ppm <sub>Part</sub>
PF1	175,8	0	0
PF2	175,8016	0,0383	218
PF3	175,8038	0,063	358
PF4	175,7963	0,09	512
PS5	175,7985	0,087	495

### 3.2. Equipamentos e *Software* Utilizados na Aquisição de Dados

Para a aquisição e processamento dos dados relativamente à caracterização do óleo, recorreu-se a uma placa da Texas Instruments, denominada de LAUNCHXL-F28379D e a um conjunto de quatro sensores. A obtenção e processamento dos dados foi conseguida através de um programa desenvolvido em paralelo pelo engenheiro Manuel Cardoso.

O processamento e tratamento de dados foi conseguido através do *software* Microsoft Excel. Os principais equipamentos e *softwares* utilizados para a realização do estudo são apresentados de seguida, sendo feita uma breve descrição de cada um.

### 3.2.1. Placa LAUNCHXL-F28379D

A placa construída para proceder a análise e interpretação dos dados obtidos através da célula laboratorial é controlada por um microcontrolador F28379D da Texas Instruments. O C2000™ LAUNCHXL-F28379D LaunchPad™ (Figura 3.1) é uma placa de desenvolvimento completa e de baixo custo, apresentando todo o *hardware* e *software* necessário para desenvolver o estudo pretendido.



Figura 3.1. Microcontrolador F28379D (Texas Instruments, 2018) .

### 3.2.2. Módulo GPRS Quad Band

O GPRS é um serviço que possibilita o envio e a receção de informação através das redes móveis.

Caracterizado por uma elevada velocidade na transmissão de informação aliada a uma tecnologia de fácil conexão, torna-se no serviço ideal a utilizar neste projeto. O GPRS é ideal para partilha de informação instantânea, pois a informação pode ser enviada e recebida imediatamente, de acordo com as necessidades. Tudo isto garante que os usuários que possuem o módulo GPRS estejam “sempre conectados”.

Foi então utilizado o GSM GL85-Quad (Figura 3.2) como placa de comunicação móvel de segunda geração, com uma taxa máxima de 72 kbit/s.



Figura 3.2. GSM GL685-Quad (Telit Communications, 2016).

### **3.2.3. Sensores**

A qualidade do óleo em aplicações industriais é essencial para a longevidade do equipamento e para a otimização do seu custo do ciclo de vida, portanto importa saber o envelhecimento do mesmo. Como uma das principais funções dos lubrificantes é promover a limpeza das superfícies de contacto, durante o seu funcionamento as partículas em suspensão no óleo são uma fonte de informação crucial para o diagnóstico de avarias dos equipamentos bem como para condicionar o programa de manutenção preventiva.

Existem várias análises para determinar a qualidade do óleo, como testes de insolubilidade, a temperatura do flash point, a viscosidade e o estado de oxidação. Estas análises são normalmente feitas em laboratórios, através de amostras de lubrificantes recolhidas periodicamente ao longo da vida do equipamento. No entanto alguns destes parâmetros podem ser analisados através de sensores.

A utilização de sensores na construção da célula é a única opção viável para a aplicação em estudo, visto se pretender uma análise no momento e no local. Deste modo os sensores devem ter a aptidão de detetar alterações químicas e físicas presentes no óleo.

Foram então pré-selecionados quatro sensores, sendo três deles da marca Argo-Hytos e um da marca Olympos®. A seleção destes sensores teve como objetivo aproximar ao máximo a célula laboratorial da célula industrial final que se pretende obter, daí a utilização dos sensores industriais apresentados de seguida.

### **3.2.4. LubCos Visc +**

A utilização deste sensor prende-se a necessidade de medir a viscosidade na caracterização do óleo.

O sensor LubCos Visc + (Figura 3.3) permite medir a viscosidade e a permissividade relativo do fluido. Os valores obtidos são continuamente gravados e podem ser lidos a qualquer momento, permitindo assim detetar as mudanças nos parâmetros do óleo e conseqüentemente o envelhecimento do mesmo. Como resultado, danos incipientes podem ser detetados em um estado inicial ou completamente evitados, oferecendo a possibilidade de se evitar falhas graves nos equipamentos, bem como prolongar os intervalos de troca de óleo e de manutenção.

Como a viscosidade mostra uma grande dependência da temperatura, o sensor oferece ainda a possibilidade de converter esse parâmetro para uma temperatura de

referência. O LubCos Vis + apresenta uma sensibilidade de medições de  $0.1 \text{ mm}^2/\text{s}$  e abrange uma gama de valores de viscosidade entre 8 e  $400 \text{ mm}^2/\text{s}$ , correspondente na escala ISO aos valores ISO VG 10 e ISO VG 460.



**Figura 3.3** Sensor *LubCos Visc +* (Argo-Hytos, 2015)

### 3.2.5. LubCos H<sub>2</sub>O

A presença de água nos óleos não é de todo desejada, podendo causar perturbações no funcionamento dos equipamentos ou até mesmo a sua destruição.

O sensor LubCos H<sub>2</sub>O (Figura 3.4) foi incorporado na célula com o intuito de determinar a quantidade de água presente no óleo, quer na forma dissolvida, quer na forma condensada. Semelhantemente ao sensor descrito no subcapítulo anterior, o sensor LubCos H<sub>2</sub>O, para efeitos de compensação, mede também a temperatura do fluido, isto devido ao óleo a elevadas temperaturas conseguir dissolver uma maior quantidade de água do que o óleo a baixas temperaturas.

O *output* deste sensor será a humidade relativa do óleo expressa em percentagem. Com valores compreendidos entre os 0 e os 100%, sendo os 0% correspondente à inexistência de água no sistema e os 100% a um estado acima do limite de saturação, podemos constatar a presença de água dissolvida e de água condensada no óleo analisado.



**Figura 3.4** Sensor *LubCos H<sub>2</sub>O* (Argo-Hytos, 2015).



### 3.2.6. OPCom FerroS

O sensor OPCom FerroS (Figura 3.5) mede o desgaste dos componentes mecânicos pela detecção de partículas ferromagnéticas.

A quantidade de partículas presentes no óleo é continuamente detetada por um princípio de medição indutivo, isto é, o sensor avalia a quantidade de partículas acumuladas no íman que se encontra na sua extremidade através da alteração do seu campo magnético. O OPCom FerroS consegue distinguir entre partículas na ordem do micrón até partículas na ordem do milímetro. Com base no sinal de saída de 0 % a 100% de ocupação, o sensor, quando o íman se encontra totalmente obstruído, é capaz de alterar o seu campo magnético procedendo a uma autolimpeza. Com base nos intervalos de tempo estabelecidos entre duas operações de limpeza consecutivas, é possível deduzir alterações no desgaste do óleo.



Figura 3.5 Sensor OPCom FerroS (Argo-Hytos, 2015).

### 3.2.7. Ultrassons

Como o próprio nome indica, os sensores de ultrassons medem as distâncias através da propagação de ondas sonoras. O sensor imite uma onda ultrassónica recebendo de seguida a mesma onda refletida no objeto que se pretende medir. O desfasamento entre a sua emissão e a sua receção permite obter a distância a que este se encontra do sensor.

O princípio pretendido para este sensor consiste em detetar e quantificar as partículas que fluem através da zona focal do mesmo. O óleo presente na célula será bombeado pelo circuito passando conseqüentemente na câmara de deteção onde se encontra o sensor de ultrassom. Durante a sua passagem na zona focal, uma partícula recebe pulsos ultrassónicos, refletindo uma parte dessa energia de volta ao sensor (Lefebvre et al., 2013). Os pulsos conseqüentemente refletidos são analisados e interpretados através da placa criada para o mesmo.

A frequência normalmente utilizada nestes testes não destrutivos é da ordem dos 100KHz a 50MHz, apresentando um comprimento de onda extremamente curto ideal para análise de superfícies e defeitos muito pequenos.

O sensor utilizado na célula laboratorial, da marca Olympus®, encontra-se representado na Figura 3.6.



**Figura 3.6** Sonda ultrassons (Olympos®, 2006).

### **3.2.8. Bomba Peristáltica**

De forma a fazer circular a amostra de óleo a ser analisada ao longo do circuito foi utilizada uma bomba peristáltica para o efeito.

Estes tipos de bombas são ideais para o tratamento de fluidos abrasivos, corrosivos, viscosos e de alta densidade, características estas que se assemelham aos óleos industriais que utilizaremos para a obtenção de resultados. Uma das características principais destas bombas é o facto do fluído bombeado não entrar em contacto com nenhuma parte do equipamento em si, apenas com a mangueira, o que não provoca dano no fluido e evita contaminações exteriores.



**Figura 3.7** Bomba peristáltica RS.

Na bomba peristáltica a mangueira é fixada no cabeçote e pressionada por roletes em volta do rotor que realiza um movimento circular. Os roletes, ao se moverem, pressionam

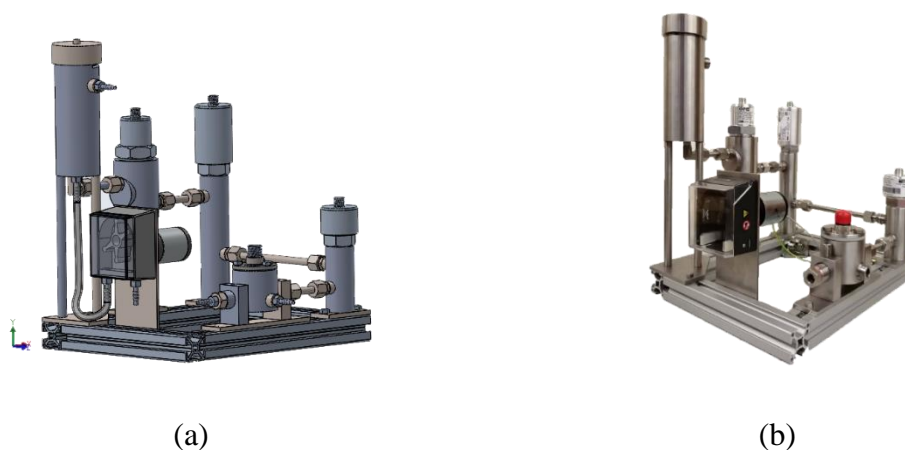
e fecham a mangueira, provocando o vácuo necessário para deslocar o fluido. Logo após a passagem do rolete, a mangueira volta a sua forma inicial devido à conformação própria do material pela qual é constituída.

### 3.2.9. Célula Laboratorial

O objetivo primordial da construção da célula laboratorial passou por aproximar ao máximo da célula industrial que será posteriormente construída.

A recolha de amostras a enviar para os laboratórios de análise rondam habitualmente volumes na ordem dos duzentos mililitros, pelo que o objetivo traçado para o volume de amostragem necessário para percorrer todo o sistema de análise da célula laboratorial foi tido em conta comparativamente a este método. Após ter sido terminada a primeira iteração da célula, concluiu-se que o volume excederia o limite admissível, pelo que foi necessário diminuir consideravelmente o volume. Isto levou a que fossem feitos vários tipos de iteração até chegar ao resultado final, iterações estas que se encontram apresentadas no APÊNDICE A. Para além do exposto anteriormente, o sensor ferromagnético e de ultrassons necessitam de um caudal mínimo de circulação para o seu correto funcionamento, pelo que as seguintes iterações tiveram de ser totalmente redesenhadas e pensadas ao pormenor.

A solução final encontrada apresenta-se na Figura 3.8 e no APENDICE B. Esta solução apresenta uma bomba peristáltica responsável por fazer circular o fluido ao longo da célula. Célula esta que é constituído pelo reservatório, pelas câmaras correspondentes a cada sensor e pelos respetivos elementos de ligação.



**Figura 3.8.** Célula laboratorial (LubSysTech, 2019): (a) Modelação 3D; (b) Montagem final.

Esta última iteração cumpre os requisitos previamente estabelecidos, permitindo fazer uma análise a uma amostra inferior a cento e oitenta mililitros de óleo.

A célula laboratorial apresenta uma altura máxima de 31,6 cm, um comprimento de 37.6 cm e uma largura de 23 cm. A presente célula foi maioritariamente fabricada em aço inox AISI 316, apresentando um peso na ordem dos 7Kg.

Tendo em conta as diferentes dimensões dos sensores que fazem parte do circuito, este foi projetado em forma de “escada”, característica aproveitada para facilitar a sua limpeza. Com a possibilidade de inverter o sentido de rotação da bomba peristáltica a limpeza do circuito será automática, extraindo o solvente que é inserido no reservatório, sendo este encaminhado para fora do circuito através de uma válvula manual.

Um dos pontos fortes desta célula é a sua versatilidade, dado que todos os componentes são ligados por conexões roscadas, facilitando assim a sua desmontagem, substituição ou até mesmo a alteração dos módulos que a constituem. O perfil de alumínio Rexroth da Bosch serviu de base para a montagem não só dos sensores e as suas respetivas câmaras, mas também para a caixa de proteção e de transporte que será construída ao seu redor.

Em suma, tendo em consideração que a célula final será utilizada em meio industrial, a sua robustez, portabilidade e compatibilidade eram um dos objetivos traçados quando se iniciou o projeto, tendo estes sido alcançados com sucesso.

### **3.2.10. Shell Tellus S2 M 46**

O óleo utilizado para a obtenção de resultados através do dispositivo contruído e consequente calibração do mesmo é um óleo mineral da Royal Dutch Shell, nomeadamente o Tellus S2 M 46 (Figura 3.9). Este óleo apresenta um baixo número de aditivos sendo ideal para a realização dos primeiros testes, diminuindo assim as variáveis que poderiam interferir num primeiro processo de calibração.

O Tellus S2 M 46 é um óleo hidráulico de alta preforma que utiliza uma patente única da Shell para providenciar uma melhor proteção e preforma dos equipamentos. Tem elevada resistência ao cisalhamento sob solicitações térmicas e mecânicas, e ajuda a prevenir a formação de depósitos que possam vir a diminuir a eficiência do sistema hidráulico. Este óleo apresenta também uma elevada estabilidade quando na presença de humidade,

garantindo assim uma longa vida do lubrificante, reduzindo o risco de oxidação e corrosão (Tellus, 2010).



**Figura 3.9** Shell Tellus S2 M 46 (Shell Tellus, 2010)

As características físicas do Shell Tellus S2 M 46 encontram-se apresentadas na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3.** Características físicas do Shell Tellus S2 M 46 (Tellus, 2010)

Propriedades	Método	Shell Tellus S2 M 46
Grau de viscosidade ISO	ISO 3448	46
Viscosidade cinemática @0°C cSt	ASTM D445	580
Viscosidade cinemática @40°C cSt	ASTM D445	46
Viscosidade cinemática @100°C cSt	ASTM D445	6.7
Índice de viscosidade	ISO 2909	98
Densidade @15°C Kg/l	ISO 12185	0.879
Flash Point °C	ISO 2592	230

### 3.2.11. Balança de Precisão AND GH-202

A balança utilizada para a preparação das amostras anteriormente referidas, foi uma balança de alta precisão da A&D Company, Ltd, nomeadamente a GH-202 (Figura 3.10). Esta balança possui calibração interna, característica esta que nos permite tarear o equipamento para uma mais fácil preparação da amostra. Possui também uma gama de

pesagem de até 220g, gama esta que se encontra dentro da exigida para a preparação das amostras pretendidas.



**Figura 3.10** Balança de alta precisão A&D Company, Ltd GH-202.

### 3.2.12. Placa de Aquecimento

A preparação de amostras que envolveram o aquecimento do óleo, foi conseguida utilizando uma placa de aquecimento da Jenway. O aquecimento e consequente agitação da mistura são os procedimentos mais comuns aquando da necessidade de atingir a homogeneização da temperatura do fluído. Este processo é conseguido através de um agitador magnético colocado no interior do recipiente que contem a amostra, estando este sujeito a um campo magnético controlado pelo utilizador. Esta placa atinge temperaturas até aos 450 °C, sendo portanto ideal para a realização do nosso estudo.



**Figura 3.11** Placa de aquecimento (Jenway, 2017).

### 3.2.13. Multímetro

Para a calibração da temperatura foi utilizado um multímetro conjuntamente com um termopar de forma a obtermos valores reais de temperatura. Os multímetros são utilizados para medir e avaliar grandezas elétricas, incorporando diversos instrumentos de

medida como voltímetro, amperímetro, ohmímetro, entre outros. Encontra-se representado na Figura 3.12 o multímetro BM252s utilizado no presente estudo da fabricante Brymen®.



**Figura 3.12** Multímetro Brymen®, BM252s.





## 4. CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

Um dos processos chave no desenvolvimento deste dispositivo é a ótima calibração dos sensores. De forma a dispormos de medidas válidas e reais é necessário calibrar devidamente os mesmos. Todo este processo foi feito com o auxílio do engenheiro Manuel Cardoso que tratou de toda a parte da programação e configuração dos sensores.

O desenvolvimento deste estudo apoiou-se na base teórica descrita anteriormente na subsecção das noções teóricas de calibração de sensores. Numa primeira abordagem ao tema foi feito um planeamento dos testes experimentais a ser realizados, na qual se teve especial atenção as condições e requisitos que cada tipo de calibração necessita. De modo a conseguirmos a obtenção de uma informação mais precisa, realizaram-se vários testes para cada sensor. A metodologia adotada para cada teste encontra-se resumida nas secções seguintes, onde se teve em especial atenção as grandezas a medir.

### 4.1. Sensor de Temperatura

Para medir a temperatura do fluído, o sensor LubCos Visc + utiliza uma resistência PT1000 como transdutor entre a grandeza física a medir, neste caso a temperatura, e o sinal elétrico transmitido. A PT1000 é um termómetro composto por uma resistência de platina na sua ponta, estes tipos de medidores recorrem à relação entre a resistência elétrica do material e a sua respetiva temperatura. Como auxiliar na calibração deste primeiro parâmetro foi utilizado um multímetro, em conjunto com um termopar, de forma a medir a variação da temperatura real ao longo do teste. O processo de calibração deste sensor iniciou-se com a realização de alguns testes experimentais de forma a estudar e perceber a resposta do sistema à variação de temperatura imposta. A preparação deste estudo dependeu de três aspetos essenciais que foram garantidos ao longo do mesmo.

- Existência de um ambiente que possibilitasse o controlo da temperatura ao longo do teste, aquecendo este até certos patamares, onde se estabilizou de seguida a temperatura.

- Medições “verdadeiras” constantes ao longo do tempo através do termopar, de forma a garantir alta exatidão e precisão dos resultados.
- Gravação automática dos valores obtidos através dos sensores, associados aos respetivos patamares.

Tendo em conta os aspetos enumerados, foi utilizada uma placa de aquecimento de modo a podermos aquecer o óleo e posteriormente estabilizar a temperatura ao longo de certos patamares dependentes do *setup* usado. À medida que óleo foi estabilizando nos respetivos patamares foi retirada a medida real da temperatura através do multímetro utilizado, assim como o valor médio do sinal transmitido pelos sensores. Posto isto, encontramos na Tabela 4.1 os resultados obtidos através deste teste, resultados estes que foram utilizados na calibração do respetivo sensor.

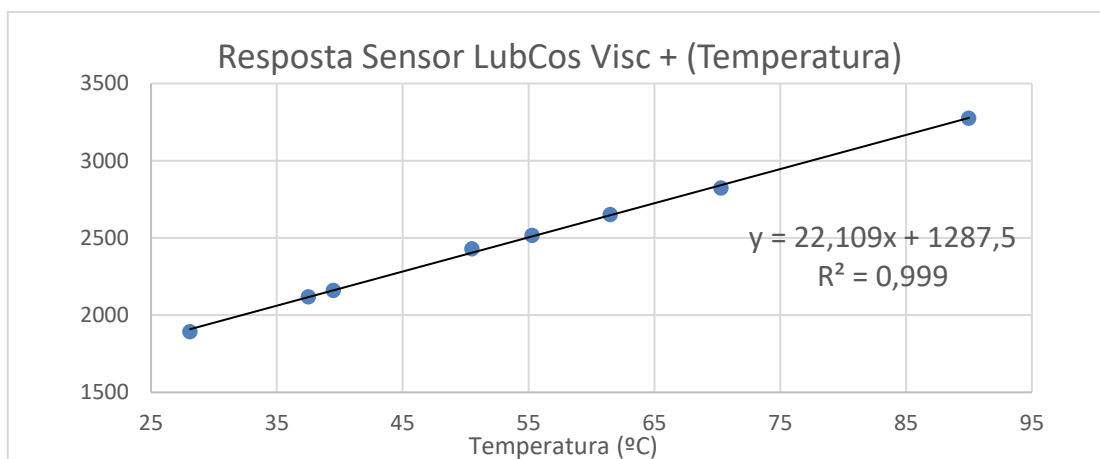
**Tabela 4.1.** Resultados obtidos para calibração do sensor de temperatura LubCos Visc +

<b>Temperatura real (°C)</b>	<b>Média do sinal LubCos Visc + (Temperatura)</b>
28.1	1891,941176
37.5	2119
39.5	2159,22619
50.5	2430,139535
55.3	2517,166667
61.5	2650,3125
70.3	2822,964286
90	3275,857143

O teste realizado permitiu que se extraíssem oito pontos de calibração. Devido a elevada latência do sensor LubCos Visc +, uma das premissas adjacentes a este teste era garantir a permanência do óleo à mesma temperatura durante um determinado período de tempo de modo a assegurar-se que os pontos eram provenientes de condições estáticas.

O primeiro objetivo quando se fala em processos de calibração é obter a equação da resposta do sensor, de forma a se obter uma equação que traduza a relação entre o sinal de saída e o sinal de entrada do sensor. Tendo então em conta os valores de saída do transdutor e na entrada os valores de temperatura, o que se pretende obter é uma expressão do tipo  $VS = f(T)$ , sendo VS os valores de saída e T a temperatura de entrada.

Deste modo, através do processo de regressão linear que foi aplicado, na equação do tipo  $Y = m.X + b$ , o valor da temperatura assumiu o papel de variável independente (X) e o sinal de saída o papel de variável dependente (Y). Posto isto, obteve-se a reta que melhor aproxima o conjunto de pontos experimentais. Através do método dos mínimos quadrados obteve-se o algoritmo de cálculo que se baseia na minimização do somatório dos quadrados das distâncias dos diferentes pontos à reta.



**Figura 4.1** Gráfico representante da relação entre a temperatura real e a resposta do sensor, contendo os pontos de calibração obtidos através do teste estático e a respetiva reta de calibração.

A reta apresentada na Figura 4.1 é a que melhor se ajusta ao conjunto de pontos de calibração utilizados. A avaliação da qualidade de ajustamento é feita tendo em conta o coeficiente de correlação R, coeficiente este que varia entre -1 e 1, onde os valores extremos representam os casos em que os pontos se encontram todos sobre a reta. Quanto mais baixo é o coeficiente de correlação, mais dispersos se encontram os pontos. No nosso caso, o coeficiente de correlação é 0,999, o que corresponde a um ótimo ajustamento dos pontos de calibração pela reta alcançada.

Relativamente a sensibilidade do sensor, temos que esta é a relação entre o sinal de saída e o sinal de entrada do sistema. Tendo em conta que a resposta do sensor é linear, a

sensibilidade do mesmo é o declive da reta de calibração presente na Figura 4.1. Logo, através da equação encontrada anteriormente para a reta de resposta do nosso sensor de temperatura podemos afirmar que a sua sensibilidade é de 22,109 unidades de aquisição/°C.

Posto isto, o passo seguinte foi verificar a linearidade do sinal. Este sensor deve fornecer um sinal de saída que seja diretamente proporcional à grandeza física que está a ser medida, isto é, a curva que representa a resposta ideal deve ser linear. No entanto, na prática isso não ocorre podendo a curva de resposta do sensor apresentar um comportamento que o afasta do comportamento ideal. A linearidade de um sensor é então expressa em percentagem segundo a Equação (4.1).

$$Lin(\%) = \frac{B_{máx} - B_{mín}}{\Delta Y} \times 100, \quad (4.1)$$

onde  $Lin(\%)$  é a linearidade do sensor expressa em percentagem,  $\Delta Y$  a gama de valores do sinal obtido utilizado para a obtenção da reta de calibração e  $B_{máx}$ ,  $B_{mín}$  os valores máximo e mínimo, respetivamente, obtidos através da Equação (4.2).

$$B(i) = Y(i) - (m \times X(i)) \quad (4.2)$$

Através do descrito, foi alcançado para este sensor um fator de linearização de 3,2%.

## 4.2. Sensor de Viscosidade

Após a calibração do sensor correspondente à temperatura, fundamental para a correta obtenção dos valores relativos a viscosidade, foi então feita a calibração deste. Este sensor apresenta dois canais distintos em que um transmite a viscosidade de referência a 40°C e o outro a viscosidade cinemática instantânea. A medição deste parâmetro é feita eletronicamente com a ajuda de um transdutor acústico de ondas superficiais, não apresentando por isso desgaste mecânico. Para este segundo estudo foi utilizado como auxiliar de comparação o gráfico apresentado no ANEXO A onde se retiraram os valores apresentados na Tabela 4.2 que serviram de comparação aos resultados obtidos através do sensor de viscosidade.

**Tabela 4.2.** Valores retirados do diagrama da **Figura A0.1** (Tellus, 2010)

<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Viscosidade [mm<sup>2</sup>/s]</b>
9	300
14	200
25	100
35	60
40	46
50	30
60	20
83	10
93	8
105	6

Semelhantemente a metodologia utilizada para a calibração do sensor de temperatura, a preparação deste estudo dependeu de três aspetos essenciais.

- Contrariamente ao primeiro teste efetuado para o sensor de temperatura, em que o objetivo era estabilizar a temperatura a diferentes patamares, neste teste aqueceu-se o óleo até 90°C deixando-se de seguida arrefecer até à temperatura ambiente de forma a obter os resultados pretendidos.
- Como valores reais que serviram de base para a ótima calibração deste sensor foram utilizados os valores presentes na Tabela 4.2.
- Também a gravação automática dos valores obtidos através dos sensores ao longo do arrefecimento do óleo foi imprescindível para a calibração do mesmo.

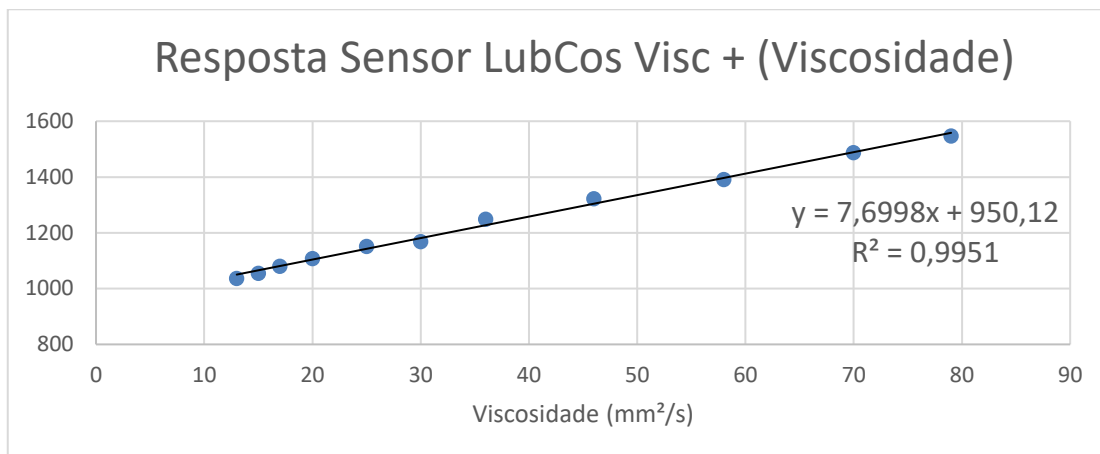
Utilizando novamente a placa de aquecimento como equipamento de eleição aquando da necessidade de aquecer o óleo, iniciou-se o teste acima da temperatura estipulada para o funcionamento do dispositivo em ambiente industrial. Após a realização do teste

foram então obtidos os valores médios relativos à resposta do sensor de viscosidade para as diferentes temperaturas impostas, apresentados de seguida na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3.** Resultados obtidos para calibração do sensor de viscosidade LubCos Visc +

Viscosidade real (mm <sup>2</sup> /s)	Média do sinal LubCos Visc + (Viscosidade)
13	1036,802632
15	1055,119406
17	1081,033333
20	1108,102273
25	1151,890909
30	1168,325581
36	1249,588608
46	1322,83333
58	1391,462236
70	1487,84972677596
79	1547,553933

Para a calibração deste sensor utilizou-se onze pontos de calibração. Seguindo a mesma metodologia utilizada para o sensor de temperatura alcançou-se em primeiro lugar a equação da resposta do sensor. Tendo então desta vez em conta os valores de saída do transdutor e na entrada os valores correspondentes à viscosidade, o que se pretende obter é uma expressão do tipo  $VS = f(V)$ , sendo VS os valores de saída e V a viscosidade de entrada. Semelhantemente ao primeiro caso através do processo de regressão linear que foi aplicado, na equação do tipo  $Y = m.X + b$ , o valor de viscosidade assumiu o papel de variável independente (X) e a saída do sinal o papel de variável dependente (Y). Com isto, obteve-se a reta apresentada na Figura 4.2.



**Figura 4.2** Gráfico representante da relação entre a viscosidade real e a resposta do sensor, contendo os pontos de calibração obtidos através da análise da figura apresentada no ANEXO A.

A reta apresentada na Figura 4.2 é a que melhor se ajusta ao conjunto de onze pontos de calibração utilizados. A avaliação da qualidade de ajustamento é novamente feita tendo em conta o coeficiente de correlação R, que neste caso obteve o valor de 0,9951. Este valor corresponde a um bom ajustamento dos pontos experimentais em relação a reta sendo, no entanto, desejável que os coeficientes de correlação apresentem pelo menos os três primeiros valores à direita da vírgula igual a nove.

Relativamente à sensibilidade deste sensor, tendo em conta que a sua resposta é linear, toma neste caso o valor de 7,6998 unidades de aquisição/mm<sup>2</sup>/s, valor este que corresponde ao declive da reta alcançada na Figura 4.2.

De seguida, o passo seguinte foi verificar a linearidade do sinal. Seguindo a metodologia apresentada na subsecção anterior correspondente ao sensor de temperatura, foi então utilizado novamente as Equações (4.1) e (4.2), tendo sido alcançado um valor de linearização do sensor de 6,99%.

### 4.3. Sensor de Partículas Ferromagnéticas

Como terceiro procedimento no que toca a calibração dos sensores, temos o sensor correspondente as partículas ferromagnéticas (PF). Este sensor analisa continuamente a presença de partículas no óleo através de um método de medição indutivo, isto é, o sensor avalia a quantidade de partículas presentes na sua extremidade através da variação do seu campo magnético.

Neste terceiro teste foram meticulosamente preparadas quatro amostras para o efeito, PR1, PR2, PR3 e PR4 que se encontram resumidas no subcapítulo correspondente à presença de partículas do desenvolvimento experimental. Os valores médios obtidos através dos quatro ensaios encontram-se apresentados na Tabela 4.4. De salientar que os valores médios apresentados foram conseguidos após a estabilização de sinal correspondente a cada ensaio, isto devido ao tempo necessário que as partículas demoram a percorrer o circuito até ao sensor assim como a própria estabilização do sinal por parte do sensor.

**Tabela 4.4.** Resultados obtidos para calibração do sensor de partículas OPCom FerroS

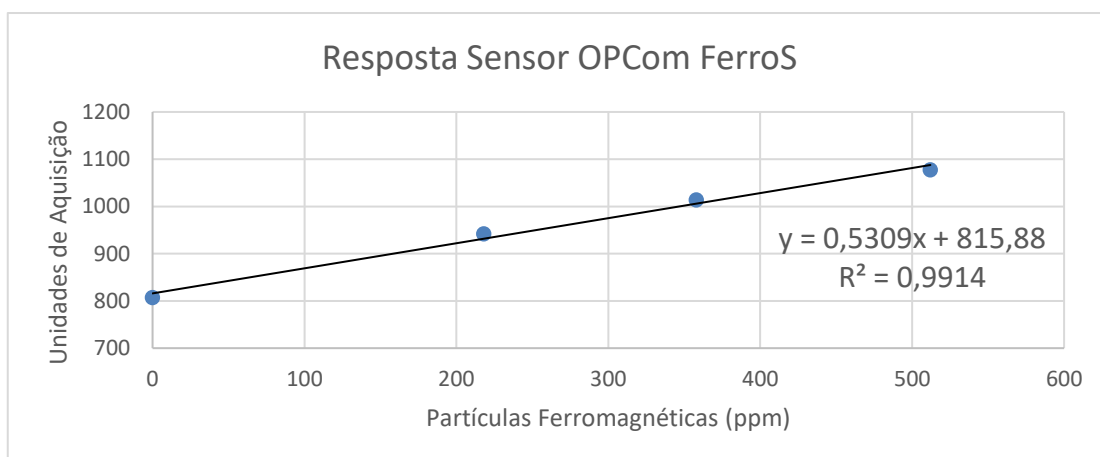
<b>Amostra</b>	<b>Partículas Ferromagnéticas (ppm)</b>	<b>Média do sinal OPCom FerroS</b>
PR1	0	807,4171875
PR2	218	942,162162162162
PR3	358	1013,95098483133
PR4	514	1077,61795555556

Contrariamente aos dois testes anteriores, o teste vocacionado para a presença de PF não implicou mudanças de temperatura no decorrer dos mesmos. No entanto, as realizações dos mesmos dependeram de vários aspetos essenciais.

- A preparação metódica das quatro amostras a serem utilizadas para a aquisição do sinal do sensor.
- O isolamento das mesmas, após preparação, em relação ao meio exterior de forma a não ocorrer contaminações indesejadas.
- Limpeza do dispositivo após a realização de cada teste de forma a garantir uma correta análise de cada amostra de modo a que não ocorra contaminações devido a amostra anterior.
- Gravação automática dos valores obtidos em cada teste durante um determinado período de tempo de modo a poder-se observar a estabilização do sinal.



Utilizou-se para a calibração do sensor OPCom FerroS os quatro pontos alcançados através das quatro amostras apresentados na Tabela 4.4. Seguindo a mesma metodologia que tem vindo a ser adotada ao longo deste capítulo foi alcançada a respetiva equação da resposta do sensor. Tendo então como valores de entrada a quantidade de PF presentes na amostra de óleo, o que se pretendeu obter foi uma expressão do género  $VS = f(PF)$ , onde VS corresponde aos valores de saída do transdutor e PF as partículas ferromagnéticas presentes na amostra. Utilizou-se novamente o método de regressão linear para o efeito onde a presença de PF assumiu o papel de variável independente (X) e o valor de saída do sinal o papel de variável dependente (Y) na equação  $Y = m.X + b$ . Seguindo-se então esta metodologia obteve-se a reta presente na Figura 4.3.



**Figura 4.3** Gráfico representante da relação entre as partículas ferromagnéticas e a resposta do sensor, contendo os pontos de calibração obtidos através dos testes às amostras P1, P2, P3 e P4.

Posto isto, conclui-se que a reta que melhor se ajusta a resposta do sensor OPCom FerroS, tendo em conta os quatro pontos de calibração utilizados, se encontra apresentada na Figura 4.3. Verificou-se de seguida o coeficiente de correlação R de modo a avaliar a qualidade do ajustamento feita, tendo-se obtido um valor de 0,9914. Este valor corresponde a um bom ajustamento dos pontos experimentais alcançados em relação a reta de calibração.

No que diz respeito a sensibilidade do presente sensor, tendo em conta que a sua resposta é linear, temos que esta toma o valor de 0,5309 unidades de aquisição/ppm, valor este que corresponde ao declive da reta obtida na Figura 4.3. O passo seguinte que se teve

em conta na análise deste sensor foi verificar a linearidade do sinal. Seguiu-se para isso o mesmo procedimento utilizado nas duas subsecções anteriores, onde se utilizou as Equações (4.1) e (4.2) tendo-se atingido um valor de linearização do sensor de 4,03%.

#### 4.4. Sensor de Humidade Relativa

Como último sensor a ser calibrado, temos o sensor LubCos H<sub>2</sub>O. Este sensor analisa a quantidade de humidade relativa presente no óleo através da captura das suas moléculas ao longo do tempo.

Neste final e último teste referente à calibração dos sensores foram preparadas quatro amostras HR1, HR2, HR3 e HR4, apresentadas anteriormente no subcapítulo referente à presença de água no óleo. Posto isto, obteve-se então os valores médios da resposta do sensor para cada amostra, resultados estes que se encontram representados na Tabela 4.5. Seguindo a mesma ideologia do subcapítulo anterior, a obtenção dos valores médios relativos à resposta do sensor teve em conta o tempo necessário que este necessita para estabilizar o sinal. De salientar que os valores referentes à humidade relativa são apenas variações da mesma, isto implica que apenas podemos retirar a sensibilidade do mesmo, sendo posteriormente necessário o cálculo do b da equação da reta de ajustamento.

**Tabela 4.5.** Resultados obtidos para calibração do sensor de água LubCos H<sub>2</sub>O.

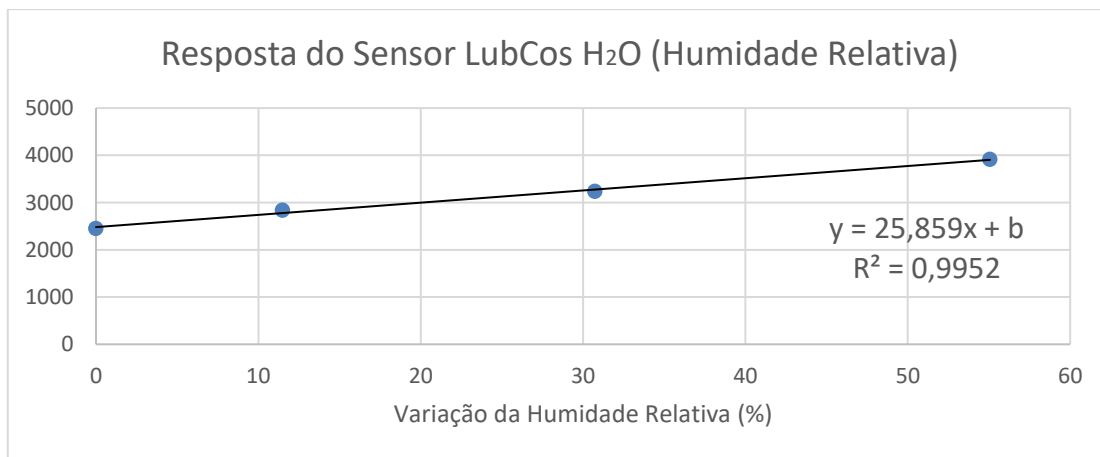
<b>Varição da Humidade Relativa (%)</b>	<b>Média do sinal LubCos H<sub>2</sub>O</b>
0	2453,537994
11,49	2834,5
30,72	3235,916667
55,00	3914,805556

Semelhantemente ao procedimento adotado na calibração do sensor correspondente à presença de partículas também este teve como pontos essenciais os seguintes:

- A preparação meticulosa das quatro amostras a serem utilizadas para a aquisição do sinal do sensor.
- O isolamento das mesmas, após preparação, em relação ao meio exterior de forma a não ocorrer contaminações indesejadas.
- Gravação automática dos valores obtidos em cada teste durante um determinado período de tempo de modo a poder-se observar a estabilização do sinal.

Para a obtenção da reta que melhor se ajusta a calibração do sensor LubCos H<sub>2</sub>O, foram utilizados os pontos apresentados na Tabela 4.5. Estes pontos foram obtidos através da resposta média do sinal dada pelo sensor relativamente as quatro amostras utilizadas.

Assumindo como VS os valores de sinal à saída do transdutor e HR os valores de humidade relativa, o objetivo deste teste passou por obter uma expressão do género  $VS = f(HR)$ . Aplicou-se de seguida o método de regressão linear como método ótimo de calibração do presente estudo onde o valor de humidade relativa assumiu o papel de variável independente (X) e o valor de saída do sinal o papel de variável dependente (Y) na equação  $Y = m.X + b$ . Posto isto, obteve-se a reta presente na Figura 4.4.



**Figura 4.4** Gráfico representante da relação entre a variação da humidade relativa e a resposta do sensor, contendo os pontos de calibração obtidos através dos testes às amostras HR1, HR2, HR3 e HR4.

Realizado então o estudo referente à calibração do sensor de humidade relativa LubCos H<sub>2</sub>O, conclui-se que a reta que melhor se ajusta à resposta do sensor, onde se considerou os pontos experimentais presentes na Tabela 4.5, se encontra apresentada na

Figura 4.4. Posto isso, verificou-se o coeficiente de correlação R de modo a avaliar a qualidade do ajustamento feita para este caso, tendo-se obtido um valor de 0,9952. Como já foi mencionado anteriormente este valor apresenta um bom ajustamento da reta em relação aos pontos experimentais utilizados.

Analisou-se de seguida a sensibilidade do mesmo tendo em conta uma resposta linear do sinal. Obteve-se como valor de sensibilidade o declive da reta de ajustamento do sinal, ou seja, 25,859 unidades de aquisição/%. O passo seguinte que se teve em conta na análise deste sensor, semelhantemente aos anteriores, foi verificar a linearidade do sinal. Seguiu-se para isso o mesmo procedimento utilizado nas três subsecções anteriores, onde se utilizou as Equações (4.1) e (4.2) tendo-se atingido um valor de linearização do sensor de 6,56%.

Para concluir a análise referente a este sensor houve ainda a necessidade de calcular o b da reta de ajustamento dos pontos experimentais. Utilizou-se então a Equação (4.3) para o efeito,

$$Y = 25,859X + b, \quad (4.3)$$

onde conhecendo o valor da resposta do sinal correspondente a 100% de HR, através da análise da amostra HR5, obteve-se um valor de b igual a 1411,1.

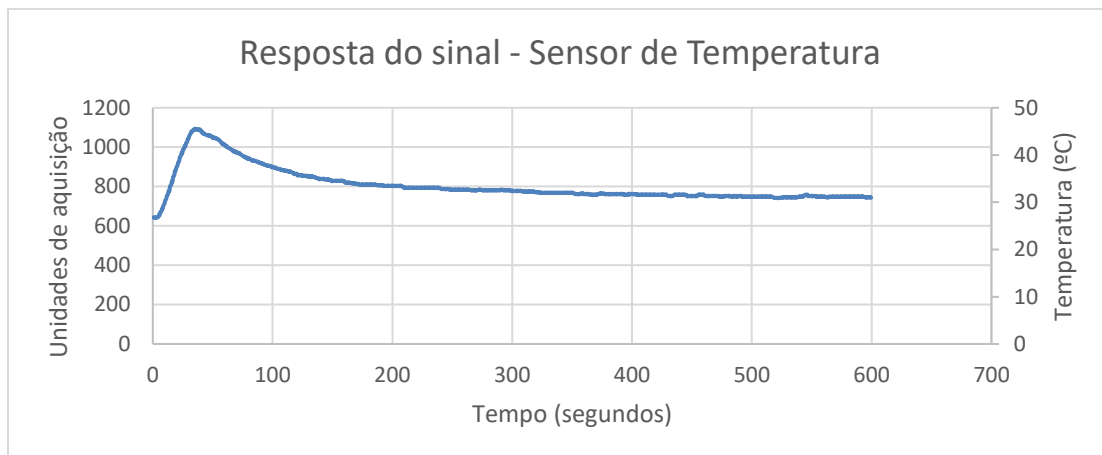
## **5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos através dos três sensores utilizados neste projeto, seguindo a metodologia adotada no capítulo três. Os testes encontram-se divididos em cinco partes: sensor de temperatura, sensor de viscosidade, sensor de partículas, sensor de H<sub>2</sub>O e sensor de permissividade.

O primeiro e segundo teste caracteriza-se por ter um gradiente de temperatura que varia ao longo do tempo de modo a perceber as alterações dos valores medidos para a temperatura e viscosidade. Um terceiro teste, dedicado a presença de água no óleo, teve como principal fator de diferenciação o facto de se ter adicionado quantidades controladas de água à mistura óleo/água, de modo a perceber a resposta do sensor LubCos H<sub>2</sub>O. Como quarto teste foi adicionada uma quantidade de partículas ferromagnéticas à mistura com o intuito de analisar a resposta do sensor correspondente a este parâmetro. Por fim, foi ainda verificado as interferências cruzadas que possam existir nos restantes sensores com a alteração de alguns parâmetros críticos para a análise.

### **5.1. Resposta do Sensor de Temperatura**

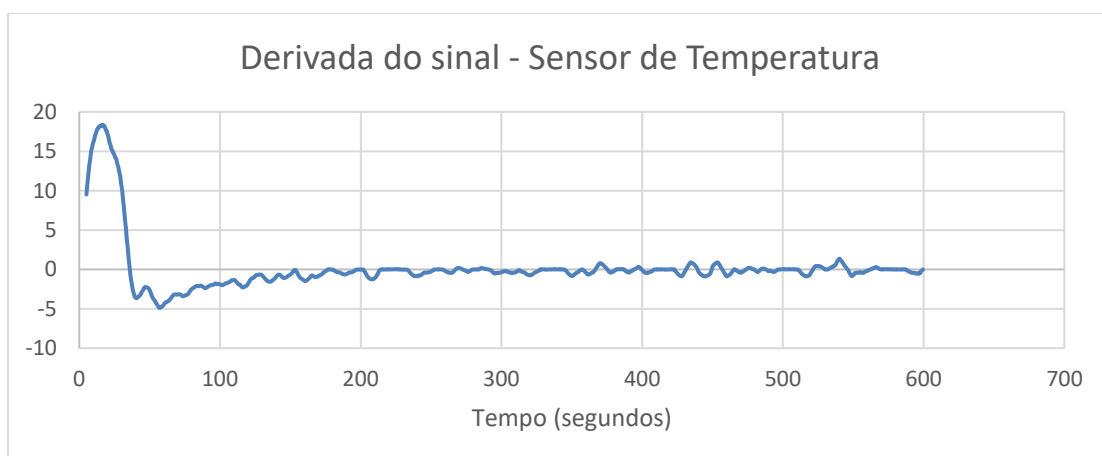
Neste primeiro subcapítulo referente à apresentação e discussão de resultados será apresentado os resultados obtidos relativamente ao sensor de temperatura. Como mencionado anteriormente, este primeiro teste teve como características principais o aumento da temperatura da amostra de forma a observar a resposta a que este está sujeito aquando do arrefecimento da mesma. Os resultados obtidos para este parâmetro encontram-se apresentados na Figura 5.1, resultados estes que foram continuamente comparados ao longo do teste com um multímetro munido de um termopar colocado estrategicamente ao lado da resistência PT1000 do sensor para a obtenção de resultados credíveis.



**Figura 5.1** Resultados do sensor LubCos Visc +, canal correspondente à temperatura.

Os principais pontos a retirar após a realização deste teste são que o sensor responde positivamente ao estímulo imposto, apresentando valores suficientemente discriminatórios em comparação com o termopar utilizado. No entanto, com a realização de vários testes foi notada uma elevada latência da PT1000, demorando o sensor LubCos Visc + a estabilizar a sua temperatura quando sujeito a elevados gradientes de temperatura. Sendo os testes da célula laboratorial destinados a baixos gradientes de temperatura encontramos aqui uma boa resposta para as solicitações exigidas.

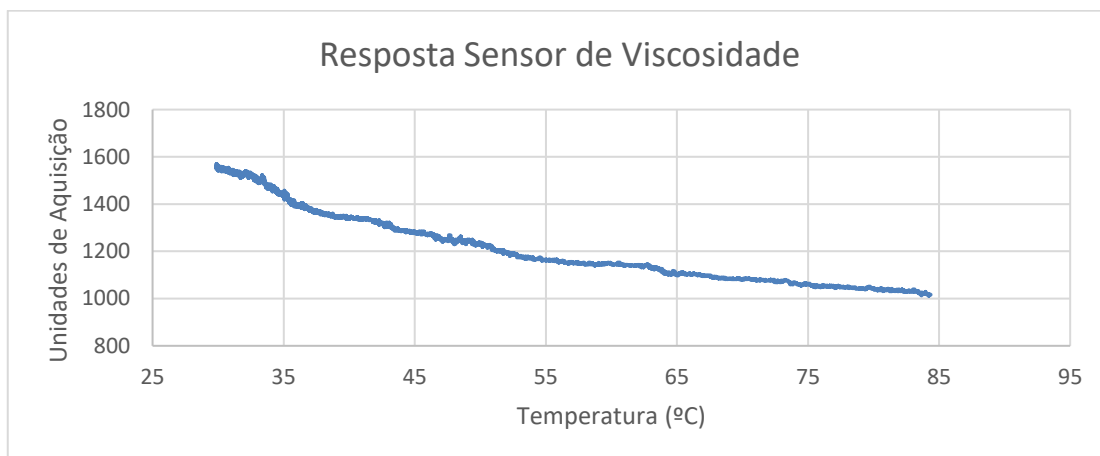
De salientar que o sensor demora cerca de 36 segundos a estabilizar o sinal após a colocação do óleo no dispositivo, como se pode comprovar através da derivada do sinal presente na Figura 5.2.



**Figura 5.2** Derivada do sinal LubCos Visc +, canal correspondente à temperatura.

## 5.2. Resposta do Sensor de Viscosidade

Neste subcapítulo são apresentados os resultados obtidos ao sensor LubVisc + referentes ao canal da viscosidade. Tendo como ponto de partida a viscosidade apresentada pelo fabricante Shell, para o óleo Tellus S2 M 46, era de esperar que o nosso sensor a uma temperatura de 40°C apresenta-se como resposta 46 mm<sup>2</sup>/s, valores estes correspondentes à gama VG 46 da norma ISO 3448. Para além desta premissa, um dos objetivos aliados a este primeiro teste é perceber a resposta do sensor a diferentes temperaturas, onde para isso foi aquecido o óleo até 95 °C, deixando este arrefecer ao longo do seu estudo. Posto isto, fez-se então a análise do mesmo enquanto este ia arrefecendo à temperatura ambiente e pelo contacto com a célula laboratorial, onde se obteve a seguinte resposta apresentada na Figura 5.3.

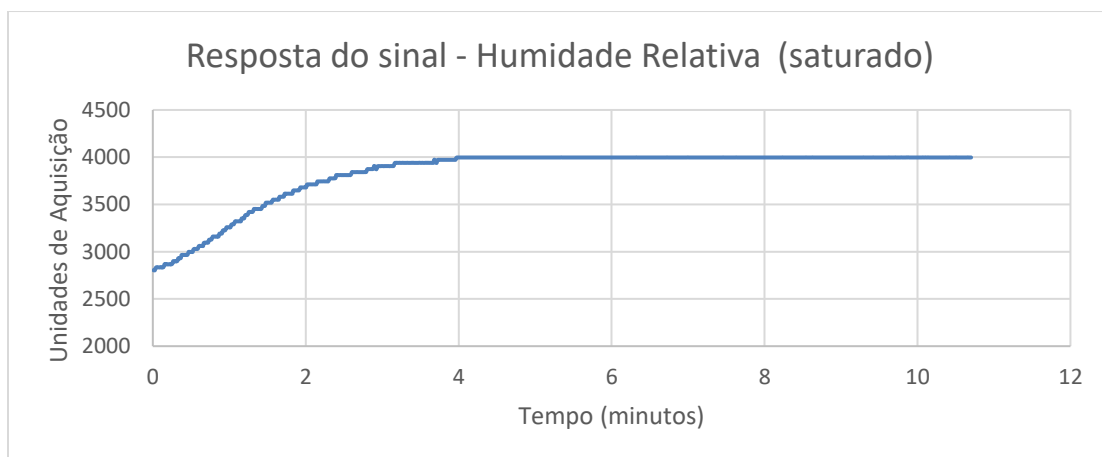


**Figura 5.3** Resultados do sensor LubCos Visc +, canal correspondente à viscosidade.

Posteriormente, ao se analisar os resultados obtidos ao teste vocacionado para o parâmetro de viscosidade percebeu-se que com o aumento da temperatura temos um aumento gradual da resposta do sinal, resultado este que era de esperar tendo em conta o comportamento do óleo perante a diferença de temperatura imposta. Comparando os valores previamente conhecidos com os valores obtidos após calibração constatou-se também que este sensor apresenta resultados suficientemente discriminatórios, estando então apto para ser utilizado como ferramenta ótima na análise da viscosidade cinemática. Também de notar é o facto de o sensor apenas trabalhar para valores inferiores a 85°C, sendo este o limite máximo superior para o qual transmite sinal.

### 5.3. Resposta do Sensor de Presença de Água

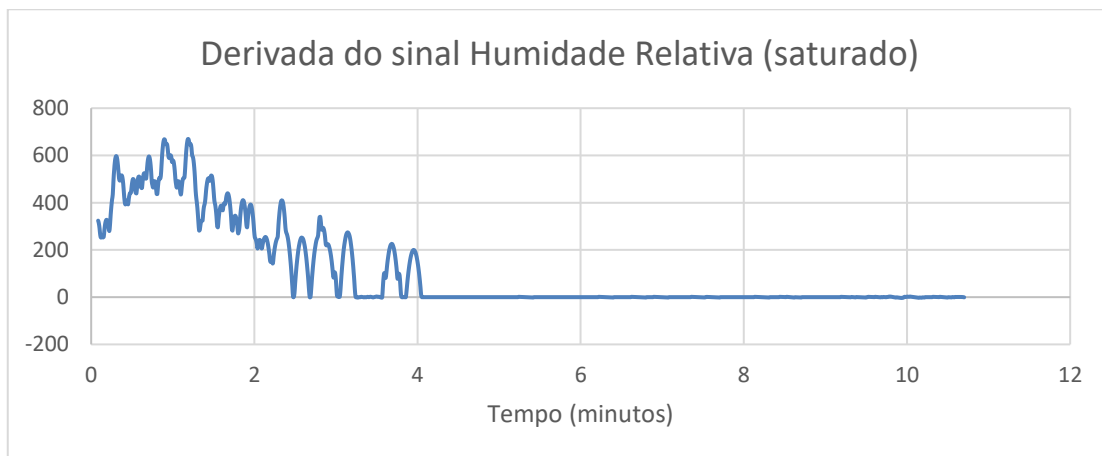
Os resultados do sensor LubCos H<sub>2</sub>O foram obtidos através de dois testes diretamente vocacionado para o caso. Utilizou-se o mesmo óleo do primeiro teste, onde adicionou-se uma quantidade controlada de água através de uma balança de alta precisão como referido no capítulo destinado à metodologia. A quantidade de água adicionada teve em conta o ponto de saturação do óleo, e a quantidade de óleo utilizada para o estudo de modo a perceber a quantidade de humidade relativa, em percentagem, que adicionamos à mistura óleo/água. Posto isto, foi adicionado 1119 ppm de água à mistura perfazendo então os 100% (teste HR5) de humidade relativa requeridos para este primeiro teste. Os resultados obtidos através deste encontram-se apresentados na Figura 5.4.



**Figura 5.4** Resultados do sensor LubCos H<sub>2</sub>O, canal correspondente à humidade relativa (Teste 1).

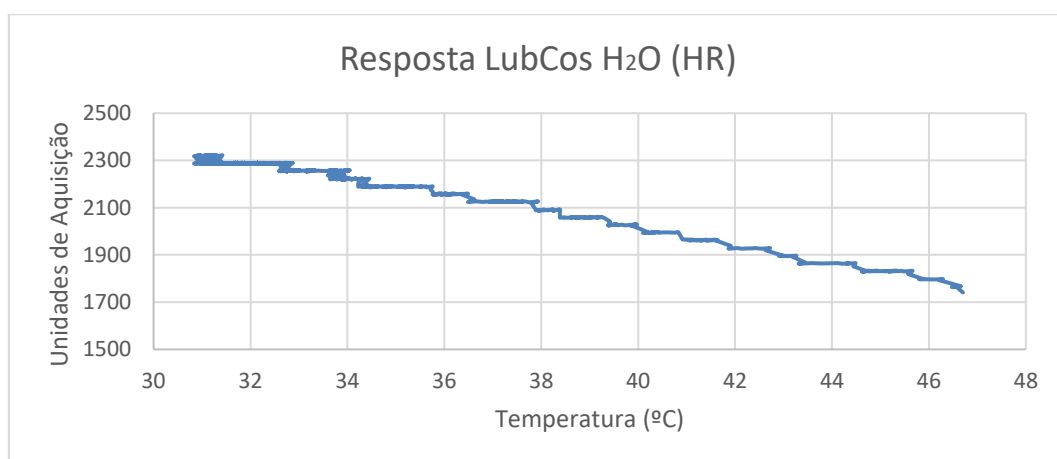
Com a realização deste teste, onde o óleo encontra-se completamente saturado, constatou-se que o sensor demora sensivelmente quatro minutos a estabilizar nos 100% de humidade relativa, facto este que é comprovado pela derivada do sinal presente na Figura 5.5. Isto deve-se ao facto de o sensor ter de capturar as moléculas de água presentes no óleo enquanto este percorre ao longo do circuito. O resultado obtido através deste primeiro foi um sucesso, permitindo assim conhecer um dos parâmetros críticos estudados na parte da revisão bibliográfica.





**Figura 5.5** Derivada do sinal LubCos H<sub>2</sub>O, canal correspondente à humidade relativa (Teste 1).

Um segundo teste, semelhantemente ao primeiro realizado para a viscosidade trata-se de fazer variar a temperatura ao longo do teste. Aquecendo-se então o óleo novamente a 95°C, deixou-se este arrefecer à temperatura ambiente à medida que é realizado o teste. É de expectar que a o sinal correspondente à humidade relativa aumente com o arrefecimento da temperatura. Isto deve-se, como já foi mencionado anteriormente, ao facto de o ponto de saturação aumentar com o aumento da temperatura, pelo que, para uma mesma quantidade de água teremos uma percentagem de humidade relativa superior para temperaturas mais baixas. Posto isto, encontra-se na Figura 5.6 o teste destinado a observar o comportamento do sensor a diferentes temperaturas.



**Figura 5.6** Resultados do sensor LubCos H<sub>2</sub>O, canal correspondente à humidade relativa (Teste 2).

Contrariamente ao primeiro teste onde se observou uma subida gradual da humidade relativa (HR) até um máximo de 100%, neste teste pode-se observar um comportamento que depende da temperatura da amostra. Como mencionado no subcapítulo referente a humidade relativa é expectável que esta aumente gradualmente com o descer da temperatura, facto este que foi comprovado pelo sinal obtido através do sensor LubCos H<sub>2</sub>O na Figura 5.6.

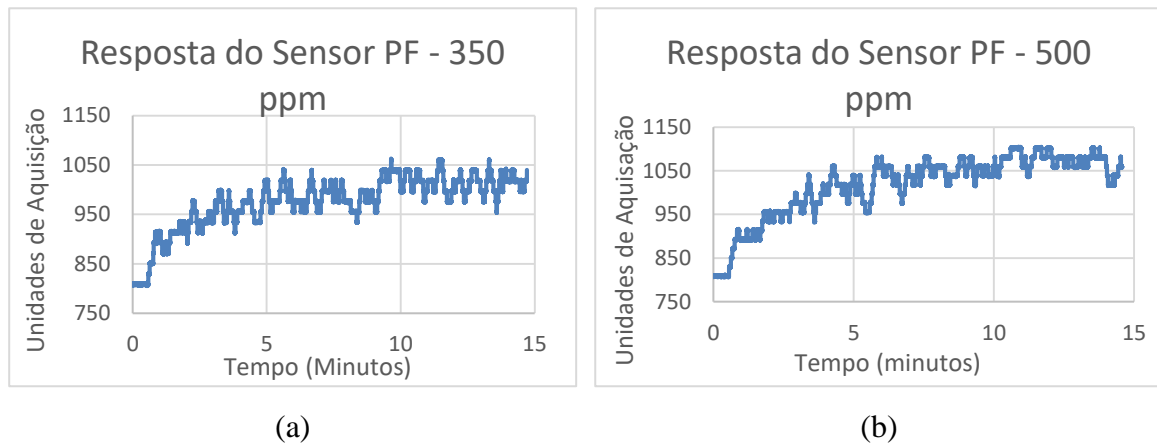
De salientar também o facto de no Teste 1 o sensor ter demorado mais tempo a estabilizar o sinal muito devido a captura de moléculas de água ao longo do tempo, pelo que o tempo mínimo requerido para este sensor, tendo em conta que não são conhecidas as condições iniciais, está fixo nos quatro minutos sensivelmente.

#### **5.4. Resposta do Sensor de Partículas Ferromagnéticas**

Seguindo-se novamente a metodologia adotada no capítulo 3 foram preparadas quatro amostras para os testes referentes ao sensor de partículas ferromagnéticas (PF). Utilizou-se novamente uma balança de alta precisão onde se preparou então as quatro amostras com 0 ppm, 200ppm, 358 ppm e 512 ppm de partículas ferromagnéticas. Os valores que se adicionou à mistura tiveram em conta um limite máximo de admissibilidade para este tipo de análises de 500 ppm, valor este normalmente utilizado como valor limite aquando da necessidade de intervenção no equipamento pelas equipas de manutenção.

A realização dos testes relativos a este sensor tem dois objetivos primordiais, perceber a linearidade do sensor em relação a quantidade de partículas impostas e a reação do mesmo aquando sujeito a este tipo de contaminação. Assim sendo, encontra-se na Figura 5.7 a evolução do sinal obtido para os ensaios referentes às amostras com 358 ppm e 512 ppm.

Observou-se ambas as respostas presentes na Figura 5.7 onde se constatou que o sensor demora cerca de dez minutos a estabilizar após a colocação das PF no circuito. Também de notar é o facto de nos primeiros segundos do teste o sensor apresentar um sinal constante de ocupação, isto deve-se ao facto do tempo que as PF demoram a percorrer o circuito desde o depósito onde se encontram inicialmente até à câmara onde se encontra o sensor OPCom FerroS. No entanto, como era de esperar a média do sinal de ocupação obtido para o teste PR3 é ligeiramente superior relativamente ao teste PR2.

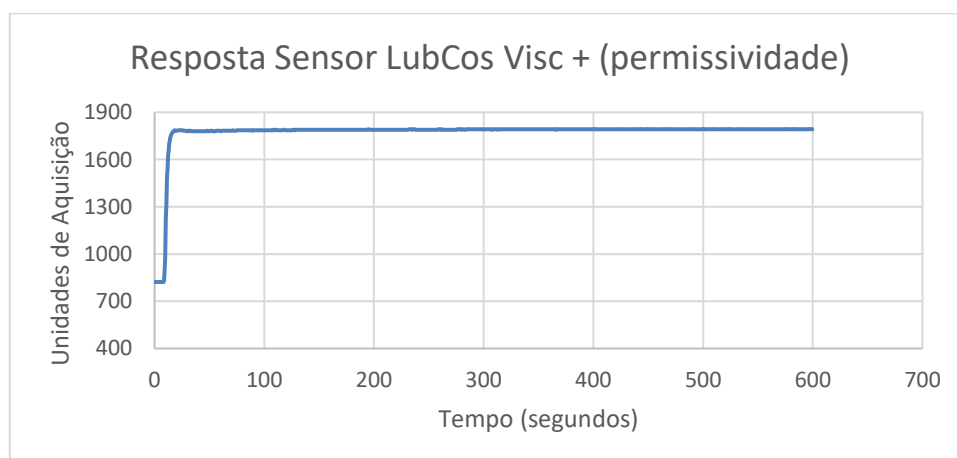


**Figura 5.7.** Resposta do sensor OPCom FerroS: (a) Amostra com 350 ppm; (b) Amostra com 500 ppm.

Constatou-se também que a resolução do sensor não é a mais adequada para a análise pretendida, atingindo aproximadamente os 7,5 % de ocupação para o nosso valor limite de admissibilidade (500 ppm). De salientar também a existência de um elevado número de picos de sinal, muito devido à baixa resolução do sensor para quantidades de PF tão reduzidas.

### 5.5. Resposta do Sensor Permissividade

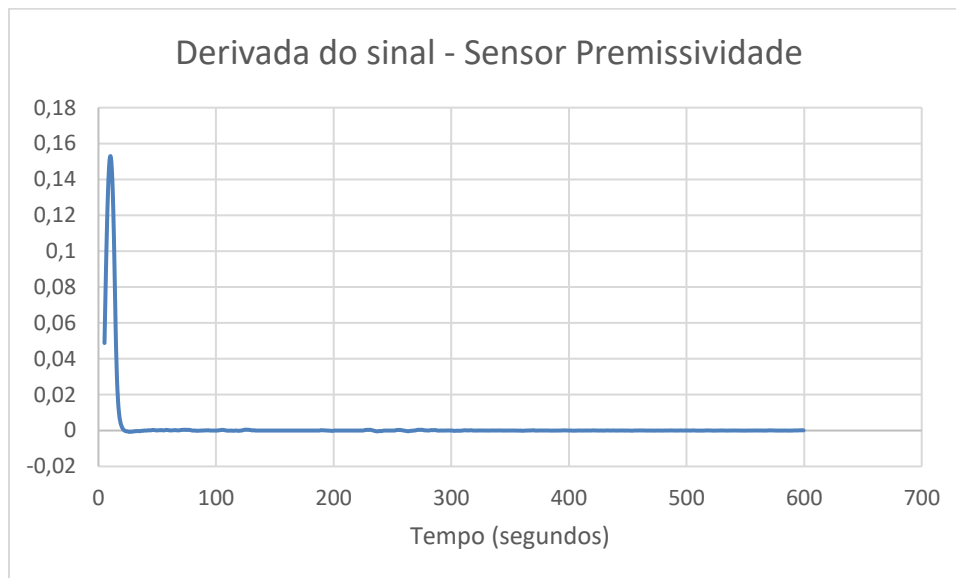
Por fim, como último teste a ser realizado temos o teste vocacionado para a permissividade. Encontramos na Figura 5.8 os resultados obtidos relativamente a este parâmetro.



**Figura 5.8** Resultados do sensor LubCos Visc +, canal correspondente à permissividade.

O facto de não se ter conseguido obter os valores reais de permissividade do correspondente óleo leva a necessidade de uma posterior análise para este parâmetro, não se podendo obter valores suficientemente discriminatórios em relação ao mesmo. Também de referir que a calibração utilizada para o respetivo sensor é a calibração já existente de fábrica, não tendo esta sido verificada por falta de informação em relação aos valores reais de permissividade.

No entanto, como podemos constatar o sensor demora menos de vinte segundos a estabilizar o sinal após a colocação da amostra no reservatório da célula, facto este que é comprovado pela derivada do sinal presente na Figura 5.9.



**Figura 5.9** Derivada do sinal LubCos Visc +, canal correspondente à permissividade.

## 5.6. Interferências Cruzadas

De modo a perceber as interferências cruzadas que pudessem existir devido aos diversos parâmetros relativos a caracterização do óleo, foram feitos diversos testes à temperatura ambiente de forma a perceber se estes provocariam interferências nas respostas dos sensores que não se encontram destinados a medir esses mesmos parâmetros.

Com isto, foi primeiramente realizado o teste correspondente ao parâmetro da água. Este teste teve como principal objetivo perceber se a resposta dos sensores correspondentes à viscosidade, partículas ferromagnéticas e permissividade sofriam alterações com a adição de água à mistura. Um segundo teste teve em conta o parâmetro correspondente às partículas ferromagnéticas. Neste teste o objetivo primordial foi analisar

a resposta obtida através dos sensores correspondentes à viscosidade, permissividade e de humidade relativa, novamente com o intuito de perceber se estas provocariam alterações na resposta do sensor. Por fim, como último teste, foram utilizadas partículas de sílica onde se observou a resposta de todos os sensores.

Posto isto, foi alcançada a Tabela 5.1 onde se encontram os valores médios obtidos para cada teste e para cada sensor após estabilização do sinal para as diferentes interferências cruzadas que pudessem existir.

**Tabela 5.1.** Interferências cruzadas na resposta dos sensores, adição de água, partículas ferromagnéticas e sílica

Sensores	Resposta normal do sensor	Resposta após a adição de água	Resposta após a adição de PF	Resposta após a adição de sílica
Sensor LubCos Visc + (Viscosidade)	1681,201	1681,101	1682,907	1679,356
Sensor LubCos Visc + (Permissividade)	2016,659	2029,13	2016,897	2017,903
Sensor LubCos H <sub>2</sub> O (Humidade Relativa)	2452	–	2462,235	2743,698
Sensor LubCos H <sub>2</sub> O (Temperatura)	1873,678	1870,55	1872,575	1872,563
Sensor OPCom FerroS	814,4968619	816,0677	–	815,9189

Após a realização deste estudo constatou-se que em todos os parâmetros analisados apenas a adição de sílica provocou alterações na resposta do sensor referente à humidade relativa. Isto pode ser explicado pelo facto de a sílica apresentar humidade na sua amostra, interferindo assim na análise do sensor. Seria por isso desejado fazer uma posterior análise onde se procedesse à secagem da sílica antes da execução do teste de modo a perceber se a interferência causada é provocada pela humidade relativa presente na sílica se pela própria sílica aquando da sua passagem pelo sensor.



## 6. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Relativamente à análise que foi feita aos sensores utilizados nesta primeira iteração do projeto após a construção da célula laboratorial, consegue-se retirar várias conclusões acerca dos mesmos.

Após a realização deste estudo pode-se concluir que os sensores LubCos Visc + e LubCos H<sub>2</sub>O encontram-se em ótimas condições para a obtenção dos resultados referentes aos parâmetros para os quais estão diretamente vocacionados. Estando o LubCos Visc + responsável pela medição de três parâmetros, sendo estes a temperatura, a viscosidade e a permissividade, e o sensor LubCos H<sub>2</sub>O responsável pela medição da humidade relativa presente no óleo encontrou-se aqui dois dos sensores a incorporar na célula industrial que será posteriormente construída.

Contrariamente a estes, o sensor OPCom FerroS teve alguns problemas principalmente relacionados com a baixa resolução do mesmo, a incapacidade de deteção de partículas metálicas não ferromagnéticas e o facto de o imã capturar permanentemente as partículas impedindo o sensor de ultrassons detetar as mesmas, não sendo, portanto, adequado para o tipo de análise que se requer para este parâmetro.

Quanto ao desenvolvimento e construção da base que sustenta todo o dispositivo temos que esta primeira iteração construída foi alcançada com sucesso, não existindo fugas de óleo a assinalar assim como turbulência aquando da circulação de óleo pelo dispositivo. De salientar, no entanto, alguns pontos onde ocorre deposição de partículas que devem merecer especial atenção no posterior desenvolvimento da célula industrial final. Conjuntamente a isto seria também interessante estudar outros *designs* de modo a compactar ao máximo a célula final que se pretende obter.

A conclusão a retirar desta primeira fase do projeto é positiva, havendo apenas a necessidade de alinhar alguns pormenores no que toca ao *design* da célula assim como a necessidade de observar novos sensores no que toca a análise e discriminação das partículas.

De salientar que não foi feito o estudo relativamente ao sensor de ultrassons, havendo por isso a necessidade de proceder a todo o estudo relativamente a este parâmetro.

## 6.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Para complementar o trabalho apresentado nesta dissertação, como pontos possíveis a ter em atenção para a realização de trabalhos futuros definem-se os seguintes:

- De modo a finalizar os objetivos pretendidos para esta primeira fase de projeto, fica a necessidade de proceder a todo o estudo que envolve o sensor de ultrassons.
- Para complementar o trabalho de otimização feito nesta dissertação, seria interessante fazer um estudo com a utilização de novos sensores de menor tamanho de modo a otimizar o tamanho da célula, obtendo a mesma fiabilidade.
- Um ponto a ter também em atenção é o facto de não ter sido feito uma calibração diretamente vocacionada para a permissividade devido à falta de valores reais. Seria, portanto, necessário fazer esta calibração através da utilização de valores pré conhecidos de diferentes tipos de fluídos.
- Inserir novos sensores capazes de analisar outros parâmetros importantes na caracterização do óleo não estudados nesta dissertação.
- Outro aspeto seria procurar novas soluções construtivas de modo a otimizar o tamanho da célula, reduzindo assim a quantidade de óleo necessária a ser analisada e aumentando a facilidade de transporte



---

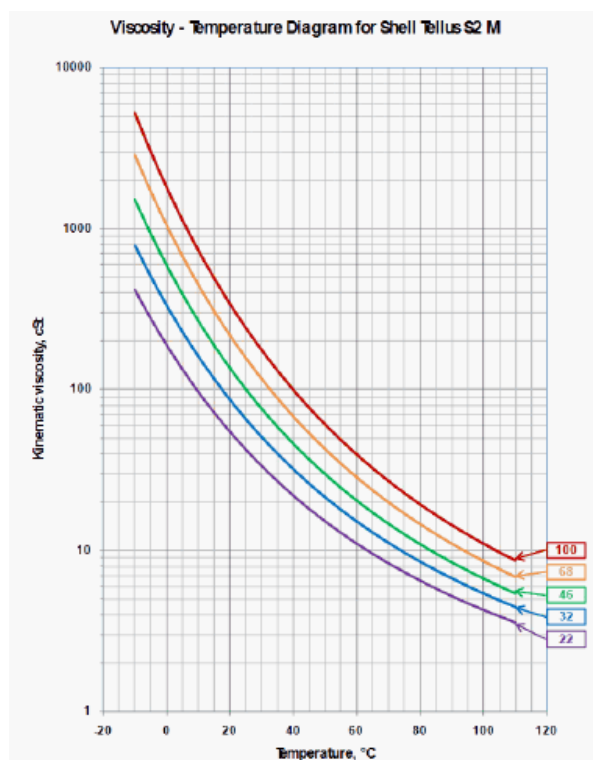
## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, A. ., & Energia, G. (2003). Lubricant condition monitoring. *Gears and Transmissions Workshop*, (June), 231–244.
- AMETEK. (2013). Oil Analysis, Particle Count And Particle Shape Classefication. Retrieved April 29, 2019, from <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9978>
- Cook, J. S. (2018). Ultrasonic Sensors: How They Work. Retrieved April 29, 2019, from <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/ultrasonic-sensors-how-they-work-and-how-to-use-them-with-arduino>
- Crapiste, G. H., Brededan, M. I. V., & Carelli, A. A. (1999). Oxidation of sunflower oil during storage. *JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 76(12), 1437–1443. <https://doi.org/10.1007/s11746-999-0181-5>
- Eliomar Evaristo FerreiraI;, BrandãoII;, Gomes, P. R., PeresIV, KleinIII;, Bernhard, & Clark, A. E. (2005). Reologia de suspensões minerais: uma revisão. Retrieved April 25, 2019, from [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-44672005000100014](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672005000100014)
- Kane, S. N., Mishra, A., & Dutta, A. K. (2016). Preface: International Conference on Recent Trends in Physics (ICRTP 2016). *Journal of Physics: Conference Series*, 755(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/755/1/011001>
- Karanović, V. V., Jocanović, M. T., Wakiru, J. M., & Orošnjak, M. D. (2018). Benefits of lubricant oil analysis for maintenance decision support: A case study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 393(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/393/1/012013>
- Karthiayini, K., & Philomina, P. T. (2010). Effect of temperature and relative humidity on haematology of chicken. *Indian Veterinary Journal*, 87(3), 232–235.
- Kumbár, V., & Votava, J. (2014). Excessive additive effect on engine oil viscosity. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 62(5), 1015–1020. <https://doi.org/10.11118/actaun201462051015>

- Lefebvre, F., Petit, J., Nassar, G., Debreyne, P., Delaplace, G., & Nongaillard, B. (2013). Inline high frequency ultrasonic particle sizer. *Review of Scientific Instruments*, 84(7). <https://doi.org/10.1063/1.4811847>
- Leigh-Jones, C. (2004). Water contamination in oil. *Motor Ship*, 85(1005), 34–35.
- Mačuzić, I., & Jeremić, B. (2004). Proactive approach to oil maintenance strategy. *Tribology in Industry*, 26(1–2), 27–31.
- Mandal, P. C., Abdullah, A. Bin, & Rahman, M. M. (2016). Total Acid Number Reduction of 2, 6-Naphthalenedicarboxylic Acid Using Subcritical Methanol for Reducing Acidity of Heavy Oil: A Kinetic Study. *Procedia Engineering*, 148, 1213–1219. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.454>
- Poley, J. (2007). The History of Oil Analysis. Retrieved February 27, 2019, from <https://www.machinerylubrication.com/Read/1113/history-of-oil-analysis>
- Rajab, A., Sulaeman, A., Sudirham, S., & Suwarno, S. (2011). A Comparison of Dielectric Properties of Palm Oil with Mineral and Synthetic Types Insulating Liquid under Temperature Variation. *ITB Journal of Engineering Science*, 43(3), 191–208. <https://doi.org/10.5614/itbj.eng.sci.2011.43.3.3>
- Rajesh Kanna, A., S, S. K., S, S. P., Raj A, V. R., & sudheer, A. K. (2017). Experimental Analysis of Flash Point of Lubricating oil. *International Refereed Journal of Engineering and Science*, 6(4), 53–55. Retrieved from [www.irjes.com](http://www.irjes.com)
- Rana, B. S., Cho, D. W., Cho, K., & Kim, J. N. (2018). Total Acid Number (TAN) reduction of high acidic crude oil by catalytic esterification of naphthenic acids in fixed-bed continuous flow reactor. *Fuel*, 231(March), 271–280. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.05.074>
- Reisec, E. (2017). Conceitos e objetivos da lubrificação. Retrieved April 12, 2019, from <https://www.linkedin.com/pulse/conceito-e-objetivos-da-lubrificação-edvaldo-reisec/>
- Smith, M. (2004). Oil analysis vs. microscopic debris analysis: when and why to choose. *Practicing Oil Analysis*. Retrieved from <http://teraspeed.com/oil/AI M Smith POA Reprint.pdf>
- Spada, A. L. (2006). O Ouvido Humano 2- Impedância e Sistema Ossicular. *Attack Do Brasil*, 6. Retrieved from [http://www.attack.com.br/artigos\\_tecnicos/ouvido\\_humano.pdf](http://www.attack.com.br/artigos_tecnicos/ouvido_humano.pdf)
- Stroski, P. N. (2018). O que é a permissividade? Retrieved May 14, 2019, from

- <http://www.electricalibrary.com/2018/11/02/o-que-e-permissividade-eletrica/>  
Telit Communications. (2016). Retrieved May 7, 2019, from [http://meds-tech.com/m2m/wp-content/uploads/2014/12/Telit\\_GL865-QUAD\\_V3\\_Datasheet.pdf](http://meds-tech.com/m2m/wp-content/uploads/2014/12/Telit_GL865-QUAD_V3_Datasheet.pdf)
- Tellus, S. (2010a). Shell Tellus S2 M, 2–4.
- Tellus, S. (2010b). Shell Tellus S2 M, 2–4.
- Texas Instruments. (2018). Retrieved May 7, 2019, from <http://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28379D>
- Tiago, D., Alves, P., Prof, O., Miguel, D., Paiva, F., & Correia, V. (2016). Testes e Calibração de um Sistema Medidor de Pressão Plantar.
- Vinhais, C., & Abreu, C. (2004). Sensores/Transdutores, 1–23.
- Wakiru, J. M., Pintelon, L., Muchiri, P. N., & Chemweno, P. K. (2019). A review on lubricant condition monitoring information analysis for maintenance decision support. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 118, 108–132.  
<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.08.039>
- Yin, H., Li, Y., Xue, X., Wang, Z., & Jiang, Z. (2018). Research Progress on Monitoring and Separating Suspension Particles for Lubricating Oil. *Complexity*, 2018, 1–9.  
<https://doi.org/10.1155/2018/9356451>
- Zhu, J., Yoon, J. M., He, D., Qu, Y., & Bechhoefer, E. (2013). Lubrication Oil Condition Monitoring and Remaining Useful Life Prediction with Particle Filtering, (December 2014).

## ANEXO A



**Figura A0.1** Gráfico representante da evolução da viscosidade com a temperatura do Shell Tellus S2 M 46 (Shell Tellus, 2010).

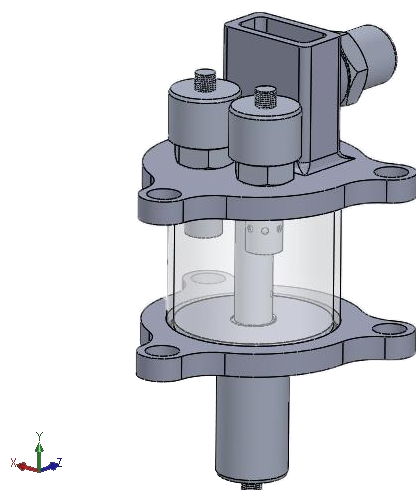


## **[ANEXO B]**

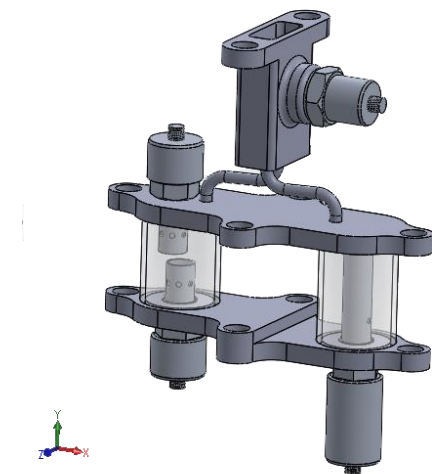
[Remover se necessário para garantir que o próximo Capítulo inicia numa página ímpar]



## APÊNDICE A

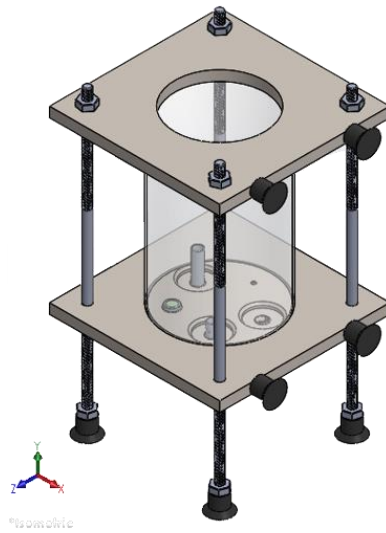


**Figura A.1** *Célula laboratorial 0.1, vista isométrica (LubSysTech, 2019).*



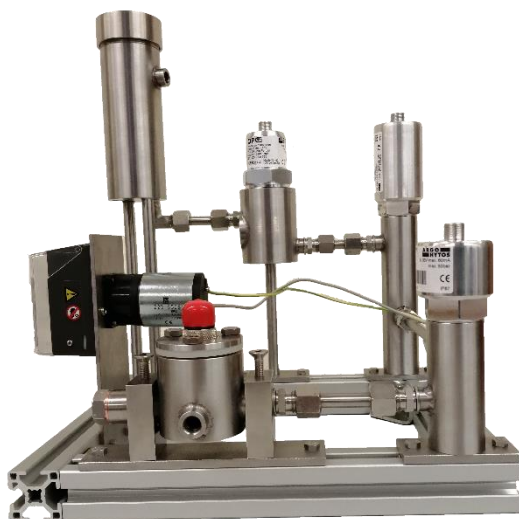
**Figura A.2** *Célula laboratorial 1.1, vista isométrica (LubSysTech, 2019).*





**Figura A.3** *Célula laboratorial 2.1, vista isométrica (LubSysTech, 2019).*

## APÊNDICE B



**Figura B.1** *Célula laboratorial, vista de lado* (LubSysTech, 2019).



**Figura B.2** *Célula laboratorial, vista de frente* (LubSysTech, 2019).

