

Manutenção Preventiva Condicionada por Análise de Óleos em Serviço

Caso de Estudo na The Navigator Company

João Maria Brissos e Silva

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Eduardo Joaquim Anjos de Matos Almas

Prof. Virgínia Isabel Monteiro Nabais Infante

Júri

Presidente: Prof. Luís Filipe Galvão dos Reis

Orientador: Prof. Eduardo Joaquim Anjos de Matos Almas

Vogal: Prof. José Augusto da Silva Sobral

Janeiro 2021

Abstract

In the current global economy, where the smallest detail influences a company's competitiveness, maintenance plays an essential role. Growing competition and higher complexity of the equipment, demands for more efficient maintenance in order to increase the availability of their production equipment, safely and with reduced costs.

Out of the several maintenance strategies, this master's thesis focuses on preventive maintenance of the condition-based maintenance type, particularly the one performed by in-service Oil Analysis.

For factual support of this thesis, it was considered the application of the method to a steam turbine, an integral part of a turbo-generator in operation at *The Navigator Company* - Complexo Industrial da Figueira da Foz, with emphasis on the condition monitoring of the turbine main bearings, and respective control data obtained from due in-service lubricating oil analysis.

Aiming at establishing two proposals for due sampling process method improvement, the following information was considered: the pertinent functionality of the equipment under study, its existing maintenance plan, data from the current in-service oil analysis and respective corrective actions applied.

At the end of the work, two possible solutions involving the uniformity of sampling frequencies and amplification of the present lubrication system's set of sampling points, were believed to bring advantages in improving the information extracted from the in-service oil analysis, allowing for a more efficient monitoring of the turbine main bearings.

Keywords: Maintenance, Oil Analysis, Lubrication System, Steam Turbine, Turbine Main Bearings;

Resumo

Numa economia global como a atual, onde o mais pequeno detalhe influencia a competitividade de uma empresa, a manutenção desempenha um papel essencial. Com o crescente aumento da concorrência e complexidade dos equipamentos, é essencial que as empresas executem uma manutenção mais eficiente, aumentando a disponibilidade dos seus bens, em segurança, com redução de custos de produção e de manutenção.

Das estratégias de manutenção existentes, esta dissertação focaliza-se na manutenção preventiva por controlo de condição – também conhecida por manutenção condicionada – na sua particularidade de se realizar por Análise de Óleos em Serviço.

Para suporte factual da dissertação considerou-se a aplicação do método a uma turbina a vapor, parte integrante de um grupo turbogerador em operação no Complexo Industrial da Figueira da Foz – *The Navigator Company*, do que se destaca a monitorização da condição das chumaceiras principais da turbina, e seu controlo através de análises feitas ao seu óleo de lubrificação.

No decorrer do trabalho recolheram-se informações relativas: à funcionalidade do equipamento em estudo, ao seu existente plano de manutenção, a dados relativos a análises feitas ao óleo em serviço e a ações corretivas aplicadas, objetivando-se o estabelecimento de duas propostas de melhoria do processo de amostragem característico do método.

No final do trabalho foi possível reconhecer-se pelas propostas apresentadas, envolvendo a uniformização de intervalos de amostragem e a ampliação do conjunto de portas de amostragem do sistema de lubrificação, vantagens no enriquecimento da informação retirada do óleo lubrificante, permitindo uma mais eficiente monitorização das chumaceiras em serviço.

Palavras Chave: Manutenção, Análise de Óleos em Serviço, Sistema de Lubrificação, Turbina a Vapor, Chumaceiras Principais da Turbina;

Agradecimentos

À minha família e amigos pelo apoio e amizade demonstrados.

Ao Professor Eduardo Matos Almas e à Professora Virgínia Infante pela orientação deste trabalho e disponibilidade demonstradas.

À *The Navigator Company, S.A.*, nomeadamente à Engenheira Carina Rodrigues e ao Engenheiro Carlos Serranho pela disponibilidade e esclarecimentos no decorrer do trabalho.

Ao Engenheiro Pedro Fernandes, da BP Portugal - Comércio de Combustíveis e Lubrificantes, S. A., pela disponibilidade, compreensão e aconselhamento técnico no decorrer do trabalho.

Ao Professor Henrique Carinhas pela paciência, total disponibilidade, orientação e mentoria ao longo destes largos meses de trabalho.

Índice

Abstract	iii
Resumo	v
Agradecimentos	vii
Índice	ix
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
Lista de Abreviaturas e Acrónimos	xvii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento da Dissertação e Objetivos	1
1.2. Estrutura do Documento	2
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Manutenção.....	3
2.1.1. Conceito e Objetivos	3
2.1.2. Breve Síntese Histórica	4
2.1.3. Tipos de Manutenção	5
2.2. Tribologia e Lubrificantes	6
2.2.1. Definição e Origem da Tribologia.....	6
2.2.2. Tipos de Lubrificantes	7
2.2.3. Propriedades Físico-Químicas dos Óleos Lubrificantes	8
2.2.4. Tipos de Aditivos	11
2.2.5. Regimes de Lubrificação a Óleo	13
2.2.6. Tipos de Chumaceiras e seus Sistemas de Lubrificação	15
2.2.7. Plano de Lubrificação	18
2.3. Análise de Óleos em Serviço	18
2.3.1. Manutenção Preventiva Condicionada por Análise de Óleos	19
2.3.2. Tipos de Contaminação dos Óleos	19
2.3.3. Controlo da Contaminação, e Purificação dos Óleos	22
2.3.4. Tipos de Análise de Óleos.....	23
2.3.5. Técnicas de Amostragem	25
2.3.6. Interpretação e Tratamento de Dados da Análise de Óleos	28
2.4. Lubrificação de Turbinas a Vapor	28
2.4.1. Sistemas de Lubrificação em Turbinas	29
2.4.2. Problemas Comuns em Óleos de Turbinas a Vapor.....	30

2.4.3.	Características dos Óleos de Turbinas a Vapor	32
2.4.4.	Análises de Controlo de Condição em Turbinas a Vapor	34
3.	Caso de Estudo	43
3.1.	A Empresa e Complexo Industrial	43
3.2.	Equipamento em Estudo.....	45
3.2.1.	Turbina Siemens SST-800	45
3.2.2.	Óleo Analisado.....	52
3.2.3.	Estratégia de Inspeções com base no tempo.....	53
3.3.	Tratamento de Dados	54
3.3.1.	Frequência de Amostragem.....	55
3.3.2.	Monitorização de Parâmetros do Óleo.....	60
3.4.	Sugestões de Melhoria	70
4.	Conclusões.....	75
4.1.	Contribuições	75
4.2.	Perspetivas Futuras.....	76
	Referências Bibliográficas	79
	Anexos.....	83
	Anexo A – Elementos detetados em óleos de turbina e respetivas origens.....	83
	Anexo B – Características Típicas do Óleo Castrol Perfecto X46	84
	Anexo C – Relatório Modelo de Análise de Óleos	85
	Anexo D – Tabela Resumo Frequência de Amostragem.....	88

Lista de Figuras

Figura 2.1: Evolução e Crescimento da Manutenção (Adaptado de [6]).....	6
Figura 2.2: Tipos de Manutenção.....	6
Figura 2.3: Classificação dos Graus de Viscosidade (ISO VG), Norma ISO 3448.....	10
Figura 2.4: Determinação do IV.....	11
Figura 2.5: Formação de vernizes numa turbina a gás (chumaceiras e engrenagens) [2].....	13
Figura 2.6: Lamas resultantes da oxidação do óleo lubrificante [18].....	13
Figura 2.7: Lubrificação Hidrodinâmica, par cinemático inferior [17].....	15
Figura 2.8: Lubrificação Elasto-hidrodinâmica, par cinemático superior [17].....	16
Figura 2.9: Exemplo de Chumaceira de Escorregamento [21].....	18
Figura 2.10: Exemplo de Chumaceira de Rolamento (“Rolamento de Esferas”)[22].....	18
Figura 2.11: Fotomicrografias (x500) de malhas de filtros [28].....	23
Figura 2.12: Categorias e Tipos de Análise de Óleos [14].....	25
Figura 2.13: Ponto de Amostragem na Linha de Retorno [29].....	27
Figura 2.14: Exemplo de uma Turbina a Vapor [31].....	30
Figura 2.15: Amostra de óleo visivelmente oxidado [33].....	31
Figura 2.16: Formação de Espuma num óleo lubrificante [35].....	32
Figura 2.17: Grupos de Óleo Base API [36].....	34
Figura 2.18: Tendências de degradação nos vários tipos de óleo base [3].....	34
Figura 2.19: Influência da percentagem de água na vida útil de chumaceiras [2].....	37
Figura 2.20: ISO <i>Cleanliness</i> Code [37].....	37
Figura 2.21: Escala MPC ΔE (adaptado de [39]).....	38
Figura 2.22: RULER – Exemplo de óleo novo (verde) versus óleo em serviço (azul)[39].....	40
Figura 2.23: Comprimentos de Onda de Absorção [14].....	41
Figura 2.24: FTIR – Exemplo de Espetros de Absorção de um óleo mineral [2].....	41
Figura 2.25: Ferrografia Analítica – Ilustração de Deposição de Partículas [40].....	43
Figura 3.1: Esquema de um sistema de cogeração de ciclo combinado, semelhante ao presente no CIFF [43].....	46
Figura 3.2: Turbina Siemens SST-800 [44].....	47
Figura 3.3: Instalação do grupo turbogerador TG4, no CIFF [45].....	48

Figura 3.4: Rotor de uma Turbina SST-800, igual à presente no CIFF [47].....	49
Figura 3.5: Vista em corte axial do rotor da turbina SST-800 [46].....	50
Figura 3.6: Vista em corte no plano vertical do Apoio Anterior do Rotor [46].....	50
Figura 3.7: Alimentação de óleo lubrificante à Chumaceira Axial do Apoio Posterior [46].....	51
Figura 3.8: Alimentação de óleo lubrificante às Chumaceiras Radiais da Turbina SST-800 [46].....	51
Figura 3.9: Vista de conjunto do apoio posterior do Rotor da Turbina [46].....	52
Figura 3.10: Esquema geral do Sistema de Circulação de Óleo Lubrificante do Grupo Turbogenerador TG4.....	54
Figura 3.11: Programa de Inspeção com base nas Horas Operacionais da Turbina.....	56
Figura 3.12: Frequência de amostragem das análises à viscosidade, TAN, conteúdo de água e análise espectrométrica (ICP) “só metais de desgaste”.....	58
Figura 3.13: Frequência de amostragem referente à análise de partículas (Código de Limpeza ISO).....	59
Figura 3.14: Frequência de amostragem referente à análise FTIR.....	59
Figura 3.15: Frequência de amostragem referente à Espectrometria Elemental (ICP) “completa”.....	60
Figura 3.16: Frequência de amostragem referente à análise MPC.....	61
Figura 3.17: Frequência de amostragem referente à Voltametria de Varredura Linear (RULER).....	61
Figura 3.18: Frequência de amostragem referente à ferrografia.....	61
Figura 3.19: Frequência de amostragem referente à análise de Tendência e Estabilidade de Espuma.....	62
Figura 3.20: Evolução do valor da viscosidade do óleo [2015-2020].....	64
Figura 3.21: Evolução do TAN [2015-2020].....	65
Figura 3.22: Evolução do Teor de Água no óleo (método de Karl Fischer)[2015-2020].....	66
Figura 3.23: Evolução do valor do MPC ΔE [2015-2020].....	67
Figura 3.24: Membrana MPC referente à amostra de óleo de 20/12/2019.....	67
Figura 3.25: Evolução da percentagem de antioxidantes Amínicos (RULER)[2015-2019].....	68
Figura 3.26: Partícula de Cobre detetada na amostra de 28/05/2019.....	70
Figura 3.27: Óxidos / Partículas Ferrosas detetadas na amostra de 20/12/2019.....	70
Figura 3.28: Pequenas partículas de desgaste adesivo normal, menores que 15 μm , detetadas na amostra de 30/11/2016.....	71
Figura 3.29: Escamas de fadiga (Picagem) detetadas na amostra de 26/07/2017 (25 μm).....	71
Figura 3.30: Partícula (“limalha”) de desgaste abrasivo detetada na amostra de 29/05/2018.....	72
Figura 3.31: Exemplo de vários pontos de amostragem num sistema de lubrificação [51].....	74

Figura 3.32: Sugestão de ampliação de conjunto de portas de amostragem do sistema de lubrificação da turbina SST-800, a operar no CIFF.....75

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Frequências de amostragem recomendadas [14].....	28
Tabela 3.1 - Divisão dos vários tipos de análises realizadas.....	57
Tabela 3.2 - Frequências de amostragem aconselháveis.....	58
Tabela 3.3 - Valores admissíveis referentes às análises efetuadas.....	63
Tabela 3.4 - Códigos de Limpeza ISO referentes às amostras recolhidas no período em análise.....	65
Tabela 3.5 - Valores de Tendência / Estabilidade de Espuma referentes às amostras recolhidas.....	68
Tabela 3.6 - Teor, em ppm, de alguns elementos detetados por análise espectrométrica.....	69

Lista de Abreviaturas e Acrônimos

API	<i>American Petroleum Institute</i> , organização de normalização
ASTM	<i>ASTM International</i> , organização de normalização
ATIEL	<i>The technical association of the European lubricants industry</i>
AW	<i>Anti-Wear additives</i> , aditivos Anti-Desgaste
CIFF	Complexo Industrial da Figueira da Foz
C.G.S.	Sistema de Unidades Centímetro-Grama-Segundo
EP	<i>Extreme Pressure additives</i> , aditivos Extrema Pressão
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectrometric Analysis</i>
ICP	<i>Inductively Coupled Plasma Metal Analysis</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IV	Índice de Viscosidade
LEHD	Lubrificação Elastohidrodinâmica
LHD	Lubrificação Hidrodinâmica
MPC	<i>Membrane Patch Colorimetry</i>
PAO	Polialfaolefinas
PIB	Produto Interno Bruto
PPM	Partes por Milhão
RPM	Rotações por Minuto
RPVOT	<i>Rotary Pressure Vessel Oxidation Test</i>
RULER	<i>Remaining Useful Life Evaluation Routine</i>
S.I.	Sistema Internacional de Unidades de medida
SST	<i>Siemens Steam Turbine</i>
TAN	<i>Total Acid Number</i>

1. Introdução

Neste capítulo apresentam-se as considerações gerais necessárias para a compreensão do documento, realizado no âmbito da unidade curricular de Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, do Instituto Superior Técnico. O presente capítulo divide-se em duas secções. Primeiro, faz-se um enquadramento científico e tecnológico da temática em consideração e apresentam-se os objetivos do trabalho. De seguida apresenta-se a estrutura e subdivisão do documento.

1.1. Enquadramento da Dissertação e Objetivos

Na presente era da globalização a economia tornou-se extremamente competitiva. Uma indústria que não satisfaça os elevados padrões de procura, não tem lugar no exigente quadro competitivo da economia global. A *The Navigator Company* tem, a esse respeito, um grande relevo no mercado internacional da pasta e do papel, particularmente no que se refere ao seu Complexo Industrial da Figueira da Foz, em cujo contexto se enquadra este trabalho.

Para se chegar à importância que advém para a presente dissertação no âmbito concreto da manutenção condicionada, comece-se por referir que a *The Navigator Company* optou por um processo de cogeração de energia a partir de biomassa florestal, assegurando a produção de energia elétrica a baixo custo e a independência do fornecimento dos correntes distribuidores de energia, e é nesse contexto que a turbina a vapor – equipamento em que se fundamenta o presente trabalho – surge como o elemento vital da economia do processo industrial em causa. Na sua eventual inoperabilidade, a unidade industrial fica incapacitada de dispor da energia elétrica que é absolutamente necessária à sua produção. Estima-se, a propósito, que a paragem de uma turbina industrial poderá resultar na perda de centenas de milhares de euros por hora [1].

Nesse sentido, dever-se-á notar que, na procura de melhores resultados e maiores eficiências, as turbinas têm vindo a ser submetidas a condições cada vez mais severas, operando a temperaturas e pressões mais elevadas, incorporando menores reservatórios de óleo lubrificante e submetendo-se a intervalos de inspeção cada vez mais dilatados [2]. Obviamente que, para além dos diversos componentes da turbina, também o óleo de circulação que os lubrifica fica sujeito a estas condições de serviço cada vez mais extremas, sendo de referir a enorme importância que tem para a fiabilidade do respetivo turbogerador, o bom desempenho da sua lubrificação.

Como todos os sistemas de circulação de óleo em turbinas a vapor estão sujeitos ao contato com agentes externos como o oxigénio, ou a água, do seu meio ambiente, tais condições potenciam a rápida degradação do óleo, por exemplo por oxidação e conseqüente alteração das suas propriedades físico-químicas, bem como a produção de depósitos sob a forma de lamas e formação de vernizes nas superfícies lubrificadas, uma e outra de efeitos bastante perversos na ação de lubrificação pretendida. Assim, a monitorização das condições em serviço do óleo revela-se

fundamental para o aumento, quer da sua vida útil, quer do desempenho operacional da turbina [3], constituindo-se por isso, como principais objetivos desta dissertação de Mestrado, os seguintes:

- o estudo dos adequados métodos de Manutenção Condicionada por Análise de Óleos em Serviço aplicados aos equipamentos industriais em geral, e à turbina a vapor em particular;
- o tratamento de dados provenientes de análises feitas ao óleo em serviço de uma turbina, em concreto da supracitada turbina a vapor da *The Navigator Company*;
- e o enfoque na análise de possíveis soluções e recomendações que maximizem a adequação e qualidade da informação que o óleo lubrificante nos fornece acerca do ajustamento do programa de manutenção da turbina, e da condição dos vários órgãos mecânicos da mesma.

1.2. Estrutura do Documento

O presente documento encontra-se dividido em 4 capítulos principais: Introdução, Revisão Bibliográfica, Caso de Estudo e Conclusões.

No primeiro capítulo – Introdução – é feito um enquadramento geral da dissertação e são apresentados os objetivos da mesma.

O segundo capítulo constitui uma revisão bibliográfica onde são discutidos os temas de Manutenção, Tribologia e Lubrificantes, Análise de Óleos em Serviço e Lubrificação em Turbinas a Vapor.

No terceiro capítulo é apresentado o caso prático em estudo. Primeiro, faz-se um enquadramento da empresa *The Navigator Company* e do seu Complexo Industrial da Figueira da Foz. Descreve-se a turbina a vapor em questão, o óleo que a lubrifica e a estratégia de inspeções de que a mesma é alvo. Posteriormente, são tratados os dados relativos a análises laboratoriais feitas ao óleo em serviço e, com base nesse tratamento, são apresentadas sugestões de melhoria para o procedimento de amostragem de óleo, atualmente em prática.

No quarto capítulo são apresentadas as contribuições do trabalho e as perspetivas futuras em relação às diversas áreas da engenharia que o mesmo contempla.

2. Revisão Bibliográfica

Neste Capítulo abordam-se os conceitos gerais teóricos da Manutenção, Tribologia e Lubrificantes, Análise de Óleos em Serviço e Lubrificação de Turbinas, todos eles considerados relevantes para a compreensão do caso prático em estudo, bem como das sugestões de melhoria apresentadas.

2.1. Manutenção

Nesta secção apresentam-se as noções básicas associadas ao conceito de Manutenção, definem-se os seus objetivos, faz-se uma síntese histórica da evolução das atividades de Manutenção e descrevem-se as diversas estratégias existentes.

2.1.1. Conceito e Objetivos

O desempenho de um produto depende não só do seu projeto e fabrico, mas também das suas condições de serviço e Manutenção durante a sua vida operacional.

A Norma Portuguesa NP 13306 define Manutenção como a *“combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida”* [4]. Como tal, as ações de manutenção podem ir desde simples beneficiações, a reparações, até à substituição integral do item em causa. A desejável atividade de Manutenção deverá ser a que assegure que todas estas operações sejam realizadas a um custo global mínimo possível.

No âmbito da Manutenção surgem, no contexto de um qualquer equipamento industrial, três conceitos principais: Disponibilidade, Manutibilidade e Fiabilidade.

A Disponibilidade refere-se à aptidão do equipamento para manter a sua operacionalidade em serviço durante um dado intervalo de tempo, uma vez que lhe sejam assegurados os recursos necessários e previamente estabelecidos para o seu devido desempenho.

A Manutibilidade indica a faculdade do equipamento, uma vez submetido a uma intervenção de manutenção, poder ser recuperado para o estado operacional requerido, num pré-estabelecido intervalo de tempo, e com os procedimentos e recursos também previamente prescritos.

Já a Fiabilidade tem a ver com a aptidão de um equipamento em não se avariar num dado intervalo de tempo, quando operando nas condições de serviço previamente especificadas. É assim óbvia a sua relação com a Manutenção, nomeadamente na determinação da periodicidade de intervenção de Manutenção Preventiva.

Assim, de um modo geral, poder-se-ão considerar como objetivos da Manutenção os que, com a máxima segurança e mínimo custo, garantam que a Disponibilidade, Manutibilidade e Fiabilidade dos itens em causa permaneçam o mais elevadas possível.

De uma maneira sucinta, Mishra descreve como objetivos da Manutenção [5]:

- Manter, repor ou melhorar o desempenho;
- Diagnosticar a falha;
- Eliminar a recorrência do defeito;
- Prevenir a avaria;
- Garantir a segurança;
- Maximizar a eficiência operacional;
- Reduzir o tempo de inatividade devido à avaria;
- Reduzir os custos de manutenção.

2.1.2. Breve Síntese Histórica

Segundo Shenoy e Bhadury [6], a evolução da Manutenção apresenta três períodos bem definidos: antes da Segunda Guerra Mundial, após a mesma e de 1980 até aos dias de hoje. Estes períodos apenas diferem na percepção que as organizações tinham das atividades de Manutenção – Figura 2.1.

Antes da Segunda Guerra Mundial, os processos industriais eram lentos e pouco mecanizados. Os equipamentos eram de grandes dimensões, mas simples e com uma instrumentação básica, sendo fáceis de reparar. O mercado ainda não apresentava grande competitividade e a procura de bens era baixa. Como tal, a produtividade nas indústrias era reduzida e os custos associados a quebras de produção pouco significativos. A prevenção de falhas em equipamentos não estava no centro das preocupações e a Manutenção caracterizava-se apenas por ações corretivas ou de simples lubrificação e limpeza.

A Segunda Guerra Mundial viria a revelar-se como um ponto de viragem fulcral. O aumento da procura e da competitividade no mercado forçou as indústrias a aumentar significativamente a produção [7]. O tempo de paragem devido a avarias e seus custos associados, tornaram-se fatores de extrema relevância, conduzindo ao desenvolvimento de estratégias de planificação e calendarização de ações de prevenção da falha nos equipamentos – manutenção preventiva – com conseqüente aumento da sua disponibilidade operacional, por um lado, e redução dos custos associados a quebras de produção, por outro.

No decurso do grande desenvolvimento industrial do pós-guerra, marcadamente após 1980, o conseqüente aumento, e visibilidade, de graves acidentes contribuiu bastante para a consciencialização nas indústrias da importância da engenharia de manutenção e seu essencial contributo para a segurança operacional. A manutenção deixou de ser vista como um mal necessário, passando a ser um problema estratégico dentro de uma organização industrial [6].

Conceitos de qualidade, fiabilidade, economia de recursos e, notavelmente, da preocupação ambiental, são outros fatores motivadores da crescente relevância da temática da Manutenção.

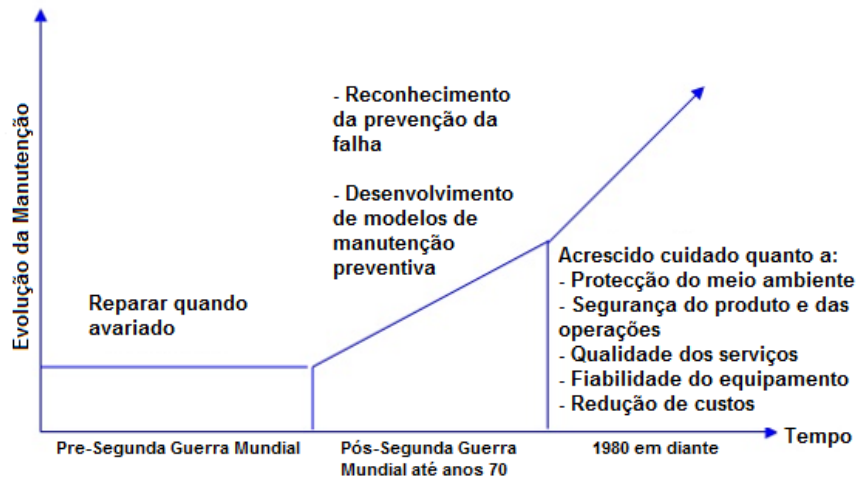


Figura 2.1: Evolução e Crescimento da Manutenção (Adaptado de [6])

2.1.3. Tipos de Manutenção

Na literatura, vários autores descrevem, de modos e critérios diversos, vários modelos e esquemas para a classificação dos tipos de Manutenção. Todas essas abordagens convergem, no entanto, nas mesmas ideias principais, que no contexto da presente dissertação, poderão resumir-se no esquema da Figura 2.2 [8].

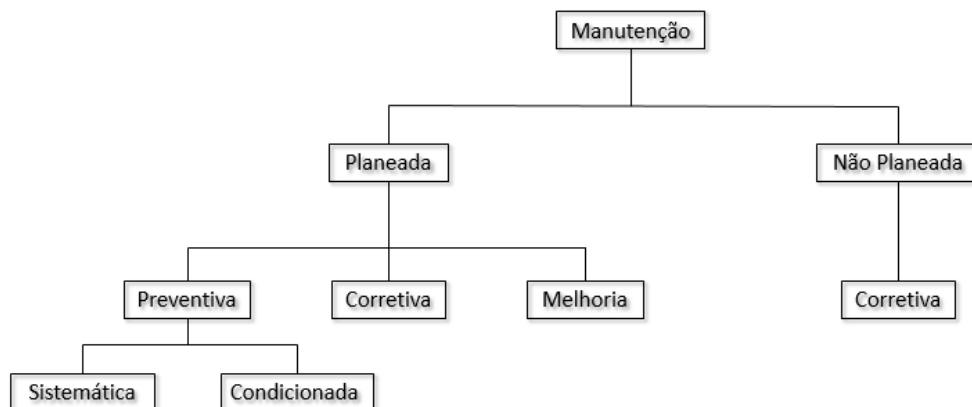


Figura 2.2: Tipos de Manutenção

Inicialmente, a Manutenção pode ser dividida em duas categorias principais: a planeada e a não planeada. A **Manutenção Planeada** consiste em antecipar a ocorrência da falha e, por adequada ação mitigadora planeável no tempo adequado, minimizar as suas nefastas consequências. A **Manutenção Não planeada** refere-se ao conjunto de intervenções levadas a cabo após a constatação de uma falha, com a intenção de repor o estado operacional de um equipamento no qual o mesmo seja capaz de desempenhar a sua função requerida [9].

A **Manutenção Corretiva** refere-se em geral às ações efetuadas após deteção de uma avaria e destina-se à reposição da operacionalidade do bem [4]. Não obstante, este tipo de manutenção tanto pode ser planeado como não planeado. Se a anomalia for de imediata cessação do desempenho do bem, diz-se que ocorreu uma avaria e a intervenção corretiva tem de ser efetuada de emergência

(Manutenção não planeada). Se a anomalia se verificar se forma progressiva, a intervenção de manutenção poderá ser planeada para uma ocasião mais oportuna [8].

A **Manutenção Preventiva** refere-se sempre a intervenções planeadas que podem ser:

- Intervenções **Sistemáticas** – São realizadas em intervalos de tempo periodicamente definidos, com base na lei de degradação com o tempo do bem em questão. Só é aplicável a equipamentos que demonstrem significativo aumento da probabilidade de falha a partir de determinada vida em serviço;

- Intervenções **Não Sistemáticas** – É a Manutenção Condicionada, podendo vir também referida em diversa literatura por Controlo de Condição. Neste tipo de manutenção, recorre-se a métodos de monitorização em serviço para se encontrar o momento acertado para intervenção preventiva da ocorrência de falha. A sua grande vantagem é, assim, maximizar a disponibilidade do equipamento, mas, o sucesso destas intervenções reside na eficácia dos recursos disponíveis e sua metodologia para vigiar o estado do equipamento [10]. Este é um ponto de extrema importância sendo um dos principais focos desta dissertação.

Na **Manutenção de Melhoria** envolvem-se não só as ações conducentes à obtenção da melhoria da fiabilidade dos equipamentos, nomeadamente por modificação do seu projeto, mas também por reajustamentos que se revelem mais adequados ao seu programa de manutenção.

Um dos resultados finais deste trabalho recai exatamente sobre a Manutenção de Melhoria, referindo-se neste caso a proposta de duas possíveis soluções que possam maximizar a eficiência da monitorização da turbina analisada, na execução da sua manutenção condicionada.

2.2. Tribologia e Lubrificantes

Nesta secção abordam-se os conceitos da área da Tribologia considerados necessários para a melhor introdução ao tema de base da presente dissertação. Apresenta-se a sua definição e origem histórica bem como os seus objetivos na redução de custos energéticos e económicos. Indicam-se os principais tipos de lubrificantes de interesse direto para este trabalho, as suas propriedades físicas e os tipos de aditivos usados para melhorar o seu desempenho. Referem-se os vários regimes de lubrificação em que um óleo lubrificante pode operar e caracterizam-se os órgãos mecânicos mais emblemáticos do âmbito tribológico – as chumaceiras. Por fim, salienta-se a importância de um programa de lubrificação em proporcionar um melhor desempenho dos equipamentos e concomitante redução de custos em organizações industriais.

2.2.1. Definição e Origem da Tribologia

Praticamente, todas as indústrias têm em comum o uso de diversas máquinas e sistemas mecânicos com vários componentes e abundância de superfícies técnicas em contacto direto, sob carga e em movimento relativo [11].

A fiabilidade destes equipamentos está dependente do controlo do atrito e desgaste das suas superfícies de contacto. O atrito resulta na dissipação de energia por calor e na modificação das

propriedades mecânicas dos materiais, e o desgaste limita a vida útil dos órgãos afetados, degradando o seu desempenho operacional e reduzindo a sua resistência mecânica.

Como resposta à crescente necessidade de desenvolvimento científico e tecnológico do assunto, acentuadamente notado durante o desenvolvimento industrial ocorrido no pós-2ª Guerra Mundial, Peter Jost, em 1966, no Reino Unido, reuniu no domínio da Engenharia o conceito vasto de Tribologia como a ciência e tecnologia das superfícies interatuantes sob carga e em movimento relativo, e das práticas com elas relacionadas [12].

Algumas dessas tecnologias incluem, entre outras, o desenvolvimento de novos lubrificantes, de novos materiais e tecnologias de tratamento de superfícies, bem como dos métodos de manutenção condicionada por controlo da condição do lubrificante e, por consequência, da condição física dos equipamentos em serviço. Esta última, a tecnologia em cujo âmbito se insere diretamente a presente dissertação.

2.2.2. Tipos de Lubrificantes

Um lubrificante é uma substância interposta entre as superfícies interatuantes dos órgãos com o propósito de realizar a sua lubrificação, isto é, de promover a redução do atrito e minimizar o desgaste. Quando aplicado como um sistema de lubrificação a óleo, o lubrificante também proporciona a evacuação de calor, a vedação e proteção contra a corrosão, a lavagem de pontos lubrificados por arrastamento de partículas estranhas em suspensão e facultar informação relevante para o controlo de condição e diagnóstico de avarias – a Análise de Óleos em Serviço.

Os óleos lubrificantes mais aplicados na indústria e de interesse para esta dissertação são os óleos minerais e os sintéticos uns e outros mais ou menos melhorados por adição de adequados produtos – os aditivos (ver secção 2.2.4) – pelo que serão os únicos a serem aqui abordados.

O óleo mineral é diretamente obtido da destilação fracionada do petróleo bruto, seguida de um processo de refinação que, consoante o tipo de rama de origem, permite a classificação dos óleos lubrificantes mais adequados para a maquinaria industrial em dois grandes grupos principais [13]:

- óleos parafínicos, caracterizados por elevada quantidade de hidrocarbonetos parafínicos, as ceras parafínicas;
- óleos nafténicos, contendo uma elevada quantidade de hidrocarbonetos nafténicos e muito poucas ceras parafínicas;

Consideram-se ainda os óleos de base mista, que são constituídos por uma maior mistura de vários tipos de hidrocarbonetos.

As propriedades do óleo base vão determinar o comportamento operacional do óleo lubrificante resultante, conferindo-lhe características físicas específicas. Por exemplo, os óleos de base parafínica apresentam maior índice de viscosidade que os óleos de base nafténica, ou mista [13]. (Ver 2.2.3 onde o índice de viscosidade é introduzido).

Os óleos sintéticos, obtidos por síntese química “à medida”, livre das impurezas inerentes ao óleo mineral, garantem um melhor desempenho operacional em condições de serviço mais severas, apresentando, nomeadamente, as seguintes vantagens relativamente aos óleos minerais [14]:

- Maior estabilidade química, resultando numa menor degradação com a temperatura;
- Maior resistência à oxidação;
- Maior índice de viscosidade (IV):
- Menor Inflamabilidade;
- Maior durabilidade em serviço;

O maior custo de produção dos atuais óleos sintéticos é inevitável, o que faz com que só ocupem uns 10% do mercado dos lubrificantes [15].

Para além dos óleos minerais e sintéticos estão disponíveis no mercado outros tipos de lubrificantes. Existem massas lubrificantes (misturas de um óleo lubrificante, com 10 a 20 por cento de um adequado produto espessante, e aditivos), utilizadas em sistemas de lubrificação mais simples e tirando partido das suas capacidades de vedação e persistência para se fixarem aos pontos de lubrificação. Existem também lubrificantes sólidos, como por exemplo a grafite e o bissulfureto de molibdénio, para aplicações especiais. Pelo facto de se desenquadrarem da aplicação industrial estudada, quer os óleos sintéticos, quer aqueles outros, não serão considerados nesta dissertação.

2.2.3. Propriedades Físico-Químicas dos Óleos Lubrificantes

A viscosidade é provavelmente a propriedade mais importante de um óleo lubrificante. Existem contudo, outras propriedades que devem ser tidas em atenção nas aplicações do mesmo.

Assim, apresentam-se nesta secção algumas das mais importantes propriedades físicas e químicas desses lubrificantes e anota-se a variação de algumas delas ao longo do tempo de serviço do óleo.

Viscosidade

A viscosidade é o resultado do atrito interno do lubrificante, que se traduz na resistência ao escorregamento interno das suas moléculas quando lhes é imposto um escoamento [12].

A partir do modelo de Newton, do escoamento viscoso de um líquido entre duas placas paralelas em movimento relativo linear, determina-se a medida da viscosidade absoluta ou dinâmica, μ , expressa, no sistema SI em pascal-segundo [*Pa.s*] [16].

Em ambiente industrial é mais simples (para viscosidades relativamente baixas) trabalhar-se com outra medida de viscosidade – a viscosidade relativa ou cinemática, ν , fazendo recurso de um viscosímetro gravimétrico. Expressa-se, no sistema SI, em metro quadrado por segundo [m^2/s].

A viscosidade cinemática é relativizada à massa específica do líquido analisado, ρ , e relaciona-se com a viscosidade dinâmica do mesmo, através da seguinte relação:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Para líquidos de densidades aproximadamente iguais, como o são, em geral, os óleos minerais ($\rho_{\text{óleo mineral}} \approx 900 \text{ kg/m}^3$), as suas viscosidades cinemáticas podem ser comparadas. (Tal não é o caso para alguns óleos sintéticos, onde as densidades poderão já divergir um pouco mais).

A classificação dos óleos lubrificantes, com base na sua viscosidade, aparece efetuada na indústria por diversos sistemas de classificação, dos quais se destaca o dos graus de viscosidade ISO – ISO *Viscosity Grade*, ISO VG – mostrado na Figura 2.3.

Graus de Viscosidade ISO	Viscosidade Cinemática a 40°C mm ² /s = cSt		
	Médio	Mínimo	Máximo
ISO VG 2	2.2	1.98	2.42
ISO VG 3	3.2	2.88	3.52
ISO VG 5	4.6	4.14	5.06
ISO VG 7	6.8	6.12	7.48
ISO VG 10	10	9.0	11.0
ISO VG 15	15	13.5	16.5
ISO VG 22	22	19.8	24.2
ISO VG 32	32	28.8	35.2
ISO VG 46	46	41.4	50.6
ISO VG 68	68	61.2	74.8
ISO VG 100	100*	90	110
ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 320	320	288	352
ISO VG 460	460	414	506
ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 1000	1000	900	1100
ISO VG 1500	1500	1350	1650

Figura 2.3: Classificação dos Graus de Viscosidade (ISO VG), Norma ISO 3448

Índice de Viscosidade

A viscosidade dos usuais óleos lubrificantes diminui com o aumento da temperatura. A potencial contrariedade provocada por este facto na lubrificação impôs a necessidade de criação de um parâmetro empírico que classifica um lubrificante consoante a variação da sua viscosidade com a temperatura – o Índice de Viscosidade (IV).

A medida do IV determina-se de acordo com a norma ASTM D2270. Exemplificando para óleos de IV ≤ 100 , essa medida faz-se em relação às variações de viscosidade cinemática de dois óleos referência, um de alto IV (óleo parafínico, de IV=100) e outro de baixo IV (óleo nafténico, de IV=0), do modo que se apresenta na Figura 2.4 [17]. (A mesma norma indica também o processo de determinação do IV para óleos de IV>100).

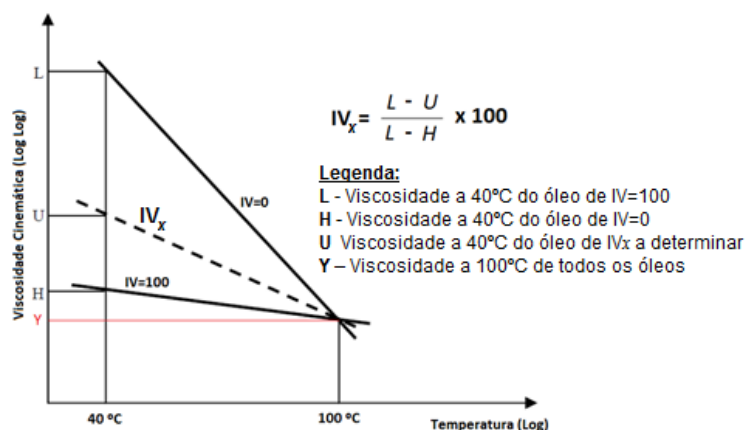


Figura 2.4: Determinação do IV

Outras Propriedades

Para além da viscosidade e do índice de viscosidade, existem outros parâmetros físicos e químicos de bastante relevância para o controlo de condição do lubrificante. Grande parte deles serão desenvolvidos mais em detalhe no subcapítulo 2.3, de Análise de Óleos em Serviço. Não obstante, apresentam-se abaixo, de forma sucinta, mais algumas características físicas e químicas, de interesse mais geral, dos óleos lubrificantes:

- **Cor** – A coloração por transparência do óleo pode fornecer informação acerca do seu tipo de refinação [12]. Uma coloração forte num óleo novo indica um baixo nível de refinação do óleo, enquanto que uma coloração leve revela uma boa refinação. É uma das diferenças entre o óleo mineral de Classe I e um outro, melhor, de Classe II (Classificação API de referência para os óleos de turbina, à frente detalhado na secção 2.4.3. deste documento).

- **Cheiro** – Normalmente recorre-se a esta propriedade para inferir de forma rápida e simples o estado de oxidação do óleo. Um cheiro acre poderá denunciar um óleo mais oxidado [12].

- **Ponto de Inflamação** – O ponto de inflamação de um óleo lubrificante é a temperatura mínima a que se forma uma quantidade de vapores suficiente para se inflamarem na presença de uma chama livre [12][16]. Um óleo de refinação insuficiente, ainda com presença de frações mais leves do petróleo bruto, terá um ponto de inflamação mais baixo do que um óleo de boa qualidade e refinação.

- **Estabilidade à Oxidação** – Todos os lubrificantes se oxidam, em maior ou menor escala, quando submetidos a condições de serviço adversas, ou à presença de agentes contaminantes externos [12]. Temperaturas elevadas, contaminação por água ou combustível, partículas metálicas em suspensão no óleo, são alguns dos agentes catalisadores da oxidação precoce do óleo e geração de produtos resultantes desse processo, como lamas e vernizes no seu seio.

- **Número de Acidez** (*Total Acid Number – TAN*) – Aplicado aos óleos industriais como os que estão no foco desta dissertação, o Número de Acidez é uma medida da concentração total de substâncias ácidas presentes no óleo. Expressa-se em *mgKOH/g* – miligramas de hidróxido de potássio

necessários para se neutralizar todos os compostos ácidos presentes em um grama do óleo em questão [14].

- **Ponto de Congelação** – o ponto de congelação é a temperatura mais baixa a que um óleo mineral ainda flui, ou escorre, quando sujeito a um nível de arrefecimento tal que as suas parafinas formam redes cristalinas tais que o óleo deixa de poder escorrer livremente [17].

2.2.4. Tipos de Aditivos

A adição de agentes químicos, referidos como aditivos, aos óleos lubrificantes, é efetuada em praticamente todos eles, com concentrações até aos 30% [17]. A sua finalidade é a de reforçar ou mesmo modificar determinadas propriedades do óleo base, para lhe conferir melhores características operacionais.

Estes aditivos podem ser divididos em dois grupos [12]:

- os que alteram as propriedades físicas dos lubrificantes, como o ponto de congelação, o índice de viscosidade ou a formação de espuma, etc.

- os que modificam características químicas, como os antioxidantes, inibidores de corrosão, aditivos antidesgaste, etc.

Faz-se em seguida um breve resumo dos aditivos mais usuais, com enfoque na sua finalidade e aplicações:

- **Antioxidantes** – Tipicamente constituídos por compostos orgânicos à base de amina e fenol, destinam-se a retardar o processo de oxidação do óleo, isto é, a reação dos hidrocarbonetos constituintes do óleo com agentes promotores de oxidação, como o oxigénio, a água e alguns metais quimicamente ativos (cobre, ferro, chumbo, etc.).

A oxidação dos óleos lubrificantes provoca o aumento da concentração de compostos ácidos nele solúveis, o que o escurece, aumenta-lhe a viscosidade e torna-o corrosivo no contacto com metais. Os produtos desta oxidação vão-se tornando insolúveis no óleo e promovem a criação de lamas e vernizes que aderem às paredes dos órgãos lubrificados.

Os aditivos antioxidantes apenas podem retardar a inevitabilidade do processo de oxidação, prolongando a vida útil do óleo, sendo imprescindíveis em aplicações a temperaturas elevadas ou com presença de ar ou água. Nos óleos minerais convencionais, a taxa de oxidação duplica, aproximadamente, quando a temperatura, após os 60°C, sofre incrementos de 10°C [14].



Figura 2.5: Formação de vernizes numa turbina a gás (chumaceiras e engrenagens) [2]



Figura 2.6: Lamas resultantes da oxidação do óleo lubrificante [18]

- **Detergentes/Dispersantes** – São moléculas polares que envolvem partículas resultantes da degradação do óleo, impedindo a sua aglomeração e deposição sobre as superfícies dos órgãos lubrificadas. Opõem-se à formação de produtos como os vernizes, ou lamas, mantendo-os divididos e em pequenas dimensões, facilitando a sua remoção por lavagem. São frequentemente usados nos lubrificantes de máquinas térmicas.

- **Aditivos Anti-desgaste (Antiwear, AW) e de Extrema Pressão (Extreme Pressure, EP)** – Estes aditivos foram desenvolvidos para reduzir os desgastes por escorregamento (adesivo, abrasivo). São adicionados aos óleos lubrificantes para redução do coeficiente de atrito e aumento da resistência ao desgaste em condições de lubrificação limite (ver secção 2.2.5).

Enquanto que nos aditivos AW se tira simples partido da adsorção de moléculas polares às superfícies de contacto do tribossistema, nos EP já se produz uma conversão química das superfícies por compostos de enxofre, zinco e fósforo, muito mais eficaz para as mais exigentes condições da carga e velocidade relativa, por exemplo em engrenagens hipóides, ou de sem-fim.

- **Inibidores de Corrosão/Ferrugem** – A presença de água tem um grande impacto na degradação do desempenho dos lubrificantes e da qualidade das superfícies interatuantes dos órgãos lubrificadas. O desgaste corrosivo provocado pela presença de água reduz a vida útil dos componentes metálicos e, para prevenção do fenómeno, desenvolveram-se aditivos inibidores de corrosão, constituídos por moléculas polares capazes de formar, por adsorção nas superfícies metálicas uma película contínua que impede o contacto direto com a água [16].

- **Aditivos Melhoradores de IV** – O índice de viscosidade dos óleos lubrificantes é melhorado adicionando-lhes aditivos que lhes conferem alguma resistência à sua natural redução de viscosidade com o aumento da temperatura, ao mesmo tempo que revertem essa ação a baixas temperaturas, não deixando que a viscosidade cresça tanto como sucederia no mesmo óleo, se não aditivado [17].

- **Inibidores de Espuma ou Aditivos Anti-Espuma** – Estes aditivos evitam a formação de espuma nos óleos, provocada pela sua agitação em mecanismos de relativamente elevadas velocidades, ou nas dinâmicas de escoamento dos próprios sistemas de circulação de óleo. O inibidor de espuma mais frequente é um silicone metílico [16].

- **Abaixadores de Ponto de Congelamento** – São aditivos que promovem o abaixamento do ponto de congelamento dos óleos mais parafínicos, destruindo as redes de cristais parafínicos que se formam com o decréscimo de temperatura [18]. Os óleos de base nafténica dispensam estes aditivos, por já terem um ponto de congelamento naturalmente baixo [16].

2.2.5. Regimes de Lubrificação a Óleo

O tipo, ou mecanismo, de lubrificação representa o modo físico ou químico de como se processa a ação lubrificante no “ponto” de lubrificação em causa. Consoante a grandeza da separação criada entre os dois corpos do tribo-sistema nesse “ponto”, os regimes de lubrificação podem ser divididos em regimes de película espessa, película fina ou película limite.

A lubrificação por película espessa é a que assegura a plena ausência de contacto entre as duas superfícies interatuantes, minimizando o atrito e o desgaste adesivo [16].

Dentro da lubrificação por película espessa consideram-se os três sub-regimes, caracterizados pelos seguintes tipos de lubrificação:

- Lubrificação Hidrodinâmica;
- Lubrificação Hidrostática;
- Lubrificação Elasto-hidrodinâmica;

A **Lubrificação Hidrodinâmica** (LHD) ocorre nos pares cinemáticos inferiores – contacto superficial [19] – quando a plena separação das superfícies é conseguida por natural efeito hidrodinâmico. A formação e estabilidade da película lubrificante é proporcionada pela convergência das superfícies interatuantes, que provocam o estrangulamento do escoamento criado pelo movimento relativo dos dois corpos, e assim se gerando uma considerável elevação de pressão no local. A geometria deste local sugere a denominação de uma “cunha hidrodinâmica”, que provoca o afastamento das duas superfícies – efeito de sustentação – promovendo a consequente lubrificação por película espessa de óleo, tanto mais conseguida quanto, para uma dada carga, tanto maior seja a velocidade do escoamento ou a viscosidade do óleo.

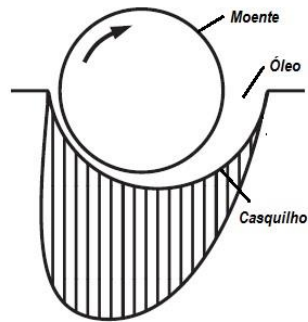


Figura 2.7: Lubrificação Hidrodinâmica, par cinemático inferior [17]

Embora sem interesse prático para o presente trabalho, mas ainda de relevância no âmbito da LHD, é de referir um outro modo de obtenção de película espessa hidrodinâmica quando, em vez de escorregamento, as duas superfícies interatuantes interagem bruscamente uma contra a outra na direção perpendicular a ambas, e em que o lubrificante, por efeito visco-elástico, resista ao escoamento para fora do contacto nesse curto intervalo de tempo. Diz-se **Lubrificação por Esmagamento de Película**, surgindo na prática em contactos com curtos períodos de carga aplicada repetidamente, por exemplo em mecanismos de biela-manivela, ou em engrenamentos a elevada velocidade (assim co-operando com lubrificação elastohidrodinâmica destes pares cinemáticos superiores).

Na Lubrificação **Hidrostática** é também obtida uma película espessa de óleo lubrificante, mas agora por efeito hidrostático. A pressão de sustentação, e correspondente separação das superfícies interatuantes, é simplesmente criada por um sistema de potência óleo-hidráulica [20].

Este tipo de lubrificação surge muitas vezes associado a sistemas auxiliares de arranque para veios pesados, onde a motorização normal não possui potência suficiente para superar o atrito sólido nas chumaceiras, nas fases de arranque e de baixos regimes de velocidade ainda insuficiente para permitirem a existência de um regime hidrodinâmico. No caso prático desta dissertação, adiante descrito, utiliza-se um sistema óleo-hidráulico de elevação do rotor da turbina, na fase de arranque da máquina e antes da formação da “cunha hidrodinâmica” que só ocorrerá ao atingir-se a velocidade nominal do sistema.

A **Lubrificação Elasto-hidrodinâmica** (LEHD), peculiar aos pares cinemáticos superiores – contacto “pontual”, ou “linear” [19] – manifesta-se também por um efeito hidrodinâmico, mas agora alojado entre as muito pequenas deformações elásticas provocadas na diminuta área de interação dos dois corpos pelas elevadíssimas pressões de Hertz aí surgidas. A necessária convergência geométrica é, nestes pares, facultada pelas curvaturas dos corpos à entrada do óleo para o local do contacto, e a imprescindível muito elevada viscosidade do óleo requerida ao efeito hidrodinâmico é devida ao seu muito oportuno e elevadíssimo aumento com a pressão.

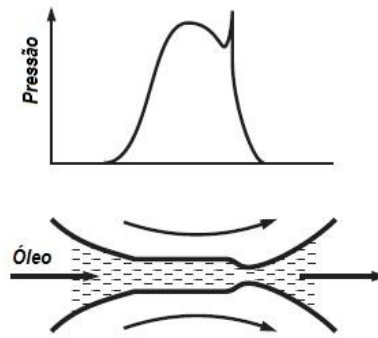


Figura 2.8: Lubrificação Elasto-hidrodinâmica, par cinemático superior [17]

Num regime de lubrificação onde não se cumpram as acima referidas condições para existência de efeito hidrodinâmico, haverá rompimento da película lubrificante e ocorrerá, em maior ou menor grau, contacto sólido entre as duas superfícies [20]. No limite, as superfícies apresentar-se-ão tão somente molhadas de óleo, com pleno contacto sólido entre as micro-asperidades das duas superfícies, e a desejada minimização do atrito tem de ser usualmente assegurada por aditivação antidesgaste ao óleo. O tipo de lubrificação existente é assim designado por lubrificação em camada limite (ou, simplesmente, **Lubrificação Limite**).

Se o regime de lubrificação a óleo se posicionar em que nem seja de película espessa nem de lubrificação limite, poderá o mesmo ser simplesmente designado por **Lubrificação Mista** (ou Parcial).

2.2.6. Tipos de Chumaceiras e seus Sistemas de Lubrificação

As chumaceiras são dispositivos mecânicos onde se apoia um veio, garantindo o seu movimento relativo mas impondo constrangimentos posicionais e evitando a sua distorção, ou empeno. As chumaceiras podem ser classificadas consoante a sua *função, forma, construção e lubrificação* [20].

Quanto à sua *função*, as chumaceiras classificam-se maioritariamente como:

- **radiais**, quando são fundamentalmente vocacionadas para resistirem à carga radial (direção perpendicular ao eixo do veio), assim impedindo deslocamentos radiais do veio;
- **axiais** ou de **impulso**, quando apropriadas para impedirem deslocamentos axiais do veio;
- **angulares**, quando especialmente desenhadas para impedirem tanto deslocamentos axiais como radiais;

Quanto à sua *forma*, na maioria dos casos, as chumaceiras podem ser:

- de **escorregamento**, quando o contacto entre as superfícies interagentes é superficial e, por isso, o movimento relativo entre o veio e o apoio é, exclusivamente, o de escorregamento (ditas chumaceiras de escorregamento, ou chumaceiras planas);
- de **rolamento**, quando o contacto entre os corpos interagentes é do tipo “pontual” ou “linear”, com movimento relativo característico de rolamento, ou misto de rolamento com algum escorregamento,

por via de corpos rolantes, como rolos ou esferas (ditas chumaceiras de rolamento, ou, simplesmente “rolamentos”).

Quanto à sua *construção*, as chumaceiras classificam-se como:

- **rígidas**, se os apoios se opuserem a qualquer desvio axial, ou lateral, ou angular, do veio;
- **elásticas**, se os apoios forem elasticamente deformáveis, conferindo alguma adaptação do apoio a algum pequeno desvio ou desalinhamento do veio;
- **autocompensadoras**, se, automaticamente, permitirem ajustar-se a algum desvio ou desalinhamento do veio;

Quanto ao sistema de lubrificação, as chumaceiras podem ser lubrificadas:

- **automaticamente**, se a velocidade relativa do tribossistema gerar autonomamente uma película lubrificante, que é interrompida quando o mesmo se imobiliza;
- **intermitentemente**; se a lubrificação for externa e periodicamente alimentada, independentemente da velocidade de rotação do veio;
- por **imersão**, se as superfícies interatuantes, ou parte destas, estiverem imersas no óleo lubrificante e, do seu movimento, resultar alguma alimentação de lubrificante;
- por **chapinhagem**, se algum órgão móvel do sistema lubrificado mergulhar no óleo e, chapinhando, o projete para as chumaceiras;
- por **anel**, como na chapinhagem mas usando um anel rodando livremente em torno do veio e, mergulhando parcialmente no óleo, e arrastando-o para a zona a lubrificar;
- sob **pressão**, se a chumaceira for lubrificada fazendo recurso a um injetor hidráulico externo;
- por **sistema de circulação centralizado**, quando um sistema óleo-hidráulico distribui o óleo a um ou vários pontos de lubrificação;

Para acrescentar facilidade de abordagem à análise do caso prático adiante apresentado, é necessário considerar-se mais em detalhe as chumaceiras de escorregamento e de rolamento.

Chumaceiras de Escorregamento

As chumaceiras de escorregamento são, como se viu, caracterizadas pelo seu movimento relativo de escorregamento. É vasta a sua aplicação a elevadas velocidades e temperaturas, com grande durabilidade. Têm uma boa capacidade de absorção de vibrações, funcionamento silencioso e pequena ocupação radial.

A nível industrial, é comum, particularmente nos apoios de “veios pesados”, como os das turbinas a que esta dissertação se dedica, a utilização de casquilhos de aço revestido de metais brancos (ou antifricção), de baixo coeficiente de atrito. Dos metais brancos mais comuns destacam-se as ligas à base de estanho (Sn) ou chumbo (Pb).

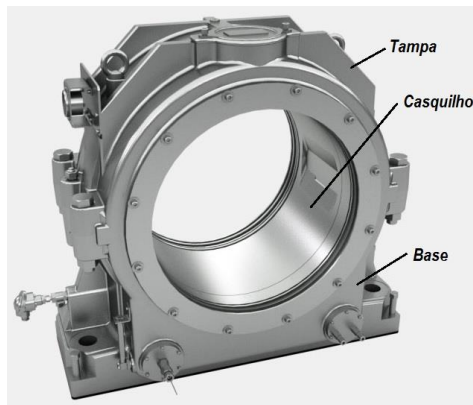


Figura 2.9: Exemplo de Chumaceira de Escorregamento [21]

A sua aptidão para a operação em regime de lubrificação hidrodinâmica – daí serem por vezes designadas por chumaceiras hidrodinâmicas – traz-lhes, nessas condições, vantagens em aplicações de alta velocidade de rotação, inadequadas a outros tipos de chumaceiras.

Chumaceiras de Rolamento

As chumaceiras de rolamento caracterizando-se pelo movimento relativo de rolamento peculiar ao seu respetivo par cinemático – e daí serem simplesmente designadas, na prática, por “rolamentos” [20].

O dispositivo é em geral constituído pelas peças indicadas na Figura 2.10, peças que, à exceção do separador, são em geral fabricadas em aço de elevada tensão de rutura e dureza.



Figura 2.10: Exemplo de Chumaceira de Rolamento (“Rolamento de Esferas”) [22]

Comparativamente às chumaceiras de escorregamento, as chumaceiras de rolamento apresentam desde logo a vantagem de exibirem um muito menor coeficiente de atrito sólido. Além disso, apresentam-se com uma grande versatilidade de formas e tamanhos no mercado, para as mais diversas aplicações, e possuem maior facilidade e economia de lubrificação. Apresentam, no entanto, uma duração limitada pelo número de ciclos de carga, prática inadequação para trabalho a seco, e têm muito baixa tolerância a vibrações ou choques devido à muito reduzida espessura da película lubrificante, que não faculta amortecimento [20]. Acresce ainda a sua notável limitação às mais altas velocidades devido a elevadas forças centrífugas dos elementos rolantes sobre os anéis, prejudicando a formação de películas espessas elasto-hidrodinâmicas e, por outro lado, sujeitam-se a

fortes impulsos de carga por passagem dos elementos rolantes a muito alta velocidade sobre qualquer minúscula imperfeição das pistas, com conseqüente agravamento de vibrações e rutura da película lubrificante.

Para além destas limitações de ordem mecânica, os rolamentos apresentam também uma maior taxa de produção de calor por atrito nos contactos anéis - corpos rolantes - separador, e conseqüentes aumento de temperatura, redução de viscosidade, e oxidação prematura do óleo lubrificante, dificultando a manutenção da película elasto-hidrodinâmica.

2.2.7. Plano de Lubrificação

Só se consegue uma lubrificação eficaz e economicamente eficiente, por estabelecimento de um adequado planeamento e gestão das atividades de lubrificação, bem controlados.

O Grupo SKF defende que um plano de lubrificação bem implementado pode-se traduzir num retorno financeiro de cerca de 400% para as indústrias, aumentando não só a fiabilidade e a produtividade, dos equipamentos, como também reduzir o consumo energético e os custos de manutenção [23]. Acresce a isso uma melhor organização do histórico de manutenção, e maior racionalização do consumo e reposição dos lubrificantes [24].

Alguns dos principais passos a considerar aquando do desenho e implementação de um plano de lubrificação, são [25]:

- 1) Listar o equipamento existente e respetivo histórico de manutenção, e identificar anomalias relacionadas com a lubrificação;
- 2) Definir as necessidades de lubrificação:
 - Que* equipamentos necessitam de lubrificação, que pontos a lubrificar e que tipo de lubrificação lhes está associada;
 - Quando* e com que periodicidade a lubrificação deve ser aplicada a cada equipamento;
 - Que* tipo de lubrificantes devem ser aplicados e qual a quantidade mínima necessária para satisfazer as necessidades de cada equipamento;
- 3) Definir a forma de aplicação dos lubrificantes e elaboração de fichas de lubrificação, com respetiva identificação e codificação dos lubrificantes.

2.3. Análise de Óleos em Serviço

Nesta secção abordam-se os seguintes temas mais centrais na defesa da importância de um programa de análises de óleos, nas instalações industriais: uma caracterização geral da manutenção por controlo da condição dos óleos lubrificantes; os tipos de contaminação e produtos resultantes da degradação do óleo em serviço; uma síntese dos sistemas de filtragem; os tipos de análises e métodos laboratoriais físico-químicos usados para averiguação da degradação prematura dos óleos lubrificantes e deteção de anomalias; as técnicas de amostragem mais comuns, salientando-se as boas práticas de amostragem como fator de sucesso de qualquer programa de análise de óleos. Por

fim, proporciona-se uma visão geral dos métodos mais relevantes de interpretação e tratamento de dados resultantes das análises feitas aos lubrificantes em serviço.

Por força do âmbito particular da presente dissertação, fundamentalmente dirigida para a aplicação de óleo lubrificante industrial de base mineral e em favor da maior simplicidade possível da exposição das matérias e conceitos abordados, indicar-se-á esse lubrificante simplesmente por “óleo”, salvo indicação específica em contrário.

2.3.1. Manutenção Preventiva Condicionada por Análise de Óleos

Dos tipos de manutenção anteriormente abordados, este documento focaliza-se sobretudo na Manutenção Preventiva Condicionada, conceito surgido nos anos 70-80 e baseado na monitorização do estado real do equipamento em serviço, por meio de um sistema de controlo de condição [10]. Existe uma variedade de técnicas de controlo da condição dos equipamentos, com aplicação na manutenção, entre outras, a Termografia, a Análise de Vibrações, Medidas de Ultra-sons e a Análise de Óleos em serviço. É sobre esta última que se enquadra este trabalho, no controlo de condição de uma turbina a vapor em ambiente industrial, como à frente se verá, no capítulo 3.

A manutenção condicionada por análise de óleos envolve a monitorização periódica e controlo das principais causas de falhas em equipamentos lubrificados. Estas causas estão, na maioria dos casos, associadas à contaminação do óleo (quer por partículas de desgaste quer por agentes externos) e à degradação dos aditivos existentes no óleo [14]. O sucesso de um programa de análise de óleos passa pela identificação e localização antecipada, da potencial causa de falha, objetivando a sua neutralização.

Beatriz Graça [26] e Saraiva Cabral [10] apontam a redução de perdas de produção e de custos de manutenção, proporcionadas pela implementação de sistemas de controlo de condição, como as principais vantagens económicas para as organizações industriais que a adotem. Em concreto: redução do número de pedidos de intervenção em casos de avarias, redução do orçamento de paragens programadas para manutenção planeada e redução de custos de reparação associados às inadvertidas avarias em equipamentos críticos.

Para além dos benefícios de cariz económico, revelam-se ainda o aumento do rendimento operacional e do tempo de vida útil, quer do equipamento, quer do óleo lubrificante.

2.3.2. Tipos de Contaminação dos Óleos

A contaminação dos óleos lubrificantes é uma indesejável constante. Apresentam-se em seguida os seus tipos mais comuns, observando-se a forma como a contaminação surge no sistema de lubrificação. Não se desenvolve a contaminação do óleo por combustível, por não estar no âmbito da aplicação industrial desta dissertação.

Contaminação por Partículas

A contaminação por partículas abrasivas é uma das principais causas da falha dos mecanismos lubrificados. Os danos provocados dependem bastante da natureza das partículas, seu tamanho, forma e dureza [14].

Muitas dessas partículas infiltram-se no óleo nos pontos em que o sistema interage com o ambiente externo, enquanto outras se podem gerar dentro do próprio sistema. Algumas das fontes de contaminação por partículas são:

- Vedantes danificados ou ineficazes que permitem a entrada de partículas no sistema;
- Novo óleo lubrificante. Ocasionalmente, o óleo, mesmo quando novo, poderá vir já contaminado do fornecedor, ou ser contaminado no armazenamento, ou no seu transporte;
- Descuidados procedimentos de amostragem para controlo do óleo poderão permitir a infiltração de partículas externas nos pontos de amostragem;
- Os respiradouros são sempre pontos de potencial contaminação do óleo por partículas do meio externo;
- Filtros colmatados ou danificados contribuem para a contaminação por perda de retenção das impurezas, ou até, os primeiros, por darem livre passagem ao óleo, via *bypass*;

Também internamente aos tribossistemas, geram-se partículas, devidas a mecanismos de desgaste – adesivo, abrasivo, ou de fadiga superficial – que não só danificam o contacto como aceleram o processo de oxidação do óleo, ou promovem a depleção de aditivos.

Aliada à oxidação e consequente degradação prematura do óleo, a concentração de lamas e pequenas partículas aumentará a sua viscosidade, mas mascarando a danificação real em desenvolvimento no lubrificante.

Contaminação por Água

A contaminação por água é outro dos modos de contaminação mais destrutivos para os óleos lubrificantes [14]. A água pode surgir nos óleos sob os seguintes estados:

- **Dissolvida** – A quantidade dissolvida depende do tipo do óleo base, do seu pacote de aditivos, dos contaminantes já nele existentes, e da sua temperatura. Um óleo novo de base parafínica e poucos aditivos dissolve pouca água até atingir um ponto de saturação. Um óleo já algo contaminado, oxidado, e com abundância de aditivos polares (por exemplo, antidesgaste), dissolverá uma maior quantidade de água.

O aumento de temperatura provoca uma maior solubilidade da água no óleo. Se a temperatura descer abaixo do ponto de condensação da água, parte desta, dissolvida, passará à forma de emulsões, ou mesmo de bolsas de água livre.

- **Emulsionada** – Quando a água não dissolvida no óleo é submetida a uma solicitação cortante (por exemplo, na bombagem do óleo), fragmenta-se e emulsiona em gotículas que naquele permanecem e, muitas vezes, se detetam a olho nu, pela aparência turva do óleo. A presença de aditivos, óxidos ferrosos, ou outros contaminantes, favorecem a formação destas emulsões estáveis de água no óleo.

- **Água livre** – Acontece quando se verifica que água e óleo se separam totalmente devido à sua inerente insolubilidade mútua, por diferença significativa das suas densidades.

Ambientes húmidos, ou operações de lavagem, entre outros, são fatores externos que potenciam a entrada de água no sistema de lubrificação, nomeadamente através de vedantes, portas de amostragem, ou respiradouros.

Em equipamentos com frequentes fases de arranque e paragem, a água pode surgir por condensação dentro do sistema, devido a decréscimos da temperatura nas paragens e onde se atinja o seu ponto de condensação.

Outro modo mais comum de entrada de água no sistema de lubrificação deve-se a danificação por corrosão, ou erosão, no sistema de refrigeração do equipamento, permitindo a fuga de líquido de refrigeração (mistura de água com glicol) para o óleo.

De algum modo, a presença de água no óleo, livre ou em emulsão, é altamente indesejável por: prejudicar a película lubrificante; expor os componentes lubrificados a corrosão, atacando nomeadamente o revestimento de metais brancos das chumaceiras; reagindo com alguns aditivos, dá origem a compostos quimicamente agressivos que aceleram a oxidação e degradação estrutural do óleo; e, a sua presença nos fundos dos cárteres pode promover a criação de micro-organismos que, alimentando-se de moléculas de óleo e gerando detritos ácidos, contribuem para o mesmo indesejável desfecho [14].

Contaminação por Glicol

O glicol pode contaminar o óleo lubrificante, em equipamentos que utilizem misturas de glicol e água como líquido de refrigeração.

As consequências da água foram acima apontadas. No que se refere ao glicol, este, ao contactar com o óleo, promove a formação de lamas gelatinosas e ácidas, originando oxidação prematura com o já referido aumento de viscosidade do óleo em degradação. A qualidade da lubrificação é bastante prejudicada, a filtragem muito sujeita a colmatagem e, além disso, aquela acidificação potencia a corrosão das superfícies lubrificadas, por exemplo por picagem química dos revestimentos de metais brancos das chumaceiras, e seu aprofundamento aos núcleos metálicos desses órgãos.

De notar que o glicol é difícil de remover do óleo, pelo que obriga, frequentemente, à sua substituição total.

2.3.3. Controlo da Contaminação, e Purificação dos Óleos

Consideram-se quatro técnicas principais de remoção de agentes contaminantes do óleo lubrificante: a decantação, a centrifugação, a destilação a vácuo e a filtragem mecânica.

A decantação exige que o óleo fique em repouso num tanque de decantação o tempo suficiente para que as impurezas se depositem no fundo e que o óleo limpo seja separado.

A centrifugação recorre a filtros, ou separadores, centrifugadores, que promovem a separação de partículas de diferentes massas por centrifugação radial. Apesar de mais eficientes que a decantação, os filtros centrifugadores possuem algumas limitações na remoção de partículas pequenas e de baixa densidade.

Na destilação a vácuo a água é removida do óleo por aquecimento a 100°C. Sob pressão de vácuo, é obtida a extração vaporosa de água e de outros contaminantes presentes no óleo [27].

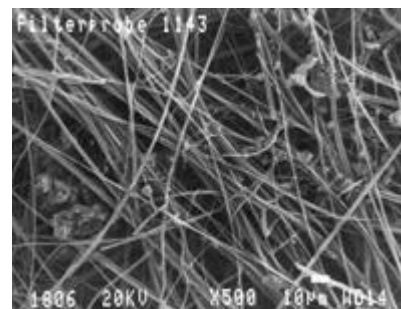
Não obstante às anteriores, a convencional filtragem mecânica é a técnica mais comum de purificação de óleos em aplicações industriais. Mencionam-se em seguida três dos mais usuais tipos de captura de partículas nos sistemas de lubrificação: dois tipos de filtro e um bujão magnético [14]:

- Filtros de Papel (ou de Celulose) – constituídos por cartuxo de papel de polpa de madeira. São bastante eficientes na retenção de partículas maiores, mas danificam-se na presença de água e temperaturas elevadas do meio envolvente.

- Filtros de Microfibras de Vidro – cartuxos de fibras de vidro, de malha de filtragem de elevada densidade de fibras de diâmetro reduzido para partículas de menores dimensões, oferecendo maior estabilidade térmica que os de papel e não sendo afetados pela presença de água no óleo (ver Figura 2.11).



(a) Fibras de Celulose



(b) Microfibras Sintéticas de Vidro

Figura 2.11: Fotomicrografias (x500) de malhas de filtros [28]

- Bujões Magnéticos – de grande importância no âmbito da manutenção condicionada, destacam-se dos filtros convencionais por usarem o magnetismo como meio de atração de partículas ferromagnéticas (e outras, que de algum modo fiquem agarradas àquelas) presentes, em suspensão, no óleo circulante no sistema de lubrificação.

2.3.4. Tipos de Análise de Óleos

Dos vários tipos de análise de óleos lubrificantes usados para efeitos da sua manutenção condicionada, efetuada por via de regra sobre uma adequada amostra de óleo, destacam-se neste lugar as análises físico-químicas, a análise de contaminantes e a análise de partículas de desgaste, de objetivos a seguir brevemente indicados [14].

Análises físico-químicas

Geralmente realizadas em laboratório, este tipo de análises avalia não só as propriedades físicas e químicas dos fluidos lubrificantes, como também dos seus aditivos [2][14]. Nela se consideram os seguintes ensaios e objetivos genéricos:

- Viscosidade – Mede-se, em geral, a viscosidade cinemática do óleo a 40°C, ou a 100°C. Uma alteração da viscosidade do óleo lubrificante pode dever-se a vários problemas, como aumento por oxidação ou contaminação de partículas;
- Número de Acidez, *Total Acid Number* (TAN) – Mede-se o nível de acidez do óleo para controlo do seu estado de oxidação;
- Espectrometria no Infra-vermelho com Transformada de Fourier (*Fourier Transform Infrared - FTIR*) – Monitoriza-se, em simultâneo, a presença de vários contaminantes do óleo (nomeadamente, de degradação por oxidação, presença de água, ou de combustível);
- Teste de Oxidação em Vaso de Pressão Rotativo, *Rotating Pressure Vessel Oxidation Test* (RPVOT) – Avalia-se a estabilidade do óleo à oxidação na presença de água. Complementa outros métodos de simples averiguação do estado de oxidação, como indicador de vida útil remanescente do óleo;
- Teste de Vida Remanescente por Anti-oxidantes (Voltametria de Varredura Linear), (*Remaining Useful Life Evaluation Routine*, RULER) – Monitoriza-se a concentração de agentes antioxidantes (adicionados a óleos de turbinas, como fenóis impedidos ou aminas aromáticas) ainda presentes no óleo, para controlo da sua vida útil remanescente;
- Água pelo Método de Karl Fischer – Determina-se a concentração do total de água (livre, emulsionada ou dissolvida) presente no óleo;
- Colorimetria por Filtro de Membrana (*Membrane Patch Colorimetry - MPC*) – monitoriza-se a acumulação de produtos insolúveis no óleo (nomeadamente, os potenciais vernizes) por visualização do aspeto da membrana após filtragem;
- Inibição de Corrosão – Afere-se a capacidade do óleo para prevenir a ocorrência de corrosão no equipamento que lubrifica (normalmente em componentes de aço ou de ligas de cobre);
- Demulsibilidade – Mede-se a aptidão do óleo para se libertar da água que nele se tenha incorporado;

- Espuma – Determina-se a tendência para a formação de espuma no óleo, bem como a estabilidade da mesma;
- Libertação de Ar – Mede-se a aptidão do óleo para se libertar de bolhas de ar que nele se tenham incorporado;
- Ponto de Inflamação – Determina-se a temperatura mínima, ao ar, a que os vapores do óleo se inflamam, na presença de uma chama, para controlo da sua capacidade de resistência ao fogo;

Análise de Partículas Contaminantes

A análise de partículas contaminantes visa a sua quantificação em número de partículas por volume do óleo, sendo a concentração e distribuição de grandezas das partículas expressas por um apropriado “Código de Limpeza ISO” (Norma ISO 4406).

Análises de Metais de Desgaste

A deteção e caracterização das partículas de desgaste permitem identificar e localizar os órgãos lubrificados de que provêm. Entre os diversos tipos de análises de metais de desgaste destacam-se as técnicas de ferrografia e de espectrometria elementar, a seguir brevemente caracterizadas:

- Ferrografia Analítica – Em cada ensaio averigua-se o tamanho, forma, textura e metalurgia das partículas metálicas ferrosas, e das não-ferrosas que se encontrem agregadas às primeiras para assim se prognosticar o provável órgão afetado e seu mecanismo de falha – modo de desgaste.
- Espectrometria Elementar – Por adequada espectrometria atómica analisa-se o respetivo espectro por elemento atómico presente no óleo, para revelação da presença de materiais inorgânicos dissolvidos, ou em suspensão, no mesmo. Será assim identificada a natureza química de partículas de desgaste, de elementos constituintes dos aditivos, e de outros tipos de contaminantes, e quantificadas as suas concentrações.

A Figura 2.12 ilustra os mais usuais tipos de análise de óleos, e seus méritos relativos, na Manutenção Condicionada por Análise de Óleos em Serviço, com inclusão dos seus propósitos: proactivo (foco na prevenção da causa de raiz de falha) e preditivo (foco na deteção da falha).

Análises	1. Propriedades do Fluido (propriedades físico-químicas do óleo em serviço)	2. Contaminação (contaminantes destrutivos para o equipamento e para o óleo)	3. Desgaste (presença e identificação de partículas de desgaste)
Análise de Partículas	●	●	○
Água pelo Método de Karl Fischer	●	●	○
Viscosidade	●	○	○
Ferrografia	●	○	●
TAN	●	○	○
FTIR	●	○	○
MPC	○	●	○
Ponto de Inflamação	○	●	○
Espectrometria Elementar	○	○	●
	Proactivo	Proactivo	Preditivo

● Grandes Benefícios ○ Pequenos Benefícios ○ Sem Benefícios

Figura 2.12: Categorias e Tipos de Análise de Óleos [14]

Mais adiante, na secção 2.4.4, tratam-se em maior detalhe os tipos de análise de óleo mais comuns do controlo de condição de turbinas a vapor, tema de base da presente dissertação.

2.3.5. Técnicas de Amostragem

O processo de amostragem é de fundamental importância no controlo de condição do óleo em serviço. Maus procedimentos nas tomadas de amostras podem resultar em mudanças desnecessárias, ou tardias, de óleo, como também prejudicar o andamento da deteção de falha em progresso, conduzindo a paragens desnecessárias, maiores custos de manutenção, e significativas perdas de produção.

Como tal, os adequados procedimentos de amostragem deverão assegurar [2]:

- obter o máximo de informação que possa ser retirada do óleo, relativa ao diagnóstico pretendido;
- garantir que a informação contida nas amostras seja uniforme e estatisticamente representativa, assegurando, nomeadamente, que as mesmas não sejam contaminadas durante a sua recolha;

Para obedecer a estes dois objetivos relevam-se três fatores a considerar aquando do planeamento da amostragem:

- a localização devida dos pontos de amostragem;
- a frequência de amostragem;
- o uso dos corretos dispositivos e recipientes de recolha das amostras;

A este respeito detalham-se, em seguida, as mais pertinentes considerações.

Localização de Pontos de Amostragem

A deteção da falha potencial e sua origem, consegue-se pela instalação de pontos de acesso ao óleo em locais críticos do seu sistema de circulação – os “pontos de amostragem” – normalmente consistindo de simples válvulas de amostragem.

A localização destes pontos de amostragem deverá obedecer às seguintes regras básicas [14]:

- Turbulência – Zonas turbulentas são as melhores para pontos de amostragem. Evitar contudo, locais de grande estrangimento ao escoamento que possam prejudicar a melhor captação de partículas para o recipiente de amostragem;
- Fontes de Contaminação – Tentar situar os pontos de amostragem a jusante de componentes alvo de desgaste, ou de entrada de contaminantes, enriquecendo assim a amostra quanto ao estado do equipamento;
- Filtragem – Filtros, separadores, ou outros componentes de purificação, removem contaminantes do óleo e, por conseguinte, retiram informação vital para averiguação do estado do equipamento. Dever-se-á, portanto, colher as amostras a montante daqueles dispositivos, exceto se estiver em

causa o desempenho de algum deles, sendo nesse caso necessário ter-se pontos de amostragem antes e depois do mesmo;

- Linhas de dreno, e de retorno – em sistemas de circulação é nas linhas de dreno, ou nas de retorno, antes de filtragem para o reservatório, onde se poderão colher as melhores amostras relativas a contaminantes sólidos ou a desgaste dos órgãos lubrificandos;

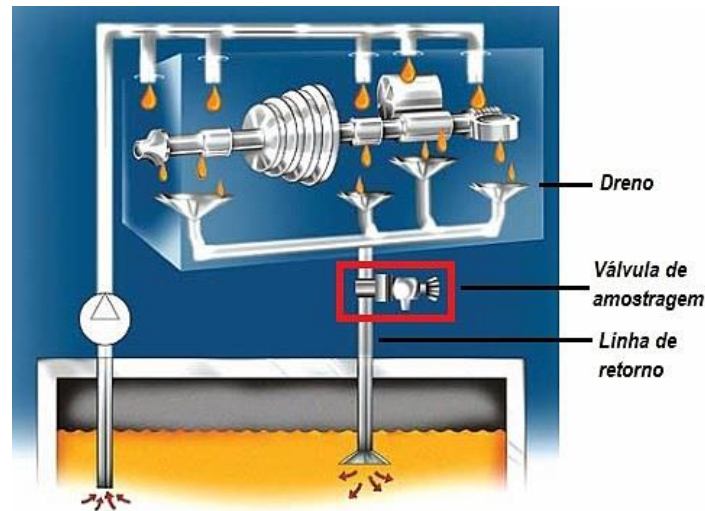


Figura 2.13: Exemplo de Ponto de Amostragem na Linha de Retorno [29]

Faz-se a distinção entre pontos de amostragem primários e secundários. Os primeiros localizam-se, normalmente, na linha de retorno (ver Figura 2.13) para amostras rotineiras, de avaliação da condição geral do equipamento, quanto a desgastes ou presença de contaminantes, bem como acerca do estado das propriedades físico-químicas do lubrificante.

Caso alguma amostra primária sugira desgaste de componentes, será necessário recorrer-se a amostragem secundária. Os pontos de amostragem secundários localizam-se sempre a jusante de órgãos propensos a desgaste, por forma a poder-se isolar e localizar falhas por componente.

Por estar no foco da proposta de melhoria feita à turbina considerada no presente trabalho, a utilização de pontos de amostragem secundários será mais à frente apresentada em maior detalhe.

Frequência de Amostragem

O sucesso de um programa de análise de óleos depende fortemente da frequência da amostragem. Esta é baseada no tempo de operação dos equipamentos, sendo feita uma calendarização dos intervalos de amostragem para cada máquina ou, até, para cada componente, a que se ajustará ao tipo de equipamento, ao óleo, e ao meio em que opera, tendo-se em conta [14]:

- Os riscos e consequências de uma falha – tendo em consideração não só os custos de reparação e de quebras de produção, como também, fundamentalmente, a segurança da operação;

- A curva de vida do equipamento – em termos da conhecida “curva de banheira”, com taxa de avarias global relativamente baixa em fase de “vida útil”, e onde a maioria das suas avarias ocorrem

na fase de “mortalidade infantil” (nomeadamente após grandes intervenções de reparação, ou de revisão geral), ou quando os equipamentos começam a aproximar-se da sua fase de “desgaste”, no final da “vida útil”. Naturalmente, a frequência de amostragem deverá ser maior quando o período de “vida útil” for menor;

- O tempo de serviço do óleo – que, quer em novo quer em fim de vida, exigirá uma amostragem mais frequente. No caso de “novo” (assim considerado até o óleo atingir cerca de 10% da sua vida nominal expectável), o óleo poderá apresentar-se em serviço já com alguma contaminação incidental, ou não ser apropriado para a aplicação em causa. Em fim de vida, o óleo apresenta em geral uma degradação acentuada por continuada oxidação, contaminação, ou esgotamento de aditivos;

- As condições de operação – onde fatores como carga, velocidade, temperatura ou humidade, afetando adversamente a fiabilidade do conjunto equipamento-lubrificante, implicam consequências notáveis no planeamento dos intervalos de amostragem do lubrificante.

Na Tabela 2.1 são apresentados intervalos de amostragem típicos, em horas de operação, para diversos tipos de equipamentos industriais.

Tipo de Equipamento	Horas Operacionais
Motores a Diesel	150
Transmissão, Diferenciais	300
Sistemas Hidráulicos – equipamentos móveis	200
Turbinas a Gás	500
Turbinas a Vapor	500
Compressores a Gás/Ar	500
Refrigeradores	500
Trens de Engrenagens (altas velocidades)	300
Trens de Engrenagens (baixas velocidades)	1000
Chumaceiras (Escorregamento e Rolamento)	500
Motores de Aeronaves	25-50
Turbinas a Gás de Aeronaves	100
Caixas de Velocidades de Aeronaves	100-200
Sistemas Hidráulicos de Aeronaves	100-200

Tabela 2.1: Frequências de amostragem recomendadas [14]

Dispositivos e Recipientes de Amostragem

A limpeza dos dispositivos e recipientes usados na amostragem, e a garantia de que a amostra não seja contaminada antes de ser analisada, são requisitos essenciais para um tratamento de dados o mais preciso possível. Assim, o estado de limpeza apropriado para aqueles dispositivos deverá obedecer à norma ISO 3722, que classifica o grau de limpeza requerido em:

- Limpo – menos de 100 partículas maiores que 10 µm, por ml de óleo;
- Super limpo – menos de 10 partículas maiores que 10 µm, por ml de óleo;
- Ultra limpo – menos de uma partícula maior que 10 µm, por ml de óleo;

É ainda importante que todo o procedimento de amostragem seja cuidadosamente seguido e documentado por todos os analistas, para se assegurar a consistência dos dados recolhidos [14]. São fundamentais os registos de data da amostragem, identificação do equipamento, localização do ponto de amostragem, tipo de lubrificante, tempos de serviço do equipamento e do lubrificante, e data e volume de óleo abastecido desde a última amostragem.

2.3.6. Interpretação e Tratamento de Dados da Análise de Óleos

O tratamento numérico e representação gráfica dos dados obtidos na análise de óleos é crucial para a monitorização do equipamento e controlo da qualidade do óleo. Apresenta-se em seguida os dois principais métodos de gestão desses dados e respetiva representação gráfica e tipos de alarmes (valores alvo e limites para os diversos parâmetros de controlo do óleo lubrificante) [30]:

- Alarmes baseados em taxa de variação – São normalmente estabelecidos para controlar a progressão de parâmetros anómalos no óleo [14], não com atribuição de níveis de valores-limite absolutos, mas sim de valores de variação relativa, temporal, do parâmetro medido;

- Alarmes de controlo estatístico – São valores limites da média amostral do parâmetro considerado, estabelecidos com base no princípio das cartas de controlo estatístico do processo, geralmente a dois ou três desvios-padrão daquela média;

Num caso ou noutro, a excedência em relação ao valor de alarme provocará a mais adequada tomada de ação.

Para além das anteriores técnicas de carácter preditivo – controlo da falha expectável – existem outras, ditas técnicas proactivas – procura da prevenção da causa de raiz da falha – alertando sobre condições anormais potenciadoras da degradação do equipamento e do lubrificante. Destas últimas destacam-se: o estabelecimento de objetivos dirigidos à minimização da probabilidade de falha, por exemplo promovendo a melhoria do projeto do sistema de lubrificação, ou do próprio óleo lubrificante; ou estabelecendo limites de intervalos de inspeção, ou de reposição de aditivos, mais apropriados.

2.4. Lubrificação de Turbinas a Vapor

Dos tipos de turbinas operadas na indústria destacam-se as turbinas a gás e as turbinas a vapor, umas e outras associadas a geradores elétricos, de crescente interesse para a produção de energia elétrica autónoma na fábrica.

No foco desta dissertação está a turbina a vapor que, em alguns casos, pode chegar a ter uma vida útil de serviço superior a 20 anos, enquanto que as turbinas a gás têm, geralmente, uma vida útil mais curta [2].



Figura 2.14: Exemplo de uma Turbina a Vapor [31]

O tipo de turbina em estudo centra-se num veio (do rotor) apoiado em chumaceiras de escorregamento, com sistema de lubrificação forçada, a elevada pressão, por bomba de óleo.

Não obstante as chumaceiras trabalharem normalmente em regime de lubrificação hidrodinâmica, acontece que muitas das paragens forçadas de turbinas industriais devem-se a problemas com a sua lubrificação, principalmente a das suas chumaceiras [18]. Como tal, é fundamental assegurar-se, para uma produção contínua de energia, uma eficaz monitorização da lubrificação da turbina, e suas chumaceiras.

Dando seguimento à necessidade de introdução de importante matéria de base, objetivando a mais eficaz exposição do conteúdo fulcral deste trabalho, aborda-se agora nesta secção o sistema de lubrificação típico das grandes turbinas, como a da presente dissertação, os problemas mais comuns dos óleos lubrificantes das turbinas a vapor, e as principais características que estes deverão possuir para a maior durabilidade possível. Por fim apresenta-se, com algum detalhe, o pacote de análises laboratoriais de manutenção condicionada por análise de óleos em serviço das turbinas a vapor.

2.4.1. Sistemas de Lubrificação em Turbinas

Na zona das grandes potências a elevadas velocidades, os sistemas de lubrificação de circulação forçada são os mais utilizados, nomeadamente na turbina a vapor. A Figura 3.10 exemplificará a sua composição típica. São constituídos por um reservatório principal, do qual o óleo é bombeado para os órgãos a lubrificar. São também devidamente equipados com filtros, arrefecedores e outros dispositivos que garantem a durabilidade, temperatura operacional e manutenção das propriedades físico-químicas do óleo lubrificante.

Não obstante o facto de a alimentação de óleo às chumaceiras da turbina se processar, nominalmente, em regime hidrodinâmico, assegurado pela sua bomba normal – dita bomba principal – acontece que, em face da enorme massa do seu rotor, a turbina precisa de uma outra bomba – esta dita bomba de elevação – que assegurará, apenas nas fases de arranque ou de paragem, o levantamento do rotor para evitar o desgaste das chumaceiras em lubrificação limite e que, ao contrário, a lubrificação se realize com película espessa, em regime de lubrificação hidrostática, até que o regime de lubrificação comute para hidrodinâmico, ao atingir-se a velocidade de rotação nominal do rotor.

Dito isto, é de assinalar que as chumaceiras da turbina, quando desviadas dos dois regimes de lubrificação apontados, estarão sempre em condições de trabalharem com algum contacto sólido.

2.4.2. Problemas Comuns em Óleos de Turbinas a Vapor

Como antes referido, as turbinas são elementos vitais para a produção económica de energia em grandes áreas industriais e a sua paragem forçada compromete em larga escala os objetivos económicos dessas organizações.

Num país industrializado como os EUA, estima-se que cerca de 20% dessas paragens no sector de produção de energia são devidas a turbinas e que 19% desses casos estão associados ao seu sistema de lubrificação [32]. Daí decorrendo que a melhor forma de se minimizar o problema seja com a aplicação de manutenção preventiva condicional dirigida a algum sinal de falha potencial, quer a nível do equipamento quer a nível do seu óleo lubrificante, estando muitas vezes relacionadas entre si.

A esse respeito, consideram-se em seguida os sinais dos problemas mais ocorrentes, suas causas e prevenção:

- **Oxidação do óleo** – desde que é posto em serviço, o óleo lubrificante é sujeito a contínua e inevitável degradação, por oxidação em particular. Em turbinas a vapor o óleo está continuamente em contacto com oxigénio, que com ele reage, gerando compostos ácidos. O efeito agrava-se com o aumento da temperatura (estima-se que acima dos 60°C, a taxa de oxidação duplica em cada 10°C de aumento de temperatura) e, com a presença de água no óleo (livre, em emulsão, ou diluída), proporciona-se um mais rápido consumo dos aditivos antioxidantes, conduzindo à oxidação destrutiva do óleo, com efeitos drásticos na qualidade da lubrificação do mesmo (pese embora, como antes referido, o “enganoso” aumento da viscosidade verificado no fluido degradado).

Da excessiva oxidação do óleo podem ainda resultar produtos como “lamas” no seu seio, e “vernizes” nos órgãos lubrificados (ver Figuras 2.5 e 2.6) que podem, por exemplo, colmatar filtros, obstruir servo-válvulas, danificar vedantes e promover corrosão das superfícies metálicas dos componentes. No caso das chumaceiras, os vernizes podem levar a um aumento excessivo da sua temperatura, pondo em risco a sua integridade superficial [1].

Um óleo muito oxidado poderá ser denunciado por exibir uma cor escurecida em relação ao estado de novo [12], bem como por apresentar um cheiro acre.



Figura 2.15: Amostra de óleo visivelmente oxidado [33]

- **Contaminação por água** – a presença de água, inevitável no clima húmido de uma turbina a vapor, agirá sempre como um catalisador da oxidação do óleo, bem como desprovê-lo, ao longo do tempo, de alguns dos seus aditivos. Além disso, a água promove a corrosão metálica dos componentes, fomentando o acelerar do desgaste abrasivo dos vários órgãos pela formação de óxidos ferrosos [18], facto agravado por os aditivos inibidores de corrosão, sendo solúveis em água, tenderem a ser removidos do óleo [1]. Outros aditivos, como os de antidesgaste e extrema pressão (AW/EP), ou os detergentes-dispersantes, poderão ser igualmente afetados, deles resultando compostos ácidos que dão origem e lamas de nocividade atrás referida [18].

Ainda de referir que a presença de água no óleo também dá origem ao desenvolvimento de micro-organismos que produzem resíduos corrosivos, de similares efeitos nocivos no sistema de lubrificação da turbina [18].

- **Formação de Espuma e Presença de Ar** – Outra inevitabilidade nos sistemas de circulação de óleo como os das turbinas, é a formação de espuma por mistura ar-óleo [2].

O seu efeito é assinalado como um dos principais problemas na indústria [34], relacionados com a dificuldade de libertação de ar do óleo, nomeadamente, no caso das turbinas a vapor [1], tais como: redução de massa de óleo nos pontos de lubrificação com conseqüente redução da espessura de película lubrificante, agravamento da taxa de oxidação do óleo por aumento da superfície de contacto ar-óleo, possível formação de lamas e depósitos; risco de cavitação, com seus efeitos perversos de desgaste por picagem, na bomba e nas chumaceiras, e a possível perda de eficiência dos sistemas de controlo óleo-hidráulico.

Importa notar que o uso excessivo de aditivos antiespuma poderá, por outro lado, prejudicar a libertação de ar, do óleo, situação que não pode ser melhorada com recurso a aditivos específicos, e o ar preso no óleo reduz a estabilidade da película lubrificante, aumenta a possibilidade de cavitação e pode também estar na origem de vibrações nocivas no equipamento.



Figura 2.16: Formação de Espuma num óleo lubrificante [35]

- **Contaminação por Partículas** – a presença de partículas insolúveis em suspensão no óleo poderá: aumentar, sem efeito benigno, a sua viscosidade, promover a oxidação, baixar a demulsibilidade da água, contribuir para o desgaste abrasivo dos órgãos lubrificadas, indiciar vedação insuficiente ou filtros colmatados, e promover a degradação de aditivos [1].

Por vaticinar um primeiro alarme de anomalia do lubrificante, é de extrema importância tomar-se conhecimento do nível de contaminação do óleo para planeamento de manutenção condicionada, ou motivar-se uma tarefa de manutenção proactiva de análise de raiz da falha.

- **Descargas Eletrostáticas nos Filtros** – a geração de descargas eletrostáticas em filtros, e consequente danificação estrutural do óleo, é um fenómeno relativamente comum, que resulta do atrito intermolecular do óleo na passagem pelos estreitos orifícios das malhas dos filtros.

2.4.3. Características dos Óleos de Turbinas a Vapor

Numa turbina a vapor, a sua contínua operação é grandemente dependente da qualidade da sua lubrificação, fundamentalmente no que concerne à durabilidade das chumaceiras de escorregamento que apoiam o rotor.

Com os atuais padrões operacionais das turbinas, os seus óleos lubrificantes são submetidos a condições de serviço cada vez mais severas, nomeadamente a mais elevadas temperaturas. Por isso são cada vez mais exigentes as suas propriedades requeridas, sendo de relevar que um óleo de turbina deverá [1]:

- Possuir uma viscosidade suficiente para garantir a formação de uma película lubrificante espessa e estável;
- Possuir boa resistência à oxidação e à degradação térmica;
- Permitir uma rápida libertação de ar, para evitar o rompimento da película lubrificante;
- Garantir baixa formação de espuma, minimizando a perturbação na eficácia da película lubrificante;
- Possuir uma boa demulsibilidade da água, desagravando a sua oxidação e a corrosão das superfícies lubrificadas;
- Promover o melhor arrefecimento dos órgãos que lubrifica, deles transferindo calor sem se oxidar ou degradar termicamente;
- Possuir naturais propriedades de baixo atrito e antidesgaste;

Um óleo lubrificante para turbinas, se for bem aplicado, monitorizado e refrescado nas alturas certas, pode durar mais de 20 anos [2]. Embora as suas anteriores características possam ser melhoradas com o uso de aditivos, a qualidade do próprio óleo-base é fulcral na produção de um bom lubrificante.

O *American Petroleum Institute* (API) classifica os óleos base, pela sua natureza, nos 5 tipos, indicados na Figura 2.17. Os três primeiros grupos referem-se ao óleo mineral normal, pós-refinação, ordenados quanto a conteúdos de enxofre e de saturados, e a índice de viscosidade (IV). O enxofre contribui para a oxidação mais prematura do óleo. Os saturados – moléculas do óleo, de elevada estabilidade – têm menos apetência para reagir com o oxigénio do meio-ambiente e com o enxofre do óleo base [1]. O IV, como anteriormente observado, mede o decréscimo da viscosidade do óleo com a temperatura – maior IV, menor decréscimo da viscosidade.

O óleo do grupo IV tem por base um hidrocarboneto sintético, designado polialfaolefina (PAO), e ao grupo V correspondem todos os tipos de óleo não incluídos nos anteriores.

Grupos de Óleo Base API				
	Óleo Base	Enxofre (%)	Saturados (%)	IV
Mineral	Group I	>0.03	e/ou <90	80 - 120
	Group II (hidro-tratado)	<0.03	e >90	80 - 120
	Group III (hidro-cracked)	<0.03	e >90	>120
Sintético	Group IV	PAO		
	Group V	Óleos base não incluídos nos grupos anteriores		

Figura 2.17: Grupos de Óleo Base API [36]

Os óleos minerais do grupo I, possuindo uma maior concentração de aromáticos, oferecem uma maior solvência à aditivação anti-oxidante – normalmente de base fenólica, ou amínica – mas, tendo maior teor de enxofre e menor conteúdo de saturados, acabam por degradar-se mais rapidamente do que os óleos dos grupos II e III.

Os óleos dos grupos II e III são, ao contrário, inerentemente mais estáveis, com elevado teor de saturados e baixo conteúdo em enxofre, o que lhes permite resistir melhor à oxidação [1]. Têm no entanto baixo teor de compostos aromáticos, o que lhes prejudica a solvência dos aditivos anti-oxidantes, e assim dando origem, ao fim de determinado tempo de serviço, a uma súbita e acentuada degradação com resíduos insolúveis e conseqüente formação de lamas e vernizes [3].

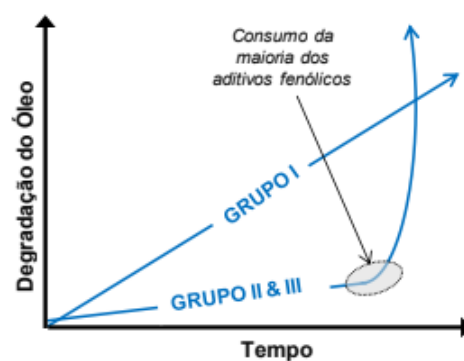


Figura 2.18: Tendências de degradação nos vários tipos de óleo base [3]

A Figura 2.18 ilustra estes efeitos, assim revelando a existência de uma maior dificuldade de monitorização periódica do âmbito da manutenção condicionada.

O índice de viscosidade marca a única diferença entre os grupos II e III, com o II a apresentar níveis convencionais de 80 a 120, e o III um pouco acima de 120 [2].

Os óleos de hidrocarboneto sintético do grupo IV (PAO) apresentam, em condições normais, características operacionais superiores a qualquer um dos outros tipos de base mineral, mas sendo de custo mais elevado.

2.4.4. Análises de Controlo de Condição em Turbinas a Vapor

O Controlo de Condição por Análise de Óleos em Serviço de turbinas a vapor permite prever a sua falha funcional, com enorme impacto positivo na rentabilidade de uma indústria produtora de energia. Efetua-se por meio de procedimentos laboratoriais normalizados que permitem recolher informação sobre o estado real da condição do óleo, e assim avaliar a tendência de variação de diversos parâmetros ao longo do tempo e, se necessário, tomada de ações corretivas.

No subcapítulo 2.3.4 abordou-se, de um modo geral, as análises mais comuns para monitorização dos óleos de lubrificação industriais. Agora, detalham-se as que, tendo em conta os mais comuns modos de falha nas turbinas a vapor, constituem o pacote de análises de óleo mais peculiar à manutenção condicionada desses equipamentos, com indicação, onde aplicável, do respetivo normativo.

Viscosidade Cinemática a 40°C ou 100°C

Já foi observado que a viscosidade é uma das propriedades mais importantes do lubrificante, com um papel fulcral na formação da película espessa hidrodinâmica entre as superfícies interatuantes dos órgãos lubrificados.

A norma ASTM D445 cobre a medição da viscosidade cinemática do óleo a 40°C ou 100°C para comparação com os valores dos respetivos óleos novos. Uma variação de $\pm 5\%$ em relação ao óleo novo, deve ser considerada como limite alarmante [37].

As análises de viscosidade de um óleo devem ser realizadas, no máximo, trimestralmente [2], sendo aconselhável análises mensais [37].

Número de Acidez / Total Acid Number (TAN)

O TAN, regulado pela norma ASTM D664, mede o nível de acidez do óleo, por titulação do mesmo com hidróxido de potássio e determinação da quantidade deste que é necessária para neutralizar os compostos ácidos naquele presentes. Normalmente, um aumento de acidez indica um aumento do nível de oxidação do óleo.

O resultado é reportado em miligramas de hidróxido de potássio por grama de óleo na amostra (mgKOH/g), valor que deve ser comparado com o do óleo novo. Nesse sentido, deve ser estabelecido como limite superior genérico um aumento de 0,1 a 0,2 mgKOH/g no intervalo de 20000 h de serviço. Para óleos em fim de vida útil, a norma ASTM D4378 especifica, para turbinas, um aumento de 0,3 a 0,4 mgKOH/g, nas mesmas condições [2].

O teste de acidez deve ser realizado, no máximo, trimestralmente, sendo aconselhável análises mensais. Contudo, dada a sua reconhecida baixa reprodutibilidade, o seu valor obtido é normalmente complementado com os valores medidos pelo teste RPVOT [37] (ver abaixo).

Teste de Oxidação em Vaso de Pressão Rotativo / Rotating Pressure Vessel

Oxidation Test (RPVOT)

No teste RPVOT – norma ASTM D2272 – utiliza-se um recipiente pressurizado com oxigênio para se avaliar e comparar a estabilidade à oxidação do óleo novo e em serviço, na presença de água e cobre (catalisador metálico) a 150°C. O teste é assim usado para se estimar a vida restante à oxidação do óleo, desde que ele é posto em serviço e sujeito a progressiva oxidação por presença de água, altas temperaturas, depleção de anti-oxidantes, e existência, no seu seio, de metais catalisadores em suspensão (geralmente, ferro e cobre) [2].

O valor do RPVOT é reportado em minutos, tempo correspondente a um decréscimo de pressão no vaso de 1,75 bar, devido ao consumo de oxigênio e conseqüente oxidação do óleo.

Os resultados do teste RPVOT complementam os obtidos pelo TAN. A norma ASTM D4378 estabelece, como alarme, um decréscimo em 25% do valor do óleo novo, acompanhado de um aumento do número de acidez.

Atente-se, contudo, que o valor do RPVOT é fortemente influenciado pelo tipo de anti-oxidantes do óleo, sabendo-se que, enquanto os de base de amina o influencia para cima (mais tempo de resistência à oxidação), os fenólicos têm tendência para o baixar [38].

Além disso, a presença de inibidores de corrosão no óleo prejudica a ação catalisadora da bobina de cobre utilizada no teste, dando assim indevida indicação otimista do seu resultado e falso melhor nível de anti-oxidação do lubrificante [38].

Estes fatores contribuem para uma baixa reprodutibilidade deste teste, chegando a não ser recomendado pela ASTM para os mais recentes tipos de formulação do óleo – Grupos II e III – indicando para estes o teste RULER, à frente considerado.

O teste RPVOT deve ser efetuado anualmente ou um mês antes de paragens programadas do equipamento [39]. Contudo, é recomendado o aumento de frequência do teste quando o óleo da turbina atinge 50% do valor inicial de RPVOT [2].

Água pelo método de Karl Fischer

Como se viu, a presença de água no óleo dá origem a uma variedade de problemas operacionais, quer para o óleo quer para a máquina lubrificada. Como tal, nas turbinas a vapor, em especial, o óleo deve ser sujeito a inspeção visual diária, no local, por forma a dela se inferir a quantidade de água nele presente. Uma aparência turva é indicativa de infiltração de água e necessidade de alguma ação de mitigação.

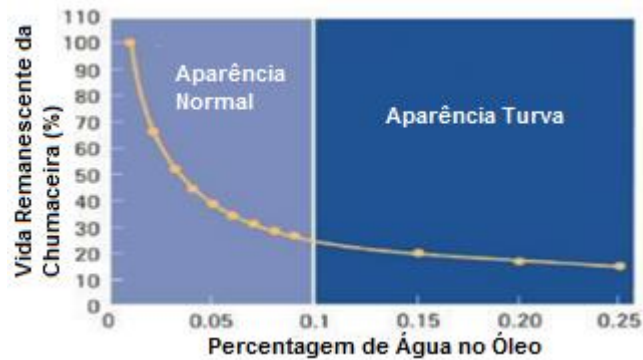


Figura 2.19: Influência da percentagem de água na vida útil de chumaceiras [2]

Em laboratório, a presença de água no óleo é quantificada por uma titulação de Karl Fischer – norma ASTM D6304 – com o seu resultado reportado em ppm. A norma ASTM D4378 identifica 1000 ppm de água como limite alarmante [37]. Não obstante, alguns utilizadores e fabricantes, optam por valores tão conservadores como 100 ppm, com a justificação de o ponto de saturação de água livre a 20°C ser de 100 ppm e de, só ao atingir-se esse teor, haver formação de água livre no sistema de óleo [39]. A análise pelo método de Karl Fischer, particularmente para turbinas a vapor, deverá ser realizada pelo menos trimestralmente [39].

Contagem de Partículas por Código ISO / Particle Count

Nesta análise faz-se contagem de partículas em suspensão no óleo de acordo com a norma ISO 4406, por simples leitura ótica (ao contrário da análise mais à frente referida por Ferrografia de Leitura Direta). A concentração de partículas é relacionada com uma escala de Código de Limpeza ISO caracterizada pela notação “número de partículas maiores que 4 µm / maiores que 6 µm / maiores que 14 µm” por ml de óleo [37]. Ver tabela da Figura 2.20.

Código	Número de Partículas por ml	
	Mais de	Até (Inclusive)
24	80,000	160,000
23	40,000	80,000
22	20,000	40,000
21	10,000	20,000
20	5,000	10,000
19	2,500	5,000
18	1,300	2,500
17	640	1,300
16	320	640
15	160	320
14	80	160
13	40	80
12	20	40
11	10	20
10	5	10
9	2,5	5
8	1,3	2,5
7	0,64	1,3
6	0,32	0,64
5	0,16	0,32
4	0,08	0,16
3	0,04	0,08
2	0,02	0,04
1	0,01	0,02
0	0,005	0,01
00	0,0025	0,005

Figura 2.20: ISO Cleanliness Code [37]

Exemplificando, um resultado reportado por 18/16/13 significa que, por ml de óleo, existem entre 1300 a 2500 (inclusive) partículas maiores que 4 µm, entre 320 a 640 (inclusive) partículas maiores que 6 µm e entre 40 a 80 (inclusive) partículas maiores que 14 µm.

Muitos fabricantes de turbinas aconselham o nível de limpeza ISO 18/16/13 para o óleo lubrificante, mas se o óleo for também utilizado como fluido de hidráulico deve cumprir com código de limpeza ISO 16/14/11 [39]. (Nota: alguns fabricantes ainda optam por reportar o código de limpeza antigo, onde não se considera a classificação de “partículas maiores que 4 µm”, como é o caso da Siemens AG, adiante tratado na secção 3.3.2 deste documento) [39].

A análise de partículas deve ser efetuada, no máximo, trimestralmente [39].

Colorimetria por Filtro de Membrana / Membrane Patch Colorimetry (MPC)

A análise MPC, coberta pela norma ASTM D7843, mede e monitoriza a acumulação de produtos insolúveis provenientes da degradação do óleo, que estão na origem da formação de vernizes.

No procedimento laboratorial sujeita-se a amostra de lubrificante a uma mistura química que isola e aglomera a matéria insolúvel naquela presente, passa-se a mesma por um filtro de membrana e, de acordo com a quantidade e cor do depósito nesta deixado – a “cor da mancha” – classifica-se e quantifica-se (ΔE) o potencial do óleo para a formação de vernizes. Ver Figura 2.21.

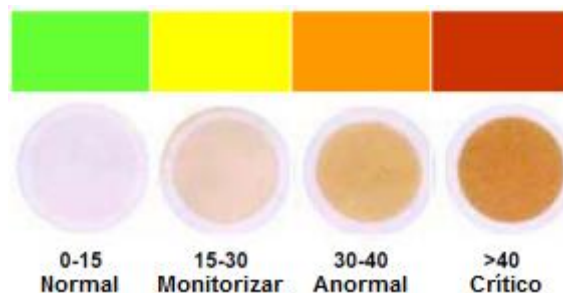


Figura 2.21: Escala MPC ΔE (adaptado de [39])

De notar que os testes de MPC podem ser influenciados por depósitos negros devidos a algumas formulações antioxidantes, o que exige, em certos casos, algum aprofundamento da análise [39].

A frequência da MPC depende da aplicação e seu potencial risco de formação de vernizes, podendo variar entre análises trimestrais a anuais.

Inibição de Corrosão

As partículas geradas por corrosão – maioritariamente, ferrugem – dos componentes lubrificadas, contribuem significativamente para o desgaste abrasivo, sendo que a aptidão do óleo lubrificante para prevenir este fator é sobretudo crucial em sistemas onde a infiltração de água seja uma ameaça. Além disso, agravando-se a situação com a usual rápida degradação dos aditivos inibidores de corrosão, é de extrema importância, especialmente em turbinas a vapor, testar-se a capacidade do óleo quanto a prevenção da corrosão.

A norma ASTM D665A propõe um teste laboratorial onde se adiciona água destilada ao óleo a ensaiar, mergulha-se um provete de aço na mistura, e deixa-se o potencial processo corrosivo a atuar a 60°C durante um dado intervalo de tempo (tipicamente, 4 horas). Se ao fim do processo for identificada ferrugem na superfície do provete, o óleo não passa no teste, considerando-se assim inaceitável quanto a inibição de corrosão [37].

As propriedades anti-corrosivas do óleo devem ser testadas anualmente em aplicações onde o óleo possa estar exposto a considerável humidade, ou mesmo a água livre [2].

Demulsibilidade / Separação de Água

Em turbinas a vapor, a contaminação do seu óleo lubrificante com água é uma ameaça real. Como tal, a capacidade que o óleo tem para se livrar da água – demulsibilidade – tem um impacto muito positivo na sua estabilidade à oxidação no longo prazo.

A norma ASTM D1401 propõem um teste à demulsibilidade do óleo, onde iguais volumes de 40 ml de óleo e de água destilada são misturados, e a mistura deixada em repouso [39]. O resultado é reportado no tempo (minutos) que os dois líquidos necessitam para se separarem totalmente. Quanto mais rápida for essa separação, melhor é a demulsibilidade do óleo.

Todavia, fatores como a vida em serviço do óleo e a presença de outros contaminantes, podem afetar negativamente os resultados do teste [37]. E, em certos casos, o seu resultado ser um falso negativo. Um óleo pode mostrar uma baixa demulsibilidade em laboratório, mas não o fazer em contexto real, de turbinas de grandes dimensões que permitam grandes tempos de quase repouso, com conseqüente maior taxa de separação da água, do óleo [39].

Ainda que não estabeleça um limite específico, a norma ASTM D4378 refere que devem ser consideradas alarmantes emulsões remanescentes de 15 ml, ou maiores, após 30 minutos [37]. Alguns fabricantes baixam o acima citado alarme da ASTM D4378, para 3 ml [39].

Sem prejuízo do que antecede, dever-se-ão realizar análises da demulsibilidade de um óleo lubrificante anualmente, se o sistema puder estar exposto à contaminação por água [2].

Tendência e Estabilidade de Espuma

A formação e presença de espuma no reservatório de um sistema de circulação é normal, devido a alguma agitação que possa sempre haver no escoamento do óleo. Contudo, uma formação excessiva de espuma prejudica não só a operação do equipamento como o desempenho da própria lubrificação.

A norma ASTM D892 propõe um procedimento experimental onde se determina a tendência para a formação e estabilidade da espuma no óleo, a diferentes temperaturas: a 24°C (Sequência I), a 93,5°C (Sequência II) e novamente a 24°C (Sequência III) [39].

A tendência é avaliada pelo volume de espuma medido após 5 minutos de um sopro de ar sobre a amostra de óleo, a fluxo constante. A estabilidade de espuma representa o volume medido após 10 minutos de repouso da amostra [2]. Os resultados do teste são reportados em mililitros (ml) de

tendência, e de estabilidade, para cada Sequência. A norma ASTM D4378 aconselha que uma tendência de 450 ml e uma estabilidade de 10 ml, na Sequência I, devem ser retidas como um limite alarmante [37]. Notar, contudo, que este teste tem uma reprodutibilidade muito baixa na medida da tendência, podendo variar bastante de laboratório para laboratório [39]. E sendo a contaminação do óleo a maior causa de formação de espuma, deve ser sempre complementada por uma análise de partículas e uma espectrometria elementar.

A tendência e formação de espuma devem ser apenas testadas quando a espuma representa um problema operacional para o óleo lubrificante do equipamento. Em turbinas a vapor, onde a espuma é uma inevitabilidade, esta análise deve ser conduzida anualmente [39].

Teste de Vida Remanescente por Antioxidantes (Voltametria de Varredura Linear / Remaining Useful Life Evaluation Routine (RULER))

Com o objetivo de monitorizar a reserva de antioxidantes do óleo e assim controlar a sua vida restante em serviço e tendência para a formação de vernizes, é recomendado o teste de Voltametria de Varredura Linear, ou RULER, estabelecido na norma ASTM D6971 para medir o conteúdo de antioxidantes, amínicos e fenólicos, sobretudo nos óleos dos Grupos II e III.

A sua lógica é a de que a concentração de aditivos fenólicos degrada-se mais rapidamente do que a dos amínicos e, ao degradar-se, provoca uma regeneração e estabilização do teor destes amínicos, o que permite estabelecer-se um critério de controlo do estado de resistência à oxidação do óleo, por avaliação de um diferencial de tensão elétrica entre o óleo novo e o óleo em serviço, como ilustrado na Figura 2.22 [39].

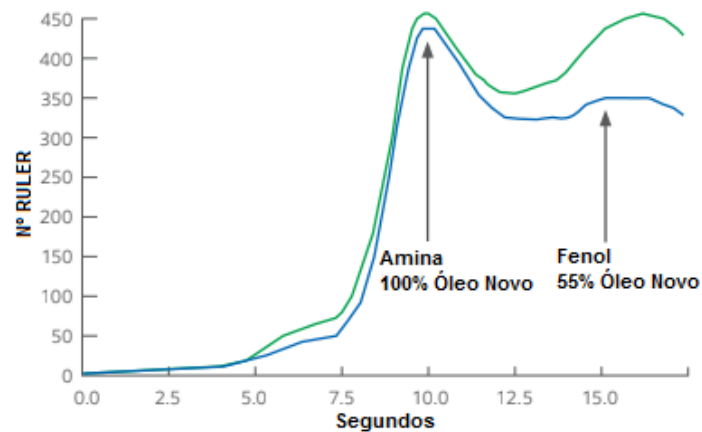


Figura 2.22: RULER – Exemplo de óleo novo (verde) versus óleo em serviço (azul) [39]

O limite de aceitação do teste é imposto quando a concentração dos restantes antioxidantes, tipicamente amínicos, atinge os 25% da concentração existente no óleo novo [39].

De notar, contudo, que o nível de concentração dos agentes fenólicos poderá entretanto atingir valores críticos em que o óleo pode ficar completamente desprotegido e suscetível à oxidação [3]. A frequência desta análise depende da aplicação, podendo ser conduzida trimestralmente ou mesmo anualmente.

Espectrometria de Infravermelho por Transformada de Fourier / Fourier Transform Infrared Spectrometric Analysis (FTIR)

A norma ASTM D7414 propõe a medição de múltiplas propriedades do óleo pela espectrometria FTIR, de absorção de energia no infravermelho a comprimentos de onda específicos, relativos a diferentes propriedades, contaminantes ou aditivos – ver Figura 2.23 [14]. Os resultados da análise são quantificados em abs/cm (absorvância/cm) [2].

O espectro de absorção do óleo em serviço é comparado com o do óleo novo, permitindo averiguar a presença, a nível molecular, não só de contaminantes como água ou glicol, mas também de aditivos e outros compostos resultantes da degradação e oxidação do óleo – ver Figura 2.24 [14].

Parâmetro	Comprim.Onda (cm ⁻¹)
Oxidação	Óleo Mineral - 1750
	Éster Orgânico - 3540
	Éster Fosfato - 815
Sulfatação	1150
Nitração	1630
Fuligem	2000
Água	Óleo Mineral - 3400
	Éster Orgânico - 3625
Glicol	880, 3400, 1040 e 1080
	Combustíveis
Aditivos Fenólicos	Gasolina - 750
	Jet Fuel - 795 - 815
	3650
Anti-Oxidantes/Anti-Desgaste	980

Figura 2.23: Comprimentos de Onda de Absorção [14]

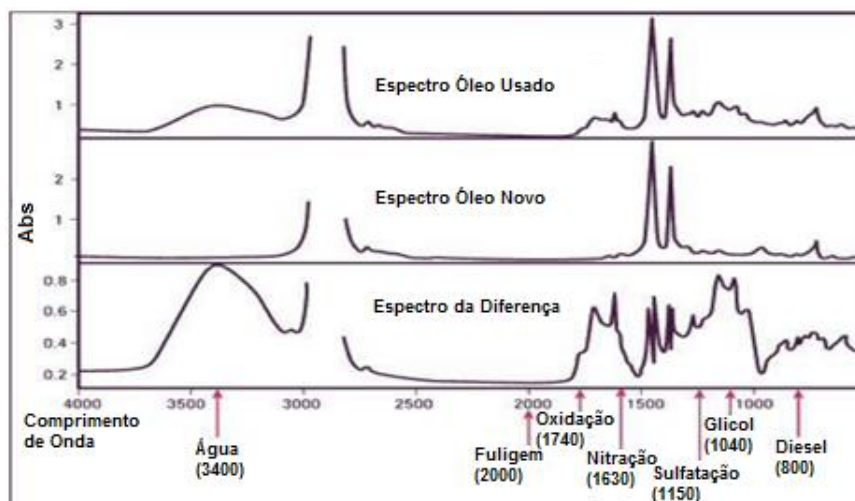


Figura 2.24: FTIR – Exemplo de Espectros de Absorção de um óleo mineral [2]

Tal como a Voltametria de Varredura Linear (RULER), a técnica FTIR é também muito utilizada para medir o conteúdo de anti-oxidantes presentes no óleo, mas apresentando, porém, certas limitações quando aplicada a óleos sintéticos [2].

Dependendo do equipamento e dos objetivos de monitorização, a análise FTIR pode ser conduzida mensal, trimestral, ou anualmente [39].

Libertação de Ar

A capacidade de um óleo para se libertar de bolhas de ar no seu interior, é uma propriedade crítica que se vai deteriorando desde que o óleo é posto em serviço, ou também devido à utilização excessiva de aditivos antiespuma, com silício.

Para óleos de turbina, a taxa de libertação de ar é uma propriedade que não varia muito com a vida em serviço, pelo que poderá não ter de ser testado para aferição do seu estado de condição [2]. Caso contrário, a norma ASTM D3427 estabelece um procedimento de teste adequado. Alguns fabricantes especificam tempos limite para a separação de ar, que podem variar de 4 minutos para óleos novos até 8/10 minutos para óleos já em uso [2].

Ferrografia Analítica

No âmbito da Análise de Óleos em Serviço, a Ferrografia refere-se em geral à análise de partículas metálicas, principalmente de origem ferrosa, devidas a desgastes e presentes no seio do óleo lubrificante, com uso de técnicas de análise de direta importância na manutenção condicionada, quer no modo preditivo de prevenção da falha funcional do equipamento, quer no modo proactivo de averiguação da raiz de falha e conseqüente especificação de melhoria.

As técnicas da Ferrografia poderão ser de Ferrografia de Leitura Direta ou de Ferrografia Analítica, a primeira basicamente de contagem de partículas, mas com métrica mais sofisticada do que a simples leitura ótica atrás referida por contagem de partículas Código ISO, e sendo normalmente aplicada em sequência desta, se o seu simples resultado assim o sugerir.

A Ferrografia Analítica é já uma técnica qualitativa efetuada em caso de justificada suspeição de falha previsível, que permitirá compreender os mecanismos de desgaste existentes num equipamento, e denunciados pela morfologia das partículas por eles produzidos [3].

Nesta análise, as partículas de desgaste presentes numa amostra de óleo, em escoamento criado para o efeito, são dele removidas e aprisionadas por um campo magnético numa lamela de vidro, obtendo-se assim um ferrograma com as partículas aderidas à lamela organizadas por tamanhos, para posterior análise ótica por um ferrosκόpio (um microscópio bicromático). As partículas ferrosas de maiores dimensões fixam-se na “zona de entrada” do ferrograma, seguindo-se-lhe sequencialmente as partículas ferromagnéticas de menores dimensões, acompanhadas de partículas não ferrosas, arrastadas e agregadas às primeiras, aleatoriamente distribuídas [40]. A desejada análise microscópica permitirá classificar as partículas por tamanho (normalmente, de dimensões acima de uns poucos micrómetros), forma, cor, textura, concentração e metalurgia [3], assim fornecendo informação sobre a natureza e severidade dos mecanismos de desgaste e possíveis modos de falha presentes.

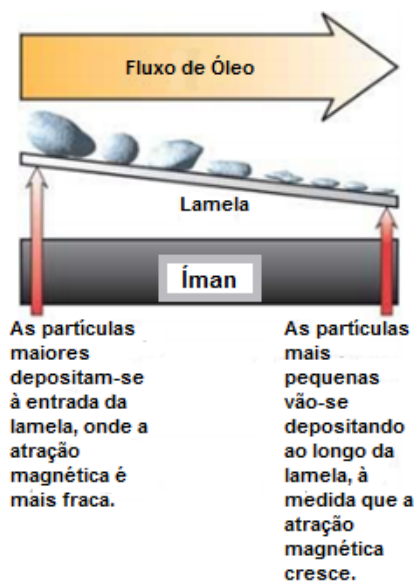


Figura 2.25: Ferrografia Analítica – Ilustração de Deposição de Partículas [40]

Espectrometria Elementar de Emissão Atômica / Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP)

A Espectrometria Elementar de Emissão Atômica, ICP, conduzida segundo a norma ASTM D5185, permite quantificar o conteúdo de vários elementos químicos presentes no óleo, assim podendo fornecer alarmes sobre novas condições de desgaste, e de presença de contaminantes no sistema.

Não obstante tratar-se de uma técnica limitada à deteção de partículas metálicas menores que uns 8 μm , ela é bastante vantajosa na pesquisa de causas de desgaste, na medida em que muitas falhas catastróficas começam tipicamente a um nível micrométrico [39]. Contudo, tal torna-a desvantajosa na deteção de partículas maiores, pelo que aí já é de recorrer à Ferrografia.

Não existem limites normalizados para a concentração de elementos químicos específicos, pelo que o controlo de condição por este método passa pelo acompanhamento da tendência da concentração desses elementos ao longo do tempo. Todavia, um aumento entre amostras de 4 ppm ou maior, ou valores excedendo os 10 ppm na maioria dos elementos metálicos, deverão ser considerados anormais [2]. Elementos provenientes de contaminantes exteriores, como o silício, devem ser mantidos abaixo dos 25 ppm [39].

A Espectrometria Elementar deve ser conduzida mensalmente ou trimestralmente, dependendo da aplicação. No Anexo A é apresentada uma lista dos principais elementos alvo deste tipo de análise e respetivas origens.

3. Caso de Estudo

Depois de terem sido abordadas as bases teóricas de Manutenção, Tribologia e Análise de Óleos em Serviço, consideradas mais relevantes para apoio ao presente caso de estudo, é agora neste capítulo efetuada a apresentação do mesmo. Inicialmente apresenta-se a organização e respetivo complexo industrial, que colaboraram com o presente trabalho. Posteriormente, caracteriza-se, detalhadamente, a turbina a vapor estudada e o respetivo óleo em serviço. Finalmente, para além de ser apresentada a estratégia de inspeções no equipamento definida pelo fabricante, é também elaborado um tratamento cuidado dos dados relativos a análises feitas ao óleo em serviço nos últimos 5 anos.

3.1. A Empresa e Complexo Industrial

A *The Navigator Company* é a nova marca herdeira do património e negócio do ex-grupo Portucel Soporcel. Em Portugal, tem sob a sua gestão uma vasta área florestal certificada, dispondo de uma capacidade instalada para a produção de 1,6 milhões de toneladas de papel e 1,4 milhões de toneladas de pasta de papel. Assegura também a produção de 2,5 TWh/ano de energia elétrica, estando a sua estrutura produtiva dividida em quatro grandes pólos industriais: Setúbal, Figueira da Foz, Cacia e Vila Velha de Ródão [41].

No panorama internacional, a empresa é líder europeu e quarta a nível mundial, na produção de papéis finos de impressão e escrita, não revestidos, sendo também a maior produtora europeia de pasta branqueada de eucalipto. A nível nacional, o negócio da empresa representa aproximadamente 1% do PIB Português e cerca de 3% das exportações nacionais, sendo a terceira maior exportadora nacional [41].

No âmbito do presente trabalho, faz sentido detalhar-se o relevante papel da *The Navigator Company* no setor nacional das energias renováveis, sendo o primeiro e maior produtor nacional de energia verde a partir da biomassa (cerca de 50% da energia produzida a partir da biomassa em Portugal).

Nesse sentido, o Complexo Industrial da Figueira da Foz (CIFF), onde foi desenvolvido o presente trabalho, constitui desde 1991, uma unidade de produção integrada do grupo, sendo responsável pela produção de 790 000 toneladas de papel e 570 000 toneladas de pasta. Aí estão estabelecidas uma central de cogeração a biomassa associada à fábrica de pasta (*Navigator Pulp Figueira*) e uma central de cogeração a gás natural de ciclo combinado, de suporte energético à fábrica de papel (*Navigator Paper Figueira*), ambas assegurando a produção e as necessidades de energia térmica e elétrica no complexo.

A central de cogeração a biomassa instalada na fábrica de pasta é constituída por três caldeiras, integrando ainda quatro grupos turbogeradores [41][42]:

- Caldeira de recuperação – gera vapor a 92 bar, pela queima de licor negro como combustível, tendo uma potência térmica de 350 MW;

- Caldeira auxiliar a biomassa – reforça a produção de vapor (62 bar) na fábrica de pasta, aproveitando a queima de materiais provenientes da preparação de madeiras. Tem uma potência térmica de cerca 89 MW;
- Caldeira a gás natural – gera vapor a 62 bar, funcionando como reforço em cenários de pico de produção e com uma potência térmica de 98 MW;
- Turbogenerador TG1 com potência de 16 MW, ligado à rede de vapor de 62 bar, estando de reserva;
- Turbogenerador TG2 com potência de 16 MW, ligado à rede de vapor de 62 bar, estando de reserva;
- Turbogenerador TG3 com potência de 25 MW, ligado à rede de 62 bar;
- Turbogenerador TG4 - o qual está no foco do presente trabalho - com potência de 70 MW, ligado à rede de alta pressão de 92 bar;

A central de cogeração de ciclo combinado a gás natural, instalada em Julho de 2000, fornece vapor à fábrica de papel. Integra duas turbinas a gás e respectivas caldeiras de recuperação, e uma turbina a vapor com uma potência elétrica de 67 MW, estando os turbogeneradores em regime de funcionamento alternado desde Novembro de 2015.

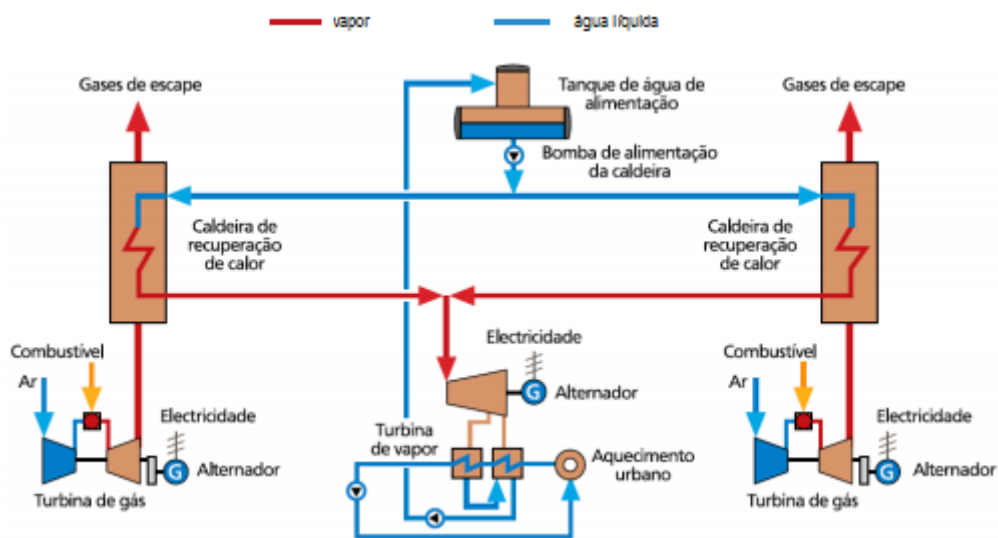


Figura 3.1: Esquema de um sistema de cogeração de ciclo combinado, semelhante ao presente no CIFF [43]

3.2. Equipamento em Estudo

Nesta secção são detalhadas as características técnicas e operacionais do equipamento em estudo. Faz-se uma sinopse geral da turbina do turbogerador TG4, descrevendo de seguida alguns componentes e sistemas de maior relevância, como as chumaceiras, o rotor, o sistema de lubrificação e alguns elementos de purificação do óleo que lubrifica os órgãos descritos. Posteriormente apresentam-se as propriedades físico-químicas e outros parâmetros operacionais do referido óleo. Conclui-se com a exposição da estratégia implementada para as inspeções do equipamento, recomendada pelo fabricante.

3.2.1. Turbina Siemens SST-800

A turbina considerada nesta dissertação é uma turbina a vapor Siemens modelo SST-800 (Figura 3.2) com extração de vapor por sub-tiragens intermédias e finais a pressões inferiores à pressão atmosférica, para maximização do seu rendimento, fabricada pela multinacional alemã, *Siemens Power Generation*, de aplicação muito comum não só em centrais energéticas de indústrias do papel, como também na petroquímica, cimento, ou outra indústria pesada.

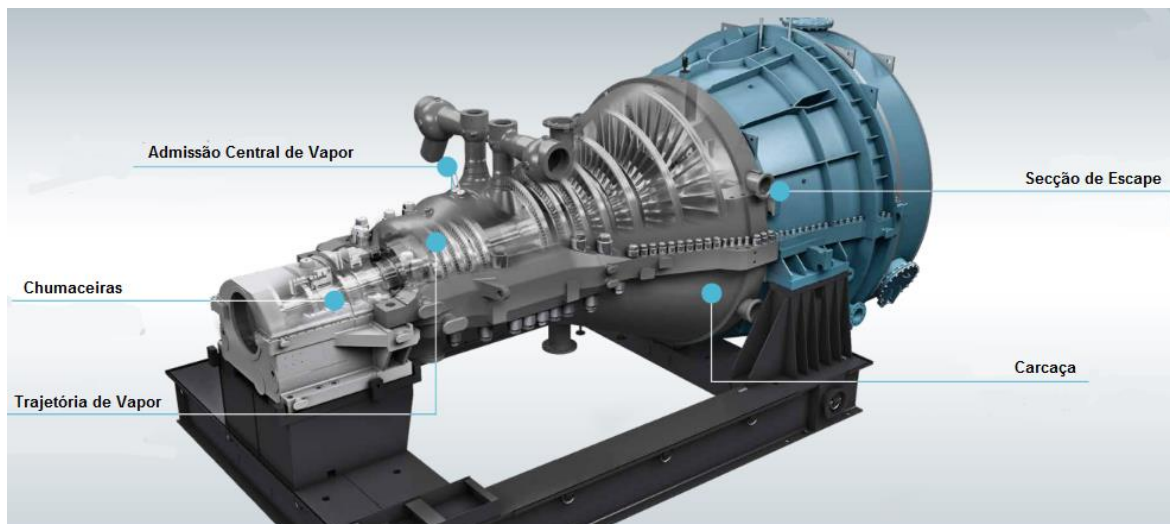


Figura 3.2: Turbina Siemens SST-800 [44]

No CIFF (Figura 3.3), a turbina em causa é uma componente de um dos grupos turbogeradores (TG4), juntamente com o gerador elétrico, o sistema de condensação e outros equipamentos de instrumentação e controlo, nomeadamente dispositivos de monitorização, limitação e proteção, com o objetivo de evitar e tornar reconhecíveis todos os estados de operação não permitidos ou pouco rentáveis para a turbina.



Figura 3.3: Instalação do grupo turbogerador TG4, no CIFF [45]

No âmbito do presente trabalho, e tendo em consideração que se quer estudar e analisar o desempenho do óleo lubrificante nos seus pares tribológicos mais representativos – as chumaceiras – o sistema de óleo de lubrificação e a unidade de acondicionamento (purificação) do óleo, merecerão uma descrição mais detalhada. É de referir que neste tipo de equipamentos, os sistemas óleo-hidráulicos de alta pressão (óleo de comando) são igualmente relevantes mas não estão, contudo, no foco desta dissertação.

São, em seguida, apresentadas as características técnicas da turbina, e principais particularidades do rotor, das chumaceiras e do sistema de lubrificação respetivo [46]:

Turbina SST-800

Tipo de Turbina: SST 800 (ENK71/91)

Ano de Fabrico: 2010

Peso total: 143 336 kg

Máquina Accionada: Gerador

Potência de Projecto: 67 873 kW

Potência Máxima: 71 377 kW

Velocidade máxima em serviço contínuo: 3000 rpm

Velocidade mínima em operação de rotação lenta: 40 rpm

Pressão do vapor principal de alimentação: 92 bar

Temperatura do vapor principal de alimentação: 488 °C

Temperatura normal do vapor de escape: 31 °C

Peso do Rotor: 25 190 kg

Classe de viscosidade do óleo requerido: ISO VG 46

Caudal de óleo nas chumaceiras axiais: 9,1 m³/h

Caudal de óleo nas chumaceiras radiais (posterior): 5,2 m³/h

Caudal de óleo nas chumaceiras radiais (anterior): 9,9 m³/h

Capacidade do reservatório de óleo lubrificante: 8 500 litros

Débito da bomba de óleo principal: 102 m³/h

Débito da bomba de óleo auxiliar: 102 m³/h

Débito da bomba de óleo de emergência: 23 m³/h

Rotor

O Rotor da turbina – veio e seu conjunto de discos e pás (Figura 3.4) – constitui o grupo mais importante da turbina a vapor, pois assegura a sua função principal: a conversão de energia térmica do vapor em energia mecânica, sob a forma de movimento angular, de rotação, e desta a sua reconversão em energia elétrica, na máquina acionada do sistema – o gerador elétrico.

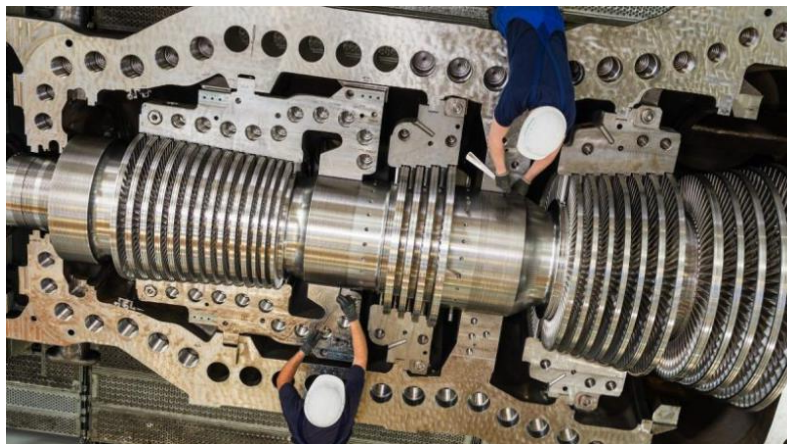


Figura 3.4: Rotor de uma Turbina SST-800, igual à presente no CIFF [47]

O Rotor perfila-se como a “espinha-dorsal” da turbina, sendo imperativo garantir-se a máxima disponibilidade deste componente e respetivos apoios, estes materializados por chumaceiras de escorregamento devidamente lubrificadas e a operação do conjunto sempre devidamente monitorizada quanto a algum empeno, desalinhamento ou desgaste prematuro.

O veio do rotor (possivelmente de um aço de alta liga, cromo-níquel-molibdénio, inoxidável, por se tratar de operação em ambiente aquoso, mas sem confirmação do fabricante), está apoiado sobre duas chumaceiras de escorregamento radiais, lubrificadas a óleo sob pressão. No apoio convencional ser o anterior – o do lado da alta-pressão, ver Figura 3.5 – existe, além da chumaceira radial, uma chumaceira de escorregamento axial para garantir a devida fixação axial do rotor.

Na extremidade posterior do veio encontra-se a flange da união elástica de acoplamento ao gerador.

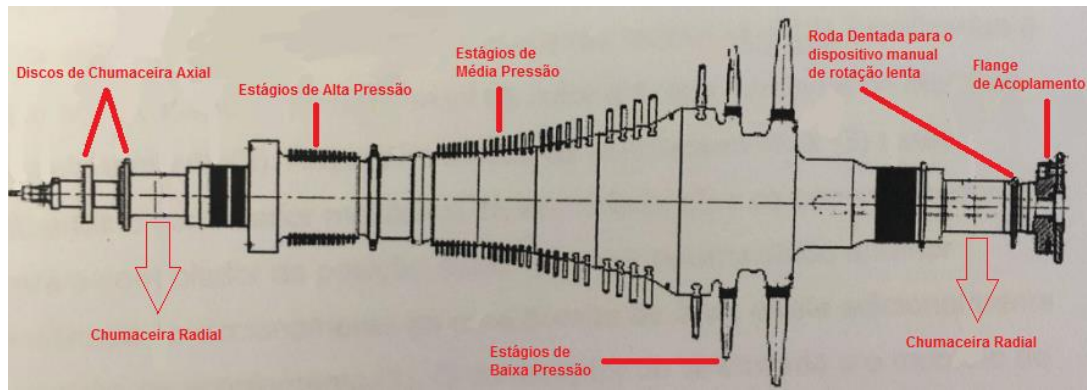


Figura 3.5: Vista em corte axial do rotor da turbina SST-800 [46]

Chumaceiras

Como atrás referido, o rotor da turbina é suportado por dois apoios: um de simples constrangimento radial e outro de constrangimento radial e axial. Qualquer um dos apoios é acessível em independência um do outro, permitindo uma manutenção mais rápida e eficaz.

O apoio anterior é composto por uma chumaceira axial e uma chumaceira radial, ambas de escorregamento. Ver Figura 3.6.

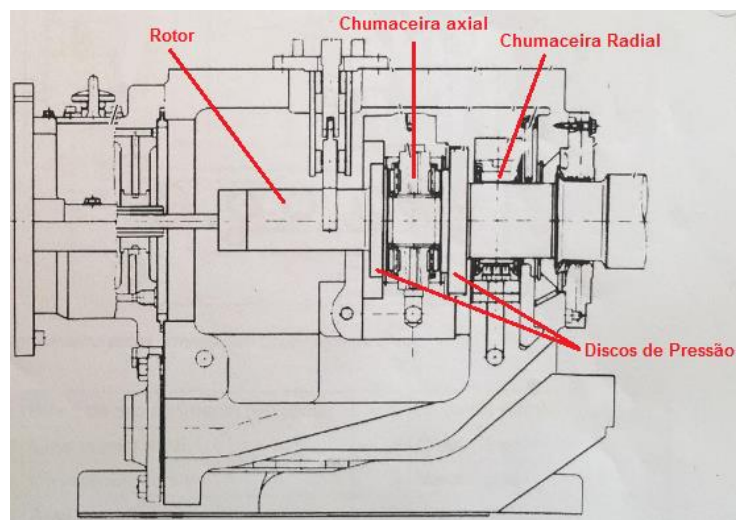


Figura 3.6: Vista em corte no plano vertical do Apoio Anterior do Rotor [46]

No apoio anterior, a chumaceira axial é bidirecional. Encontra-se intercalada entre dois discos de pressão do veio do rotor e contém dois anéis de segmentos oscilantes, iguais e simétricos, por forma a absorver impulsos axiais de ambos os sentidos. A sua lubrificação desta chumaceira é efetuada com óleo sob pressão, proveniente do sistema de óleo de lubrificação da turbina, através de pequenos orifícios, por onde o óleo é conduzido para o interior da chumaceira, lubrificando hidrodinamicamente os pares segmentos - disco, tipo de lubrificação que é facultado pela possibilidade de oscilação dos segmentos (Figura 3.7).

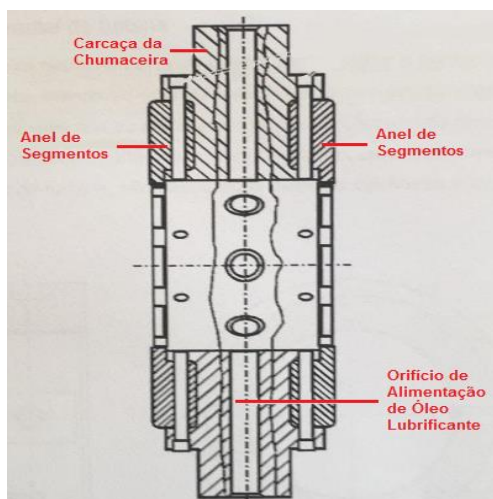


Figura 3.7: Alimentação de óleo lubrificante à Chumaceira Axial do Apoio Posterior [46]

As chumaceiras radiais, presentes em ambos os apoios – anterior e posterior – garantem a necessidade de bi-apoio do rotor quanto a carga radial.

São do tipo de semi-casquilhos, de aço mas com as superfícies de escorregamento revestidas de metal branco fundido, por forma a oferecerem a menor resistência ao movimento de escorregamento nos regimes de lubrificação não hidrodinâmica (Figura 3.8).

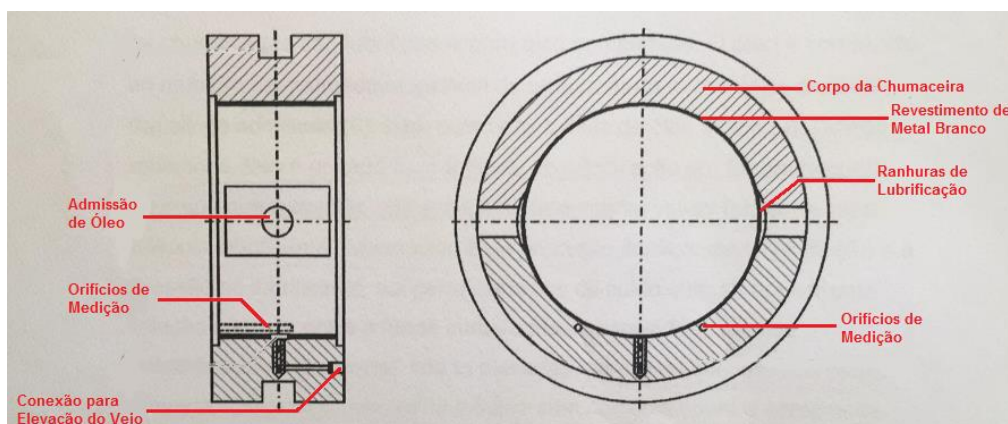


Figura 3.8: Alimentação de óleo lubrificante às Chumaceiras Radiais da Turbina SST-800 [46]

O óleo lubrificante entra nestas chumaceiras nas zonas de encosto dos dois semi-casquilhos, percorrendo a interface moente - casquilho em escoamento hidrodinâmico facilitado pelas elevadas velocidades de rotação do veio em serviço, assim impedindo o contato direto, intermetálico, do par cinemático em questão.

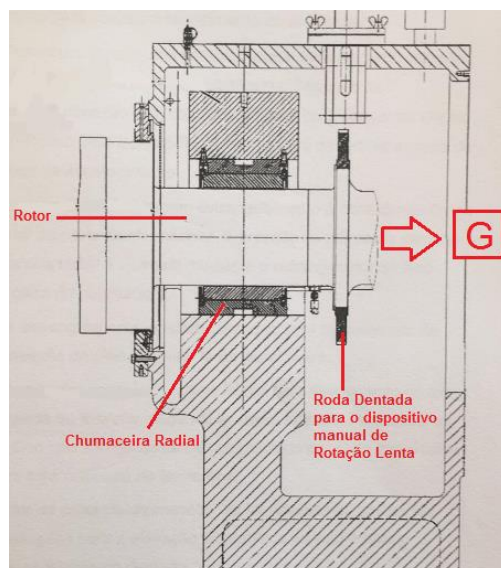


Figura 3.9: Vista de conjunto do apoio posterior do Rotor da Turbina [46]

Nas fases de arranque e paragem da turbina, quando a velocidade do rotor é baixa ou nula, a separação moente-casquilho é efetuada por circuito óleo-hidráulico independente, de lubrificação hidrostática – sistema de elevação – como visto na secção 2.4.1 deste documento.

Para garantir a segurança da operação da turbina, é relevante o controlo e monitorização da temperatura nas chumaceiras. Nesta turbina SST-800, as chumaceiras estão dotadas de dispositivos de medição de temperatura (da interface da chumaceira e do óleo lubrificante) emitindo avisos no caso de aumentos anormais. Estes aumentos de temperatura e consequente danificação das chumaceiras podem ocorrer de modo súbito e por um curto período de tempo, pelo que é fundamental complementar estas medições com análises efetuadas ao óleo em serviço, pois um valor atual normal, de temperatura, não significa que já não tenham ocorrido aumentos consideráveis que tenham danificado as chumaceiras.

A temperatura do óleo à entrada das chumaceiras está normalmente entre os 45°C e os 50°C, só por vezes atingindo um máximo, em casos especiais, de 60°C. Mas com o calor gerado por atrito à velocidade nominal, e com o rotor aquecido pelo vapor, as temperaturas do óleo no interior das chumaceiras podem aumentar em cerca de 20°C.

Não obstante, o controlo e inspeção das chumaceiras deve ser geralmente efectuado sempre que a temperatura do metal branco ultrapasse em 15 a 20°C o valor mais alto medido anteriormente.

Sistema de Óleo de Lubrificação

O fornecimento normal de óleo sob pressão às chumaceiras é assegurado pela bomba principal de óleo do sistema de lubrificação. A bomba é acionada pelo veio do rotor, sendo a lubrificação do seu veio e rolamentos assegurada pelo próprio óleo que bombeia.

Ainda que a lubrificação das chumaceiras seja suficientemente mantida via bomba principal, é contudo, garantida a máxima disponibilidade do equipamento por meio de uma bomba auxiliar,

elétrica trifásica, redundante, que, em caso de falha da bomba principal, ou quando a pressão de óleo no sistema caia de 25%, entra em serviço, permanecendo em paralelo ativo com a bomba principal. Se ambas as bombas anteriores falharem, recorre-se ainda a uma segunda redundância, com uma bomba de óleo de emergência, acionada por um motor elétrico de corrente contínua. Por ser de menor dimensão que as anteriores, esta última bomba assegurará, exclusivamente, a lubrificação direta das chumaceiras, mas sem recurso à filtração e nem ao arrefecimento do óleo.

Salienta-se ainda a existência de uma outra bomba de óleo, dita de elevação do rotor, que proporciona uma adequada lubrificação hidrostática nos arranques e paragens da turbina, do modo e para o efeito como já anteriormente referido (ver secção 2.4.1).

A bomba principal de óleo (NSSV 65-250), a bomba auxiliar (NSSV 50-200) e a bomba de emergência (NSSV 50-200) são todas centrífugas, de caudal variável, do fabricante alemão - Allweiler.

Antes de chegar às chumaceiras, o óleo passa pelos arrefecedores e por um filtro, vindo sempre do reservatório de óleo, que contém o óleo necessário para todo o abastecimento. Este reservatório de óleo é uma estrutura soldada de 8500 litros de capacidade, que aloja o óleo necessário ao sistema de lubrificação da turbina, e construído de modo a que o óleo de retorno se possa estabilizar e libertar do ar acumulado durante a circulação, bem como a facultar a separação das partículas contaminantes e lamas provenientes da sua oxidação. Aliado a isso, o fundo do reservatório é inclinado para escoamento e deposição das lamas e contaminantes, facilitando assim a sua posterior remoção do sistema.

As bombas trabalham em submersão no óleo do reservatório, com a aspiração situada a um nível nem muito próximo da superfície livre, nem muito próximo do fundo, para minimização da inclusão quer de bolhas de ar quer de produtos contaminantes, no óleo bombeado.

O reservatório de óleo está ainda equipado com aquecedores e separadores de névoa. Os aquecedores mantêm a temperatura do óleo entre os 60 e 65 °C, sendo acionados automaticamente quando o óleo arrefece abaixo dos 35 °C. Montado sobre a placa de cobertura do reservatório, está instalado um separador de névoa (FF2-099), do fabricante alemão Franke GmbH, que remove a humidade existente no seu interior.

No sistema de lubrificação pode ainda considerar-se a existência de dispositivos de purificação do óleo, que podem ser utilizados isoladamente ou em conjunto. Destes, destacam-se os filtros duplos de malha fina, em paralelo *standby*, com comutação manual em caso de indicação de colmatagem. Tal aumenta a disponibilidade da função de filtração, pois no caso de perturbação num elemento de filtro, a filtração é comutada para o segundo elemento de filtração. Os filtros são fornecidos pelo fabricante alemão, Boll & Kirch Filterbau GmbH, podendo os cartuchos filtrantes, de malha fina de 3 µm, serem desmontados e limpos sem necessidade de serem removidos do equipamento.

As pressões do óleo no circuito de lubrificação oscilam entre 2,5 e 2,9 bar, e as suas temperaturas, já depois de refrigerado, devem situar-se entre 42 e 45°C.

Na Figura 3.10, é apresentado um esquema geral, simplificado, do sistema de circulação de óleo lubrificante, da turbina a vapor SST-800. É importante referir-se que existe apenas um ponto de amostragem no sistema, localizado na linha de retorno, como se representa na Figura 3.10. Tal anotação vai servir de base a uma das sugestões de melhoria apresentadas na secção 3.4 neste documento.

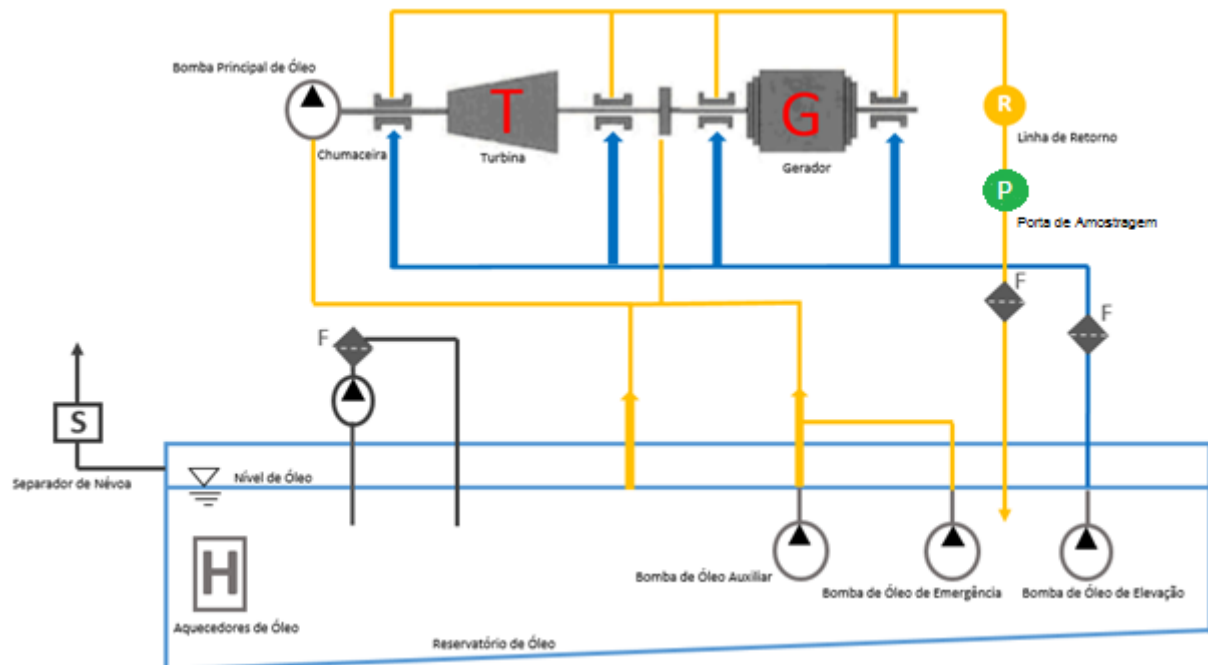


Figura 3.10: Esquema geral, simplificado do Sistema de Circulação de Óleo Lubrificante do Turbogenerador TG4

3.2.2. Óleo Analisado

Um óleo lubrificante destinado à lubrificação e contenção da temperatura das chumaceiras e de outros órgãos de maquinaria em geral, nomeadamente um óleo de turbinas a vapor, deve possuir boas propriedades de: resistência ao envelhecimento, facultade de inibição de corrosão, estabilidade antioxidante, e boa capacidade de libertação da água. Em óleos de turbina onde também se lubrifiquem engrenagens, a utilização de aditivos EP/AW torna-se de extrema importância, por forma a reduzir o desgaste e, mesmo, prevenir a gripagem de componentes. A utilização de óleos para turbinas com caixa redutora também se aplica em turbinas sem caixa redutora.

A Siemens AG, como fabricante original do equipamento analisado, requer que o óleo lubrificante da turbina SST-800 cumpra os pontos específicos apresentados abaixo (entre outros mais generalistas para óleos de turbina, anteriormente referidos) [46]:

- o óleo não deve conter substâncias ativas compostas por elementos organometálicos, como o Ditiófosfato de Zinco ou o Enxofre ativo, pois podem produzir efeitos agressivos sobre o cobre presente em alguns dos órgãos do equipamento;
- o óleo deve resistir até uma temperatura máxima de 120°C nos componentes da máquina e até 80°C no trânsito pelo reservatório, sem que ocorram alterações significativas das suas propriedades;

- o óleo deve ser miscível com volumes residuais (no máximo 4% do volume) de um outro óleo de turbina de base igual, sem que ocorram alterações significativas nas suas propriedades;

- o óleo deve pertencer às classes de viscosidade ISO VG 32 ou ISO VG 46, sendo possível o uso de óleo ISO VG 68 em casos de instalações antigas com engrenagens, com consulta prévia ao fabricante;

Nesse sentido, e no âmbito da lista de óleos aprovados pela Siemens AG para a lubrificação de turbinas [48], na turbina SST-800 do CIFF, é aplicado o óleo mineral Castrol Perfecto X46 (do grupo II) fornecido pela BP Portugal - Comércio de Combustíveis e Lubrificantes, S. A. No Anexo B, são apresentadas as suas propriedades mais relevantes [49].

3.2.3. Estratégia de Inspeções com base no tempo

Inspeções e revisões gerais realizadas no momento certo são, comprovadamente, importantes para garantir a segurança e fiabilidade da turbina. Para além de ser feita a monitorização do equipamento através de análises ao óleo em serviço e outras técnicas de manutenção condicionada (com base na condição), a Siemens AG, como fabricante original da turbina SST-800 também aconselha a realização de inspeções de manutenção preventiva sistemática (com base no tempo) nesse equipamento.

Podem-se assim definir os seguintes três tipos de inspeções e revisões gerais com base no tempo [46]:

- **Inspeção Breve (Secundária)** – Consiste numa inspeção pelo exterior do equipamento, com inspeção visual geral e verificações limitadas ao controlo dos órgãos periféricos da turbina, e algumas tarefas pontuais tais como verificação de dispositivos de proteção, verificação do acoplamento ao gerador e calibração de instrumentos em operação.

Em alguns casos, uma avaria num outro equipamento no complexo industrial poderá proporcionar a execução de uma inspeção breve da turbina.

- **Inspeção Intermédia (Média)** – É uma inspeção de “médio alcance”: um tipo de inspeção que contém o programa da inspeção secundária, mas com um maior leque de verificações do equipamento e adicionais tarefas individuais sobre o mesmo.

- **Revisão Principal (Principal)** – Tem o carácter de uma revisão geral: todas as secções da turbina são abertas, todos os seus componentes analisados detalhadamente, é registado o estado de todos os itens e é efetuada a substituição de todos aqueles que apresentem desgaste ou outro tipo de danificação.

Quanto à periodicidade de execução, a Siemens AG determina como base, até às primeiras 150 000 horas de serviço (operacionais) da turbina, os seguintes três ciclos de intervalos de manutenção, com a sucinta definição de cada ciclo [46]:

- Inspeção Breve – a cada 6 500 a 7 500 horas desde turbina nova ou desde a última Inspeção Breve, ou Inspeção Intermédia, ou Revisão Principal;
- Inspeção Intermédia – a cada 25 000 horas desde turbina nova ou última Inspeção Intermédia, ou Revisão Principal;
- Revisão Principal – às 50 000 horas desde turbina nova ou última Inspeção Principal

A partir das 150 000 horas de serviço é expectável que a turbina comece a atingir o seu fim de vida operacional, pelo que, dependendo do histórico das anteriores inspeções programadas e de trabalhos de manutenção corretiva eventualmente efetuados, resultará da sua avaliação técnica a eventual necessidade de especificação de menores intervalos de intervenção preventiva.

A Figura 3.11 dá uma ilustração gráfica da programação de base da manutenção preventiva sistemática da turbina.

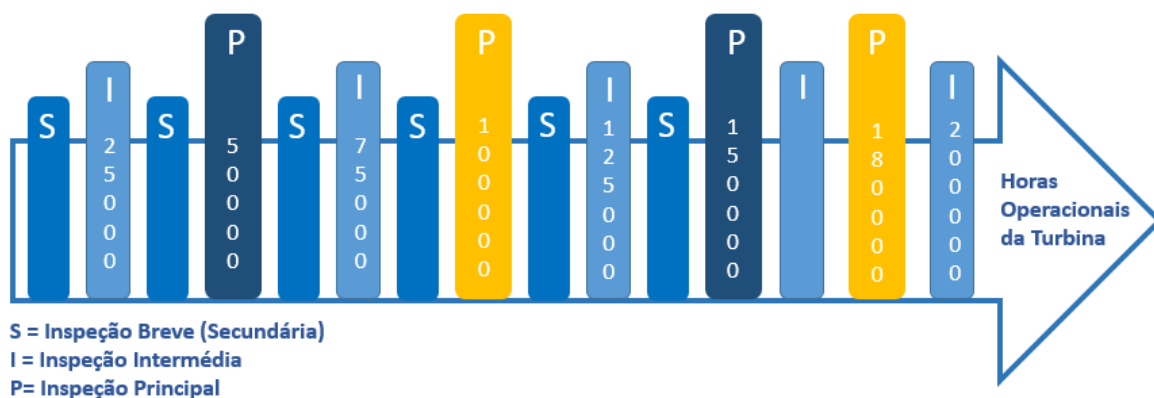


Figura 3.11: Programa de Inspeção com base nas Horas Operacionais da Turbina

3.3. Tratamento de Dados

Neste subcapítulo faz-se uma análise dos dados provenientes dos testes de análise de condição efetuados entre 2015 e 2020 ao óleo Castrol Perfecto X46 (classe ISO VG 46) usado no sistema de lubrificação da turbina SST-800 do CIFF.

Este tratamento de dados dos vários parâmetros comportamentais do óleo em serviço serve para pôr em relevo a importância que a monitorização do óleo tem no alongamento da vida de serviço do equipamento, permitindo a deteção oportuna de potenciais causas de falha – manutenção condicionada – e, por outro lado, na consequente oportunidade para eventuais tomadas de ações de melhoria no óleo ou nos componentes lubrificados – manutenção proactiva – objetivando o aumento da disponibilidade do equipamento e obtenção de importante vantagem económica disso decorrente.

Os dados foram facultados pela *The Navigator Company*, sendo que os testes foram realizados pela empresa fornecedora desse serviço, a BP Portugal - Comércio de Combustíveis e Lubrificantes, S. A., através de um laboratório operado pela mesma em Gent, na Bélgica, e de outro laboratório comercial situado em Espanha.

Para a monitorização do estado do óleo e do equipamento, os citados laboratórios executam uma diversidade de análises. Contudo, e tendo em conta a Revisão Bibliográfica efetuada no início do presente documento, apenas se consideram as frequências e resultados das análises típicas de aplicações de turbinas a vapor.

3.3.1.Frequência de Amostragem

Das análises típicas para controlo de condição em turbinas a vapor, anteriormente anunciadas, são dez as análises efetuadas pelos citados laboratórios, tipificadas para óleos desse tipo de máquina, e fazendo sentido a sua divisão em três grupos:

- as Análises de Baixa Periodicidade, realizadas com maior frequência e que avaliam os parâmetros básicos do estado de condição do óleo e sua eventual contaminação;
- as Análises de Média Periodicidade, realizadas com intervalos de tempo mais espaçados e onde se avaliam parâmetros de pesquisa mais aprofundada do eventual agravamento operacional do óleo, ou de possível falha mecânica de algum órgão do equipamento lubrificado;
- as Análises Especiais, realizadas conforme a necessidade, apenas quando o resultado de algum parâmetro avaliado se possa afigurar como premonitório de algum problema operacional para o equipamento;

Nesse sentido, é apresentada na Tabela 3.1 a divisão das várias análises realizadas ao óleo Castrol Perfecto X46 que lubrifica as chumaceiras da turbina SST-800 do CIFF.

Análises de Baixa Periodicidade	Análises de Média Periodicidade	Análises realizadas conforme a necessidade
<ul style="list-style-type: none"> • Viscosidade Cinemática a 40 °C • Conteúdo de Água pelo Método de Karl Fischer • Número de Acidez (TAN) • Espectrometria Elementar (ICP), só metais de desgaste • Código de Limpeza ISO (Análise de Partículas) • <i>Fourier Transform Infrared Spectrometric</i> (FTIR – Oxidação) 	<ul style="list-style-type: none"> • Colorimetria por Filtro de Membrana (MPC) • Voltametria de Varredura Linear (RULER) • Ferrografia Analítica • Espectrometria Elementar (ICP), completa 	<ul style="list-style-type: none"> • Tendência e Estabilidade de Espuma (Sequência I)

Tabela 3.1 – Divisão dos vários tipos de análises realizadas

Relativamente à Espectrometria Elementar (Espectrometria de Emissão Atômica, ICP) é de notar a seguinte subdivisão: a Espectrometria realizada pelo laboratório comercial em Espanha e a Espectrometria realizada pelo laboratório do fornecedor do óleo, na Bélgica. Na primeira, apenas se averigua quanto a presença de elementos metálicos no óleo, possivelmente provenientes de desgaste. Na segunda faz-se uma avaliação mais profunda quer quanto à presença de elementos metálicos no óleo, quer quanto à presença de outros elementos, provenientes de contaminação externa ou da utilização e consumo de aditivos.

Antes de analisar as frequências de amostragem em prática no grupo turbogerador TG4 em consideração, faz sentido observar-se a Tabela 3.2, onde se resumem, com base em toda literatura exposta nos capítulos antecedentes, as frequências geralmente aconselháveis das várias análises de controlo de condição do óleo lubrificante e do equipamento.

Análise	Norma	Periodicidade
Viscosidade Cinemática a 40 °C	ASTM D445 ASTM 7279	Mensalmente ou Trimestralmente no máximo
Código de Limpeza ISO (Análise de Partículas)	ISO 4406	Mensalmente ou Trimestralmente no máximo
Número de Acidez (TAN)	ASTM D974 ASTM D664	Mensalmente ou Trimestralmente no máximo
Conteúdo de Água pelo Método de Karl Fischer	ASTM D6304 ASTM D1744	Mensalmente ou Trimestralmente no máximo
Colorimetria por Filtro de Membrana (MPC)	ASTM D7843	Trimestralmente ou no máximo Anualmente
<i>Fourier Transform Infrared Spectrometric</i> (FTIR – Oxidação)	ASTM E2412 ASTM D7414	Mensalmente, Trimestralmente ou Anualmente dependendo da criticidade da aplicação
Tendência e Estabilidade de Espuma (Sequência I)	ASTM D892	Anualmente ou apenas quando necessário
Voltametria de Varredura Linear (RULER)	ASTM D6971	Trimestralmente ou Anualmente no máximo
Espectrometria Elementar (ICP)	ASTM D5185	Mensalmente ou Trimestralmente no máximo
Ferrografia Analítica	ASTM D7690	Anualmente

Tabela 3.2 – Frequências de amostragem aconselháveis

Na Figura 3.12 é representado um esquema referente às datas de colheita e frequência de amostras, relativas à maioria das análises de baixa periodicidade: viscosidade cinemática a 40°C, conteúdo de água pelo método de Karl Fischer, TAN e espectrometria elementar (ICP) “só metais de desgaste”.

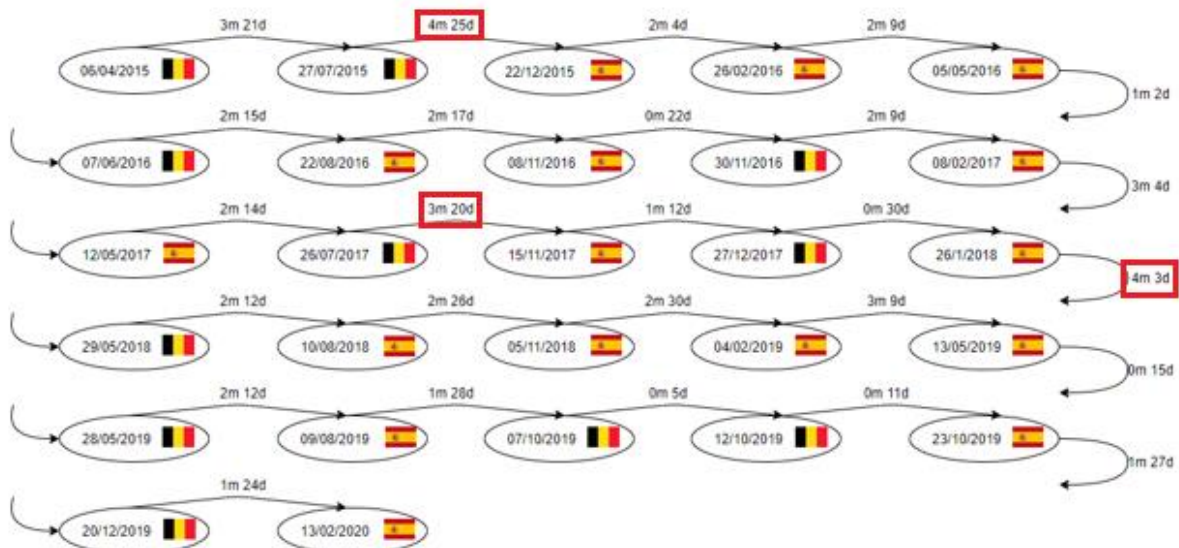


Figura 3.12: Frequência de amostragem das análises à viscosidade, TAN, conteúdo de água e análise espectrométrica (ICP) “só metais de desgaste”

De um modo geral, percebe-se na Figura 3.12 que na maioria das vezes, para as análises em questão, as amostras foram recolhidas dentro da frequência aconselhável – mensalmente ou no máximo trimestralmente. Entre certas análises houve períodos (assinalados a vermelho) que excederam a frequência aconselhável, não sendo contudo muito expressivos.

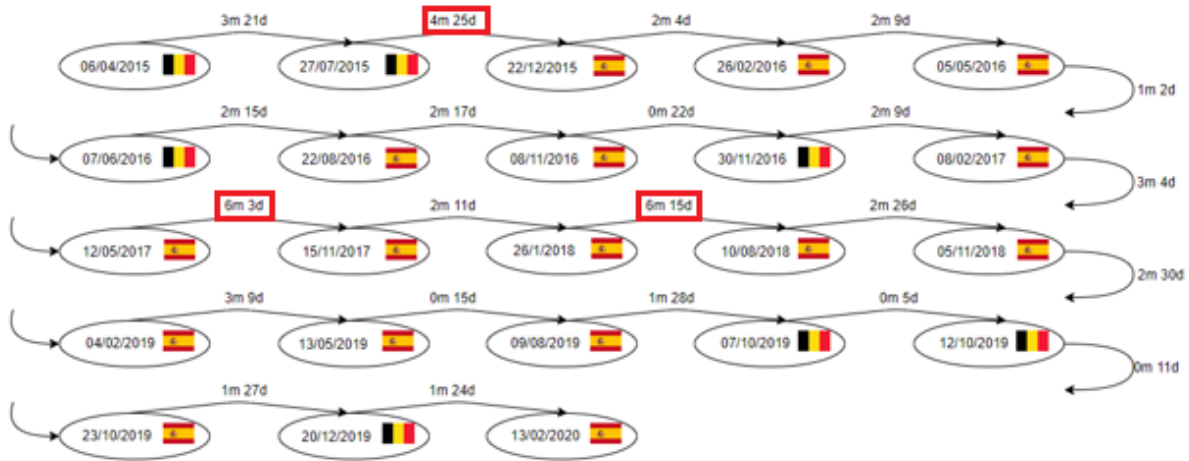


Figura 3.13: Frequência de amostragem referente à análise de partículas (Código de Limpeza ISO)

Na Figura 3.13 é representado o esquema referente à frequência e colheita de amostras onde foram realizadas análises de partículas (Código de Limpeza ISO). Observa-se que, desde Agosto de 2018, a frequência de amostragem para esta análise segue a frequência aconselhável. Anteriormente a essa data, houve períodos (assinalados a vermelho) onde a frequência excedeu o aconselhável, não constituindo, contudo, uma prática no presente.

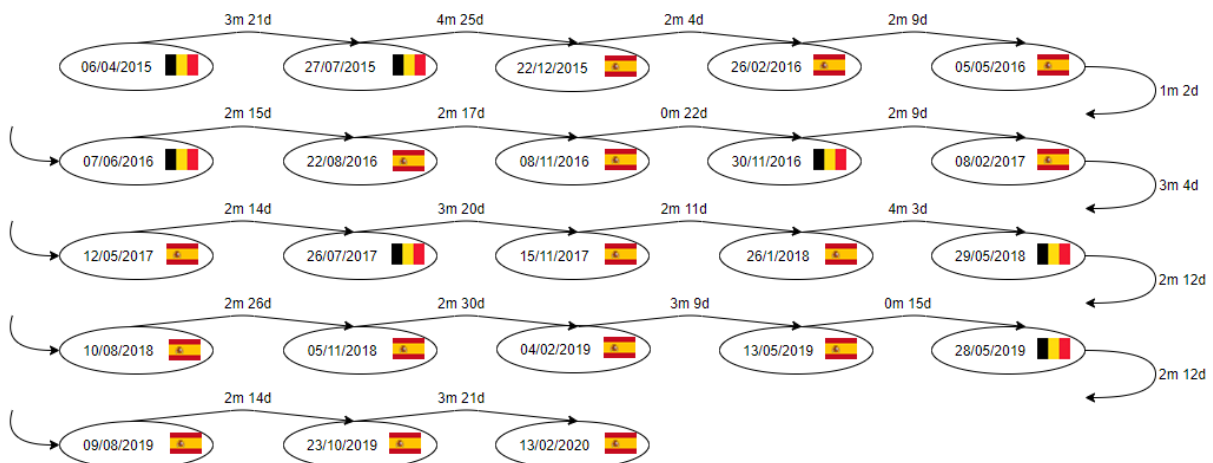


Figura 3.14: Frequência de amostragem referente à análise FTIR

No esquema da Figura 3.14, observa-se a frequência e datas de colheita de amostras relativas às análises FTIR, para averiguar o nível de oxidação do óleo. Para esta análise, em especial, são aconselháveis amostras mensais, trimestrais ou anuais, dependendo da aplicação.

Tendo em conta que está em jogo o desempenho de um óleo lubrificante numa turbina a vapor, e que a oxidação do óleo é um dos problemas centrais a ser controlado, resulta que a frequência das

análises FTIR deve ser alta. Desse modo, não estando em equação apenas a necessidade de amostras anuais, observa-se pela Figura 3.14, que as amostras seguem uma frequência mais ou menos trimestral, principalmente a partir de Agosto de 2018, estando dentro dos limites aconselháveis.

Feita a análise das frequências das análises de baixa periodicidade, faz sentido fazer-se agora o mesmo para as análises de média periodicidade. Estas variam, normalmente, consoante o equipamento e ambiente em que opera, e avaliam os parâmetros mais específicos do óleo no âmbito do controlo de condição da turbina, pelo que são, na maioria das vezes, mais dispendiosas.

Por essa especificidade, as análises de média periodicidade – Espetrometria Elementar (ICP) “completa”, Ferrografia Analítica, Voltametria de Varredura Linear (RULER) e análise MPC, do óleo da turbina SST-800 em causa, são efetuadas apenas no laboratório do próprio fornecedor do óleo, na Bélgica.

A Espetrometria Elementar (ICP) “completa” (mais detalhada que a espectroscopia “só metais de desgaste” anteriormente analisada) realizada pelo laboratório do fornecedor, apresenta a frequência de amostragem esquematizada na Figura 3.15.

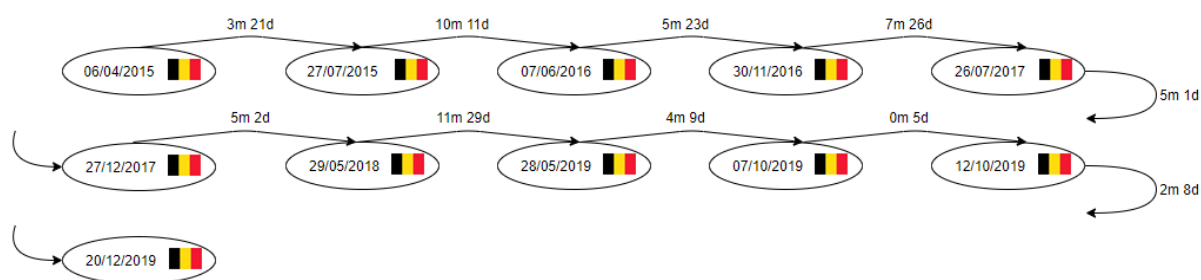


Figura 3.15: Frequência de amostragem referente à Espetrometria Elementar (ICP) “completa”

Tendo em conta ser aconselhável, no máximo, uma frequência trimestral para análises espectrométricas, observa-se através da Figura 3.15 que este requisito só se pôde regularizar a partir de Outubro de 2019, devido a ter-se em consideração o efeito de alguns ajustes havidos no programa de intervenções, o aproveitamento de paragens industriais para colheita de amostras, e obter-se informações mais detalhadas do estado atual do óleo, e também o facto de já estar a ser feita uma anterior análise espectrométrica (ICP) “só metais de desgaste”.

Relativamente à análise colorimétrica (MPC) e à Voltametria de Varredura Linear (RULER), conclui-se quer pela Figura 3.16, quer pela Figura 3.17 que, desde Abril de 2015 até a Dezembro de 2019, estas análises foram conduzidas dentro dos limites considerados aconselháveis – trimestral ou anual, dependendo da criticidade do equipamento – anteriormente expostos e presentes na literatura revista, sendo contudo realizadas segundo uma frequência de amostragem pouco regular.

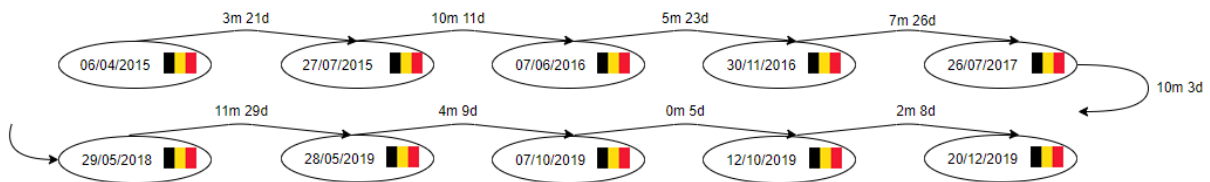


Figura 3.16: Frequência de amostragem referente à análise MPC

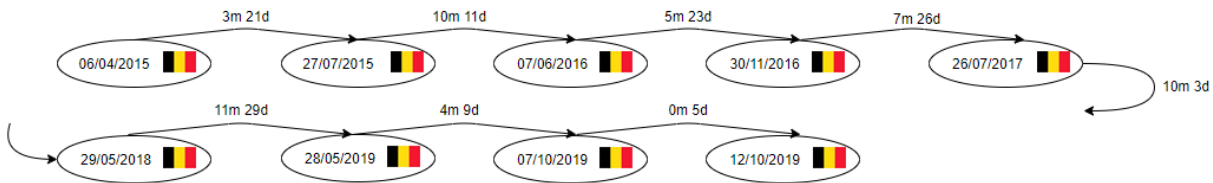


Figura 3.17: Frequência de amostragem referente à Voltametria de Varredura Linear (RULER)

Por observação da Tabela 3.2, verifica-se ser aconselhável, numa turbina a vapor, a condução de uma análise de Ferrografia Analítica anualmente, para que se efetue um controlo eficaz da sua condição operacional e da do óleo que a lubrifica. Normalmente, apenas em aplicações ou equipamentos de muito elevada criticidade, ou onde o risco proveniente da falha seja catastrófico, são conduzidas ferrografias com maior frequência.

Analisando o esquema presente na Figura 3.18 observa-se que no CIFF, tendo-se tido em conta constituir-se a falha da turbina SST-800 como um risco muito crítico quanto a potencial ausência de energia elétrica para a fábrica, foram realizadas, a partir de Novembro de 2016, ferrografias com uma frequência ligeiramente superior à normal, permitindo-se assim um controlo mais seguro da operacionalidade do equipamento.

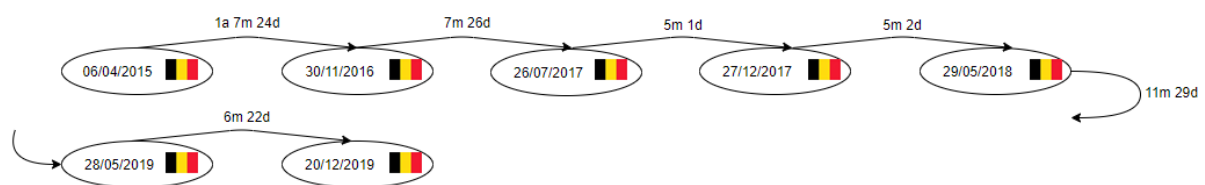


Figura 3.18: Frequência de amostragem referente à ferrografia

Após terem sido apresentadas as frequências das análises “de baixa periodicidade” e “de média periodicidade”, é ainda importante pôr-se em consideração os factos conducentes às análises “especiais”, realizadas conforme a necessidade.

Nesse sentido, é conduzida uma análise quanto a Tendência e Estabilidade de Espuma (Sequência I), apenas quando a presença de espuma representa um problema operacional para o óleo lubrificante. Apesar de se tratar de um teste de reprodutibilidade muito baixa, mas ainda assim ser a presença de espuma em sistemas de circulação de turbinas a vapor uma inevitabilidade, torna-se pelo menos aconselhável proceder-se à análise de Tendência e Estabilidade de Espuma quando necessário. Pela Figura 3.19 percebe-se que esta análise é efetuada sem uma frequência regular.

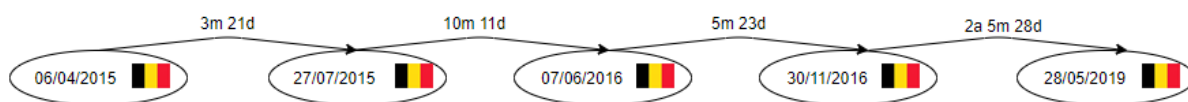


Figura 3.19: Frequência de amostragem referente à análise de Tendência e Estabilidade de Espuma

Para além das análises acima consideradas, há outras que incorporaram o programa de análise de óleos da turbina SST-800, mas que deixaram, entretanto, de ser realizadas:

- Demulsibilidade – Realizada pela última vez a Julho de 2017, os seus resultados revelaram-se muito propensos a falsos negativos. O óleo pode demonstrar uma baixa demulsibilidade em laboratório mas, no contexto prático da turbina SST-800, onde o reservatório de dimensões elevadas permite consideráveis tempos de repouso do óleo, as taxas da separação entre água e óleo são maiores, não havendo um impacto significativo no desempenho operacional do fluido lubrificante;
- Libertação de Ar – Realizada pela última vez em Novembro de 2016, em óleos de turbina, o tempo de libertação de ar não varia muito com a vida de serviço, pelo que foi considerado não necessitar de ser periodicamente testado para aferição do seu estado;
- Inibição de Corrosão – Realizada pela última vez em Novembro de 2016, esta análise era específica para averiguar a capacidade do óleo para prevenir a corrosão em elementos de ligas de cobre, mas apesar de ser um teste de grande relevância para turbinas a vapor, o facto de um óleo ter de já estar num estado muito crítico de degradação para indiciar corrosão ao cobre, e de a ferrografia, em prática, também possibilitar a avaliação da corrosão não só ao aço mas também ao cobre, justificou a descontinuação desta análise.

3.3.2. Monitorização de Parâmetros do Óleo

Após se terem apresentado e analisado as frequências de amostragem relativas ao conjunto de análises especificamente realizadas ao óleo em serviço na turbina SST-800, faz sentido resumir-se, com base nos requisitos concretos do fabricante e na Revisão Bibliográfica, os valores admissíveis dos parâmetros de controlo em causa – ver Tabela 3.3 – bem como fazer-se, de seguida, a sua interpretação e discussão.

Análise	Norma	Valores Admissíveis
Viscosidade Cinemática a 40 °C	ASTM D445 ASTM 7279	+/- 10% do valor do óleo novo; Para o óleo em uso - de classe ISO VG 46 - corresponde a um intervalo entre 41,4 e 50,6 mm ² /s, a 40 °C;
Código de Limpeza ISO (Análise de Partículas)	ISO 4406	No máximo */17/14
Número de Acidez (TAN)	ASTM D974 ASTM D664	Com aditivos EP/AW – máximo 0,3 mg KOH/g Sem aditivos EP/AW – máximo 0,2 mg KOH/g
Conteúdo de Água pelo Método de Karl Fischer	ASTM D6304 ASTM D1744	No máximo 100 ppm
Colorimetria por Filtro de Membrana (MPC)	ASTM D7843	Escala MPC ΔE
Fourier Transform Infrared Spectrometric (FTIR – Oxidação)	ASTM E2412 ASTM D7414	Entre 1660 cm ⁻¹ e 1800 cm ⁻¹ , absorvâncias maiores que 4 abs/cm devem servir de alarme
Tendência e Estabilidade de Espuma (Sequência I)	ASTM D892	No máximo 400/10 (Sequência I)
Voltametria de Varredura Linear (RULER)	ASTM D6971	No mínimo 25% da concentração total inicial de anti-oxidantes (amínicos + fenólicos)
Espectrometria Elementar (ICP)	ASTM D5185	<ul style="list-style-type: none"> • No máximo 10 ppm (ou aumentos de 4 ppm) em elementos metálicos; • No máximo 25 ppm em elementos provenientes de agentes exteriores (Silício, por exemplo); • No máximo 1000 ppm em Enxofre;
Ferrografia Analítica	ASTM D7690	Análise qualitativa da condição do equipamento

Tabela 3.3 – Valores admissíveis referentes às análises efetuadas

Viscosidade - A viscosidade é das mais importantes propriedades do óleo, de grande contributo para a formação de uma película espessa, hidrodinâmica, de óleo entre as superfícies interactuantes dos órgãos lubrificadas, condição fulcral para o continuado bom desempenho operacional, quer do óleo quer do equipamento.

Como prática geral, ao monitorizar-se qualquer parâmetro do óleo lubrificante, seleccionado para a manutenção condicionada da máquina, deverão ser cumpridas as respetivas recomendações do fabricante. Assim, a Siemens impõe para a viscosidade um limite máximo de variação de 10%, abaixo ou acima do “valor do óleo novo”, na prática o valor nominal de viscosidade cinemática a 40 °C, no caso presente o do óleo Castrol Perfecto X46. Não obstante, registe-se que a Mobil – produtora de óleo – opinando sobre a criticidade da turbina a vapor, considera uma variação de 5% do valor de novo, como limite de alarme [37].

No período em análise observa-se, na Figura 3.20, que o valor da viscosidade manteve-se praticamente dentro do intervalo estipulado pelo fabricante da turbina – 41,4 a 50,6 mm²/s – com apenas dois aumentos esporádicos excedendo os 5%, mas abaixo dos 10%.

Esses aumentos, um no início de 2016 e outro no final de 2019, estão muito provavelmente relacionados com o concomitante aumento de partículas contaminantes no óleo, como se pode observar na Tabela 3.4, mais adiante.

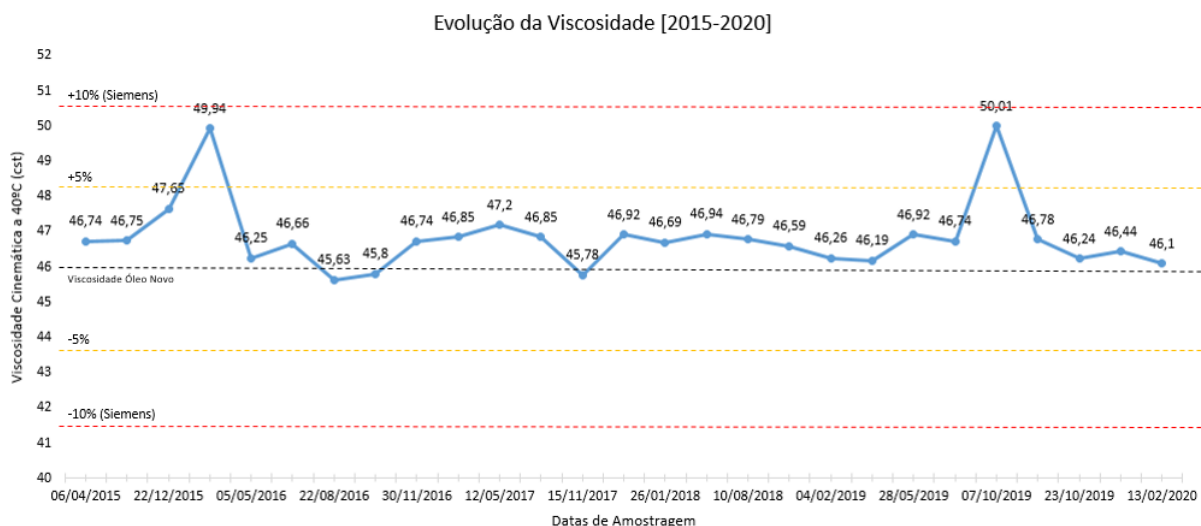


Figura 3.20: Evolução do valor da viscosidade do óleo [2015-2020]

Código de Limpeza ISO - A presença de contaminantes sólidos, internos ou externos aos sistemas tribológicos, compromete o desempenho operacional dos equipamentos e acelera a degradação do lubrificante. O controlo por análise de concentração de partículas proporciona a sua quantificação em número de partículas por unidade de volume do fluido, sendo a concentração e distribuição por tamanho das partículas expressos pelo código de limpeza definido pela norma ISO 4406.

Para a turbina SST-800 do CIFF, a Siemens recomenda um código máximo de limpeza de */17/14, adotando o antigo sistema de códigos de limpeza ISO (apenas dois valores de controlo: partículas maiores que 6 µm e partículas maiores que 14 µm, por esta ordem).

Ao analisar-se a Tabela 3.4 observa-se que, no período em análise, houve amostras que, apesar de não se desviarem muito do limite imposto pelo fabricante, apresentaram um grau de pureza aquém do desejado, o que será consistente com o correspondente aumento da viscosidade (observado na Figura 3.20). Uma vez corrigido o problema com ações de purificação e refrescamento do óleo – filtragem do óleo, limpeza do tanque no dia 7 e 8 Outubro 2019 durante a revisão TG4 e refrescamento de 1000 litros – e confirmada desse modo a sua resolução pelos resultados obtidos nas amostras seguintes, este caso constitui um bom exemplo da vantagem de um programa de manutenção condicionada de um equipamento, por controlo da condição do seu óleo lubrificante.

Data de Amostra	Código de Limpeza ISO
06/04/2015	18/16/12
27/07/2015	20/18/14
22/12/2015	19/17/12
26/02/2016	21/19/14
05/05/2016	19/17/13
07/06/2016	20/18/14
22/08/2016	17/15/9
08/11/2016	19/17/12
30/11/2016	17/15/11
08/02/2017	18/17/12
12/05/2017	17/15/11
15/11/2017	17/16/12
26/01/2018	19/17/13
10/08/2018	17/15/10
05/11/2018	20/17/14
04/02/2019	18/16/11
13/05/2019	18/17/13
09/08/2019	16/14/10
07/10/2019	20/18/16
12/10/2019	18/16/13
23/10/2019	19/18/14
20/12/2019	17/15/11
13/02/2020	18/16/13

Tabela 3.4 – Códigos de Limpeza ISO referentes às amostras recolhidas no período em análise

Total Acid Number (TAN) – Sendo o valor de TAN, ou Número de Acidez, uma medida da concentração total de compostos ácidos presentes no óleo, um seu aumento indica, em princípio, um aumento do nível de oxidação do óleo, nomeadamente por algum esgotamento de aditivação antioxidante. Refira-se, a propósito, que, a seguir a um refrescamento do óleo no sistema, verifica-se sempre um abaixamento do valor de TAN, por haver reposição do nível de aditivos antioxidantes.

A Siemens impõe como valores limite de TAN, 0,20 mgKOH/g para óleos sem aditivos EP/AW, e 0,30 mgKOH/g para óleos com esses aditivos. Como o óleo Castrol Perfecto X46 não contém este tipo de aditivos, assume-se o primeiro como limite máximo admissível e pelo gráfico da Figura 3.21, verifica-se nunca terem sido atingidas indicações alarmantes deste parâmetro, para o desempenho operacional do óleo.

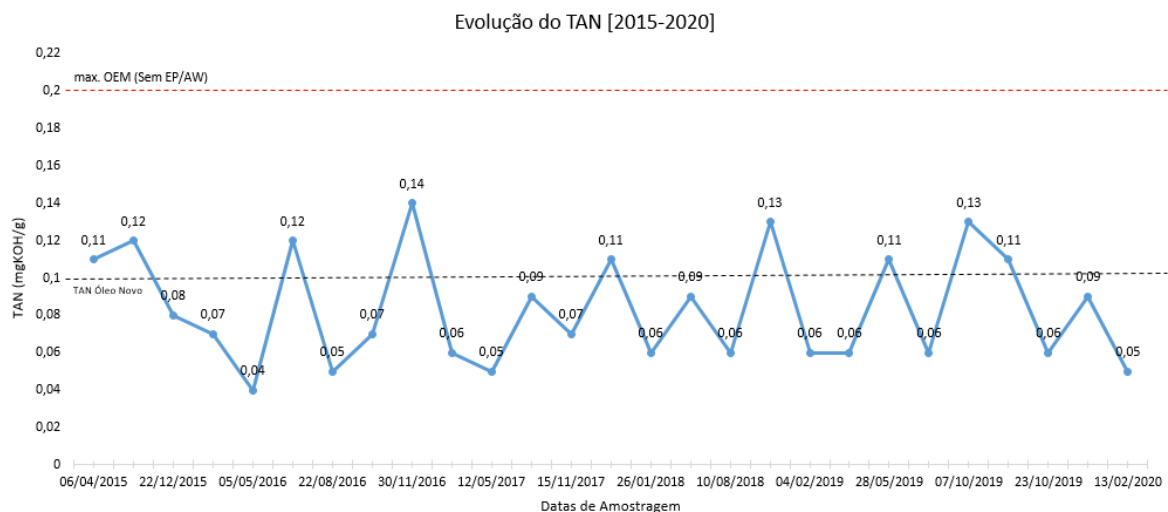


Figura 3.21: Evolução do TAN [2015-2020]

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR - Oxidação) – Para além de avaliar outros parâmetros importantes do óleo, a análise FTIR facultava uma aferição relevante do estado de oxidação do óleo, não obstante ser complementada com um teste igualmente rotineiro como o TAN. No caso prático em estudo (em que apenas se fez uso da FTIR para averiguar os níveis de oxidação do óleo) verifica-se que, no período em análise, os valores de absorvância medidos pela FTIR na frequência de oxidação, mantiveram-se sempre abaixo de 1 abs/cm, entre 1600 e 1800 cm^{-1} , revelando assim níveis de oxidação do óleo abaixo do normal valor de alarme, de 4 abs/cm.

Conteúdo de água pelo Método de Karl Fischer - A sempre perniciosa presença de água no óleo lubrificante é, nas turbinas a vapor, uma inevitabilidade, podendo infiltrar-se no sistema quer diretamente pelo natural meio ambiente exterior, quer por condensação ocorrida durante as paragens de serviço do equipamento.

Em turbinas a vapor como a SST-800, o teor de água deve ser rigorosamente controlado por forma a assegurar a longevidade dos seus componentes, impedindo o desgaste corrosivo, e alargando a vida operacional do óleo que, em presença de água, fica sujeito a uma mais rápida oxidação.

A Siemens, enquanto fabricante original do equipamento, e tendo em conta a aplicação e criticidade da turbina, opta por um limite máximo conservador de 100 ppm de presença de água no óleo.

Por observação da Figura 3.22, conclui-se que, no período em análise, esse limite nunca foi atingido e o teor de água no óleo da turbina foi sempre pouco significativo, raramente excedendo os 20 ppm. Só a amostra realizada em Dezembro de 2015, exibiu um valor de 73 ppm, que não subsistiu devido a uma eficaz intervenção nos diversos filtros separadores existentes no sistema de lubrificação.

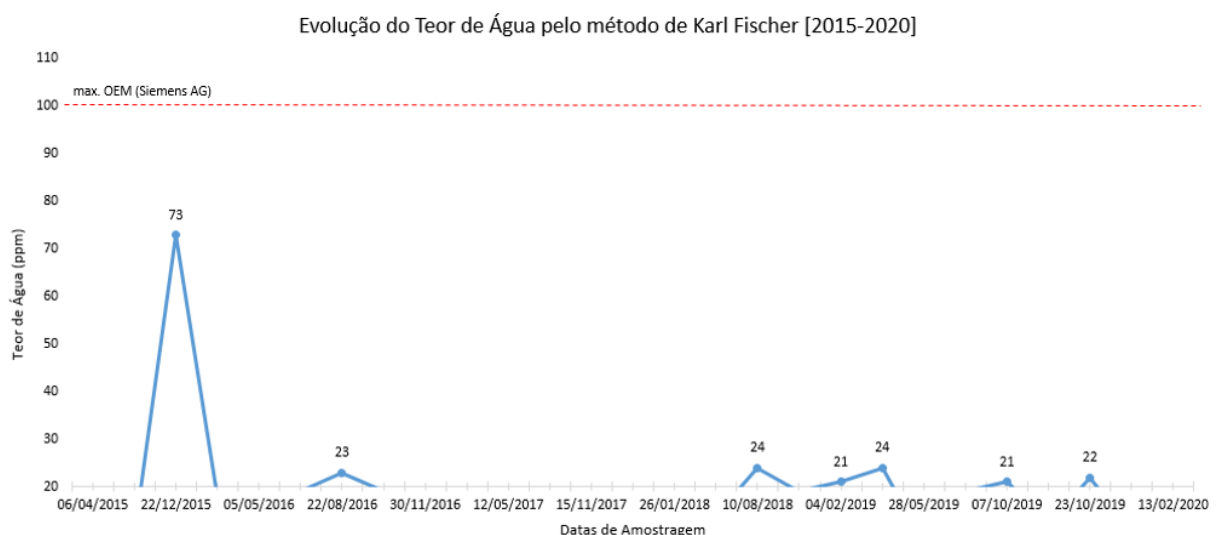


Figura 3.22: Evolução do Teor de Água no óleo (método de Karl Fischer) [2015-2020]

Membrane Patch Colorimetry (MPC) - A análise MPC monitoriza a acumulação de produtos insolúveis devida a degradação do óleo, da qual resultam vernizes, por visualização do aspeto dos resíduos deixados na membrana após filtragem, e respetiva comparação do índice ΔE com a escala da Figura 2.22, para quantificação da propensão do óleo para a geração de vernizes [39].

Por observação do gráfico da Figura 3.23 e tendo-se em devida conta a ausência de problemas relacionados com a presença de vernizes no óleo, ao longo de todo o período em análise, concluiu-se que o valor reportado pelo laboratório pôde ser considerado “normal”. Para ilustração desse facto, compare-se a aparência da membrana da Figura 3.24 obtida no último teste de MPC à turbina em estudo (classificação 6), com as membranas mostradas na Figura 2.22.

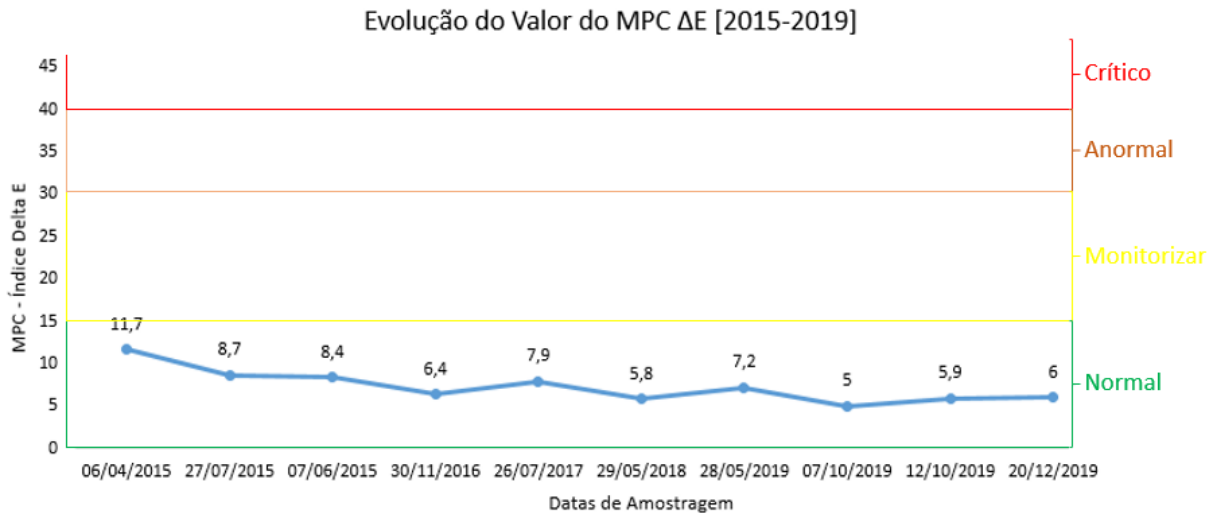


Figura 3.23: Evolução do valor do MPC ΔE [2015-2020]



Figura 3.24: Membrana MPC referente à amostra de óleo de 20/12/2019

Voltametria de Varredura Linear (*Remaining Useful Life Evaluation Routine* - RULER) – A RULER é usada para a monitorização do nível da concentração total, restante, dos aditivos antioxidantes presentes no óleo, por comparação da concentração no óleo usado com a do óleo novo. É para isso mais importante a concentração dos antioxidantes amínicos, por serem estes os que mais permanecem em serviço depois do relativamente rápido consumo dos antioxidantes fenólicos mal o óleo é posto em serviço.

Como o fabricante da turbina não impõe nenhum limite específico para este teste, recorre-se à literatura da especialidade, nomeadamente à recomendação da Mobil referenciada no seu relatório técnico [39]. Neste documento, e como já observado anteriormente, o limite mínimo recomendado para a degradação do óleo testado face ao óleo novo, é o de quando a concentração total de aditivos antioxidantes no primeiro já se encontra apenas a 25% do valor do segundo, pois a partir deste ponto a oxidação no óleo usado cresce num processo exponencial e irrecuperável.

Observando-se a Figura 3.25 conclui-se que, no período em análise, o limite mínimo de 25% da concentração total de antioxidantes nunca esteve perto de ser atingido, assim demonstrando uma elevada proteção e resistência à oxidação por parte do óleo lubrificante em serviço.

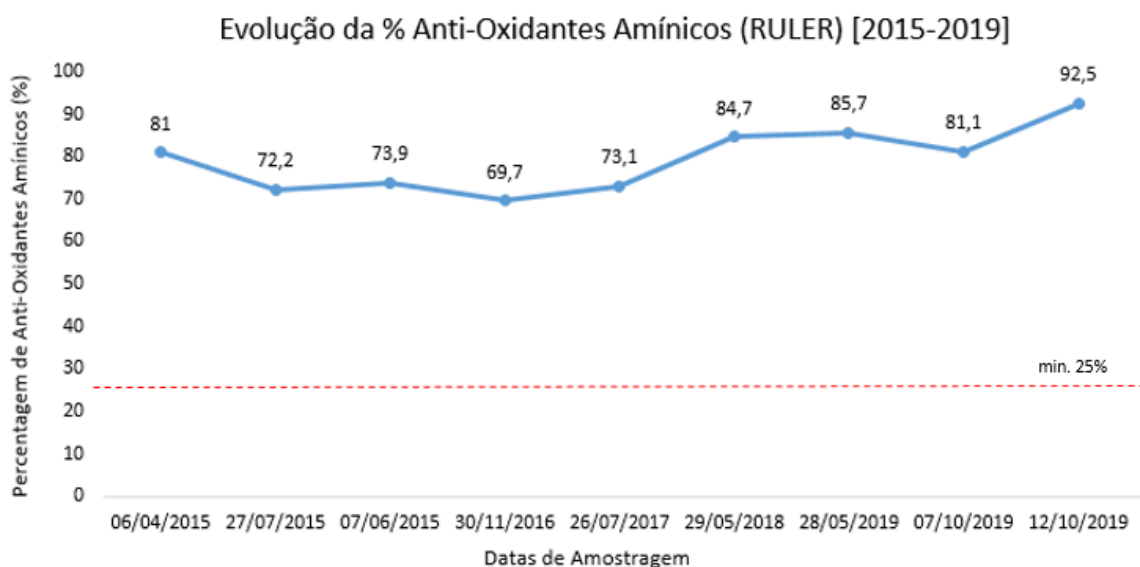


Figura 3.25: Evolução da percentagem de antioxidantes Amínicos (RULER) [2015-2019]

Tendência e Estabilidade de Espuma - No caso prático em estudo, esta análise apenas é e foi efetuada quando necessário. E é a Siemens, o fabricante da turbina, que recomenda como limites máximos uma tendência de 400 ml e uma estabilidade de 10 ml, no âmbito do ensaio laboratorial de sequência I (24°C) [37].

Pela Tabela 3.5, conclui-se que nas poucas vezes em que se avaliou a tendência e estabilidade da espuma no óleo lubrificante, os resultados nunca se aproximaram do limite recomendado pelo fabricante; a espuma não representava um problema operacional para o óleo.

Data de Amostra	Tendência / Estabilidade (mL/mL) – Sequência I
06/04/2015	40/0
27/07/2015	10/0
07/06/2016	20/0
30/11/2016	20/0
28/05/2019	110/0

Tabela 3.5 – Valores de Tendência / Estabilidade de Espuma referentes às amostras recolhidas

Espectrometria Elementar (ICP) – Esta análise, como atrás referido, é feita em dois laboratórios: num laboratório comercial em Espanha, para simples análises de elementos metálicos, e no laboratório do próprio fornecedor do óleo, na Bélgica, para análises mais profundas, quer dos elementos metálicos quer de elementos constituintes de agentes externos ou aditivos, como por exemplo o Sódio ou o Enxofre.

Para esta análise, não há definição específica e normalizada de limites para a concentração de elementos químicos, sendo o controlo feito, basicamente, pela monitorização da tendência dos níveis

de presença de certos elementos. Contudo, e como também referido anteriormente, no caso de elementos metálicos, níveis maiores que 10 ppm, ou aumentos de 4 ppm entre amostras, deverão ser considerados anormais [2]. No caso de elementos provenientes de contaminação exterior, como o Silício ou o Sódio, os níveis deverão ser mantidos abaixo dos 25 ppm [39].

Por observação da Tabela 3.6 conclui-se que, no período em análise, todos os elementos detetados pela análise espetrométrica, metálicos ou não, estão dentro das regras gerais acima anunciadas e presentes na literatura revista, pelo que não se apresentam como um possível problema operacional para o óleo.

Um exemplo claro disso é a presença esporádica e pouco significativa de Cobre e Chumbo, típicos dos metais brancos de revestimento das chumaceiras, e que apenas marcam o inevitável e espectável desgaste adesivo presente nestes órgãos mecânicos.

Ao contrário do antecedente, as maiores concentrações de Fósforo e Enxofre, este último sendo um elemento muito ativo no ataque às ligas de cobre (por exemplo, bronzes), já poderiam ser preocupantes. Não é no entanto o caso presente pois não só o óleo da turbina em estudo (o Castrol Perfecto X46) não tem aditivos antidesgaste do tipo EP/AW, que são efetivamente ricos em Fósforo e Enxofre, nem os valores obtidos – entre 1 e 8 ppm para P e 309 e 575 ppm para S - ver Tabela 3.6 – deverão ser considerados invulgares na aplicação em análise, por fazerem já uma pequena parte da formulação do óleo de modo a poder conferir-lhe alguma resistência ao desgaste. Por consulta ao fornecedor do óleo, obteve-se a indicação específica de que os níveis de Enxofre deverão permanecer abaixo dos 1000 ppm.

Data de Amostra	Al	Cu	Mg	Mo	Na	P	Pb	S	Zn
06/04/2015	-	-	-	-	2 ppm	4 ppm	-	555 ppm	1 ppm
27/07/2015	-	-	-	-	1 ppm	-	-	509 ppm	-
22/12/2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26/02/2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-
05/05/2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-
07/06/2016	-	-	-	-	-	2 ppm	-	575 ppm	-
22/08/2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-
08/11/2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30/11/2016	-	-	-	-	1 ppm	-	-	499 ppm	-
08/02/2017	-	-	-	-	-	-	1 ppm	-	-
12/05/2017	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26/07/2017	-	-	1 ppm	-	2 ppm	1 ppm	-	309 ppm	-
15/11/2017	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27/12/2017	-	-	-	-	3 ppm	5 ppm	-	323 ppm	-
26/01/2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29/05/2018	-	-	-	2 ppm	3 ppm	3 ppm	-	452 ppm	-
10/08/2018	-	-	-	-	-	-	1 ppm	-	-
05/11/2018	-	1 ppm	-	-	-	-	3 ppm	-	-
04/02/2019	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13/05/2019	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28/05/2019	-	-	-	-	2 ppm	-	-	318 ppm	-
09/08/2019	-	-	-	-	-	-	-	-	-
07/10/2019	-	-	-	-	-	8 ppm	-	565 ppm	-
12/10/2019	-	-	-	-	1 ppm	-	-	400 ppm	-
23/10/2019	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20/12/2019	-	-	-	1 ppm	-	3 ppm	-	348 ppm	-
13/02/2020	1 ppm	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 3.6 – Teor, em ppm, de alguns elementos detetados por análise espetrométrica

Ferrografia - Enquanto os outros tipos de análise considerados se focalizam no estado do óleo, a ferrografia incide na análise das partículas metálicas encontradas em suspensão no mesmo, para avaliação da condição operacional e evolução do desgaste nos equipamentos.

No caso da turbina em estudo, foram realizadas algumas ferrografias durante o período analisado, que permitiram detetar e classificar mecanismos de desgaste que estavam a ocorrer no equipamento.

A grande vantagem deste tipo de análise, para além da identificação minuciosa de mecanismos de desgaste, é facultar a deteção de partículas de maiores dimensões, indetetáveis pela análise espetrométrica, como é o caso da partícula de base cobre mostrada na Figura 3.26, dando origem a que a turbina passasse a ser seguida de perto e que pudessem ser postas em prática ações corretivas que purificassem o óleo, como filtragens e refrescamentos, por exemplo.



Figura 3.26: Partícula de Cobre detetada na amostra de 28/05/2019

As ferrografias realizadas também permitiram verificar a presença de óxidos ferrosos no óleo – ver Figura 3.27 – sendo indicativos de desgaste e ataque corrosivo de algum componente mecânico, e a corrosão provocada pela presença praticamente inevitável de água no sistema de óleo. A consequente tomada de ações permitiu reduzir-se significativamente a geração destas partículas, salvaguardando quer o equipamento quer o próprio óleo.



Figura 3.27: Óxidos / Partículas Ferrosas detetadas na amostra de 20/12/2019

Para além das faculdades anteriores – e como já explorado durante a revisão de literatura – as ferrografias realizadas também permitiram classificar os mecanismos de desgaste presentes no equipamento.

Além disso, ao se detetarem partículas de dimensões relativamente maiores nas amostras de óleo, permitiu-se que o operador do equipamento realizasse ações de filtragem de purificação do óleo e que se evitasse que essas partículas contribuíssem para um maior desgaste, anormal, dos vários componentes da turbina.

Como se pode observar nas Figuras 3.28, 3.29 e 3.30, foram detetados mecanismos de desgaste adesivo normal, e agravamentos por desgaste abrasivo, bem como por fadiga de contacto (picagem), através de amostras de óleo retiradas ao longo do período em análise.

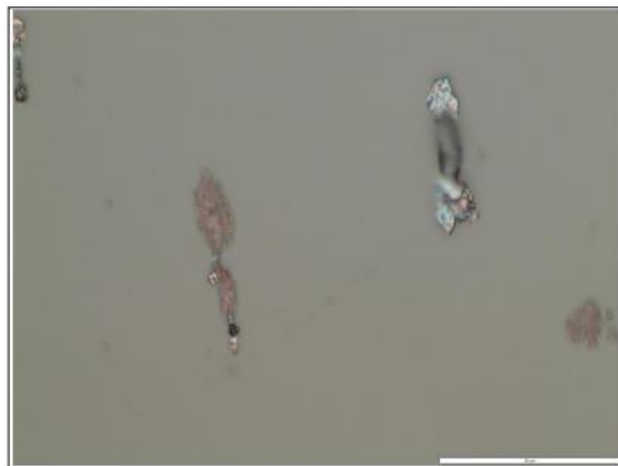


Figura 3.28: Pequenas partículas de desgaste adesivo normal, menores que 15 μm , detetadas na amostra de 30/11/2016



Figura 3.29: Escamas de fadiga (Picagem) detetadas na amostra de 26/07/2017 (25 μm)



Figura 3.30: Partícula (“limalha”) de desgaste abrasivo detetada na amostra de 29/05/2018

Apesar do material ferroso encontrado nas análises de partículas acima incluir escamas de fadiga de maiores dimensões, com diâmetro máximo de 25 μm , a sua quantidade era muito limitada para ser considerada anormal.

Em síntese, pretendeu-se neste subcapítulo, com a descrição dos resultados reportados pelos laboratórios de análise do óleo em serviço da turbina em estudo, pôr em relevo a importância do controlo de condição do equipamento e da qualidade da sua lubrificação, por esse meio realizado. Tal permitiu, tendo em conta a criticidade da turbina SST-800 para a aplicação em causa, pôr em prática ações corretivas como refrescamentos do óleo e melhorias de filtragem, por forma a aumentar a disponibilidade do equipamento, manter o seu rendimento operacional e aumentar a sua vida útil de serviço.

3.4. Sugestões de Melhoria

Tendo por base a descrição do equipamento em estudo e o tratamento da informação relativa à sua manutenção condicionada por análise do seu óleo em serviço, anteriormente efetuados, apresentam-se neste subcapítulo algumas medidas que poderão vir a ser futuramente colocadas para apreciação quanto a eventual melhoria da representatividade das amostras de óleo recolhidas. Não obstante, é importante deixar sublinhado que, com base no histórico das atuais análises em efetividade, a monitorização em prática tem-se revelado eficaz, como se observa no subcapítulo 3.3.

Assim, as medidas aqui apresentadas inserem-se numa vertente de possível melhoria contínua do programa de análise de óleos da turbina em causa, visando que, face a eventuais crescentes necessidades produtivas, e conseqüente necessidade de sujeição do equipamento a condições operacionais mais exigentes, venha a ser considerada a necessidade de alguns ajustes de melhoria que promovam a melhor sustentação do respetivo sector operacional da Empresa.

Nesse sentido, as duas medidas sugeridas, a seguir desenvolvidas, são as seguintes:

- **Uniformização dos intervalos de amostragem das análises de média periodicidade**, nomeadamente da análise MPC, da Voltametria de Varredura Linear (RULER) e da Espectrometria Elementar, realizadas pelo laboratório do próprio fornecedor do óleo;
- **Ampliação do conjunto de portas de amostragem de óleo no equipamento**, nomeadamente para as chumaceiras do rotor da turbina;

Uniformização dos intervalos de amostragem das análises de média periodicidade

Observando-se as Figuras 3.15, 3.16 e 3.17 percebe-se que, quando se compara com a maioria das restantes análises, as análises de média periodicidade (exceto a Ferrografia Analítica) são realizadas segundo uma frequência de amostragem pouco definida. Percebe-se, por exemplo, que os períodos relativos a duas amostragens consecutivas variam entre os dois e os onze meses.

A questão aqui não passa necessariamente pelo aumento da frequência de amostragem, pois como foi visto na secção 3.3.1, quer para a análise MPC, quer para as análises RULER e Espectrometria Elementar, os requisitos teóricos relativos às frequências recomendadas para cada análise (expostos na Tabela 3.2) são, de um modo geral, cumpridos. O reajuste a ter em conta no planeamento da amostragem passa pela uniformização da frequência de recolha das amostras, garantindo a representatividade estatística dos dados obtidos e um mais adequado acompanhamento da condição real do óleo que lubrifica a turbina.

Assim, para as análises de média periodicidade em questão, em vez de haver uma notável variação na frequência de amostragem, e à semelhança das análises de baixa periodicidade, é definida uma frequência específica a ser cumprida: mensal, trimestral, semestral ou mesmo anual (consoante a recomendação relativa a cada tipo de análise, presente na Tabela 3.2).

Esta proposta baseia-se no princípio de que um plano de amostragem deve seguir uma frequência pré-definida, por forma a garantir a representatividade das amostras. No entanto, é de referir que, na prática e dependendo da indústria, é por vezes difícil ou até impossível cumprir este plano de amostragem, ocasionalmente desregulado pela logística do programa de produção, por decisões de gestão financeira de manutenção ou pela calendarização de intervenções corretivas e paragens industriais.

Contudo, tendo em conta a criticidade da turbina quer ao nível de manutenção, quer para a produção de energia elétrica no seu complexo industrial, assunto já anteriormente abordado, considera-se ser crucial este reajuste. Para reforço deste tópico é interessante referir-se que numa sondagem levada a efeito nos EUA concluiu-se que 64% dos profissionais de lubrificação consideravam a criticidade do equipamento como o principal fator responsável por reajustes dos seus planos de amostragem [50].

Ampliação do conjunto de portas de amostragem de óleo no equipamento

No sistema de lubrificação da turbina SST-800 em funcionamento no CIFF, existe apenas uma porta de amostragem para a recolha de óleo em serviço, situada na linha de retorno do óleo ao tanque.

Como anteriormente referido, realizam-se nesta porta de amostragem primária as amostras rotineiras que fornecem uma visão geral da condição do equipamento e do óleo, relativa a desgaste de componentes, presença de impurezas ou alterações nas propriedades físico-químicas do lubrificante.

Em teoria, a localização mais apropriada para a recolha de amostras em sistemas de lubrificação de turbinas por circulação de óleo é mesmo na linha de retorno ao tanque. O óleo é recolhido no final de um ciclo de lubrificação, antes de ser filtrado, garantindo-se assim uma maior representatividade da amostra pois, quando o óleo entra no tanque, a informação nele contida dilui-se nos milhares de litros de óleo aí existentes [14].

Não obstante ser o procedimento acima aquele que é implementado no caso prático aqui apresentado e as amostras recolhidas na porta de amostragem da linha de retorno fornecerem uma informação importante acerca da condição geral do equipamento, ela poderá, no entanto, vir a ser algo melhorada, por adoção de uma política de amostragem mais extensa, que não se limite a fornecer apenas uma avaliação geral do sistema, mas que permita o controlo de condição a nível de certos componentes considerados como mais críticos.

Na Figura 3.31 apresenta-se um exemplo de um sistema de circulação com uma porta de amostragem na linha de retorno, agora designada por primária, e outras portas de amostragem secundárias a nível de componentes [51].

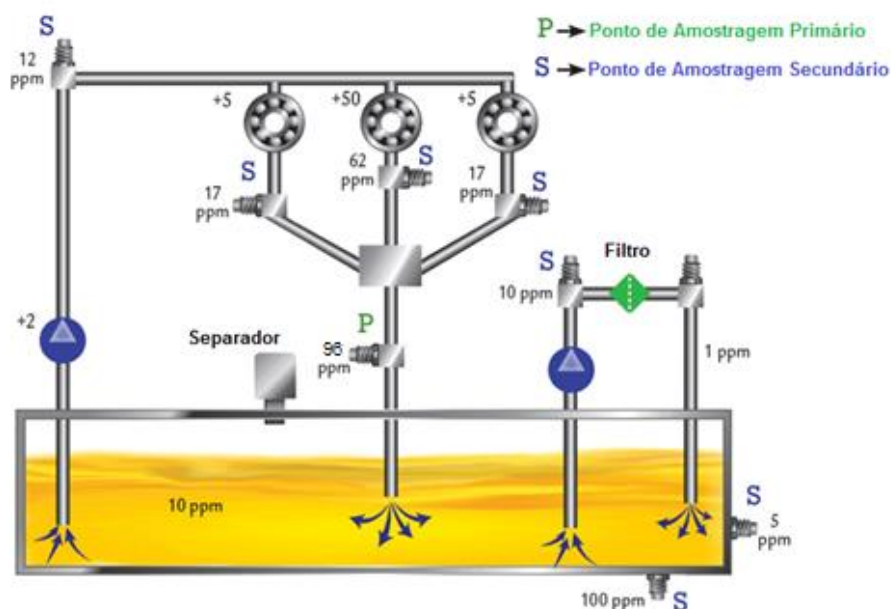


Figura 3.31: Exemplo de vários pontos de amostragem num sistema de lubrificação [51]

Neste exemplo percebe-se que, no caso do controlo de partículas em suspensão no óleo, o teor de partículas metálicas encontrado difere de ponto para ponto, ilustrando que, se apenas houvesse a porta de amostragem principal (no retorno), o valor reportado pela análise seria de 96 ppm, indicando claramente a existência de eventual desgaste anormal nalguma das chumaceiras do equipamento, mas não sendo, contudo, possível indicar em qual delas.

Ainda, pela Figura 3.31, identifica-se a adicional vantagem da utilização de portas de amostragem secundárias para a monitorização e quantificação do rendimento operacional de um dado filtro existente no sistema de circulação, no caso de serem instaladas portas de amostragem a montante e a jusante do mesmo.

Assim, à semelhança do que é evidenciado na Figura 3.31, propõe-se uma ampliação do conjunto de portas de amostragem no sistema de circulação da turbina SST-800, nomeadamente com a instalação de pontos secundários imediatamente a jusante das chumaceiras de escorregamento que apoiam o rotor da turbina. Desta maneira, caso as amostras recolhidas na linha de retorno sugerissem a presença de algum desgaste anormal no equipamento, tirar-se-ia partido dos pontos de amostragem secundários para se isolar e localizar a falha, caso esse desgaste fosse proveniente de alguma das chumaceiras. Assim, a predominância numa amostra, de determinadas partículas metálicas de ligas previamente atribuídas a algum dos diversos componentes mais propensos a desgaste comprometerá esse mesmo órgão como sendo o responsável por uma potencial avaria do sistema, com grande probabilidade de asserto relativamente à sua origem.

A ampliação do conjunto de portas de amostragem poderá ser alargada às chumaceiras do gerador, devido ao facto de estas pertencerem ao mesmo sistema de lubrificação da turbina.

Na Figura 3.32, é ilustrada a ampliação sugerida do conjunto de portas de amostragem da turbina em estudo, considerada nos parágrafos anteriores.

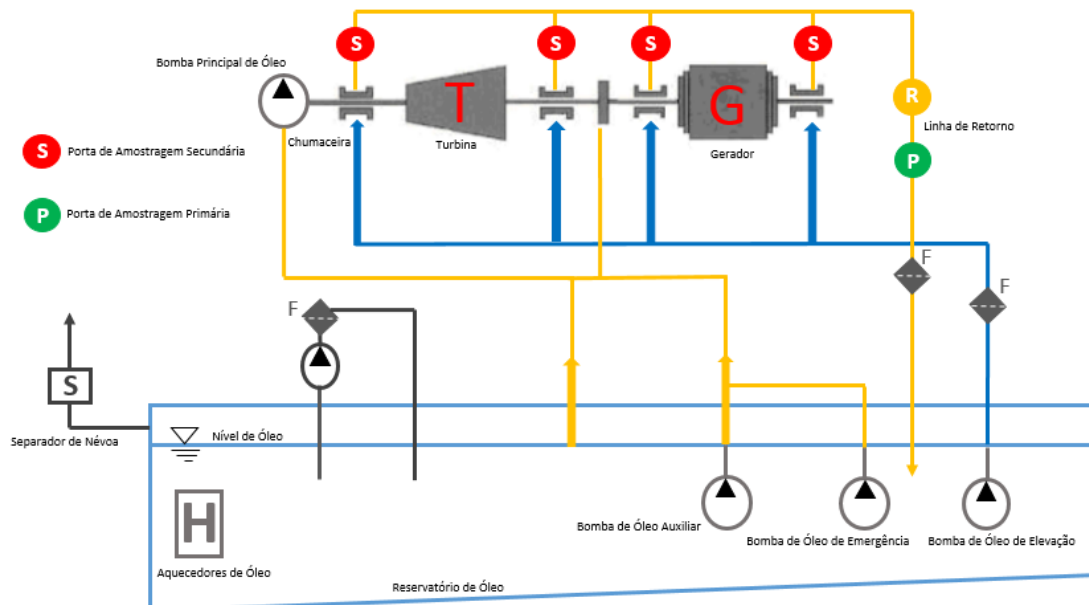


Figura 3.32: Sugestão de ampliação do conjunto de portas de amostragem do sistema de lubrificação da turbina SST-800, a operar no CIFF

Ainda a suportar a sugestão de melhoria acima referida pode mencionar-se o resultado de uma sondagem realizada pela revista *Machinery Lubrication* [52], onde se concluiu que 71% dos profissionais de lubrificação modificaram os seus equipamentos para inclusão de pontos de amostragem secundários, com assinaláveis benefícios, quer técnicos quer económicos, que poderão ser trazidos por este tipo de solução.

Para concluir, é ainda importante salientar que, relativamente à viabilidade financeira desta solução, o seu custo é considerado marginal face ao valor da informação técnica que pode fornecer.

4. Conclusões

Neste capítulo expõem-se os objetivos propostos inicialmente e as contribuições do presente trabalho na melhoria dos processos de manutenção condicionada por análise de óleos, efetuados no turbogerador TG4, a operar no CIFF. Também se sumarizam os possíveis avanços tecnológicos, quer na área da manutenção condicionada quer na área da tribologia, que poderão ser aplicados em massa nas indústrias, com propósitos de crescente competitividade e decrescente impacto ambiental das mesmas.

4.1. Contribuições

Com base nos três objetivos propostos no capítulo 1, ao longo do presente trabalho conseguiu-se efetuar:

- o estudo detalhado dos métodos de Manutenção Condicionada por Análise de Óleos em Serviço, bem como identificá-los e aplicá-los ao caso prático de uma turbina a vapor, presente numa unidade industrial de referência;
- o tratamento de dados provenientes de análises feitas ao óleo em serviço da mesma turbina, que permitiu ter uma visão geral da monitorização operacional do equipamento e do seu sucesso na extensão da vida útil do mesmo e do óleo que o lubrifica;
- com base no tratamento dos dados das análises e no estudo detalhado do sistema de lubrificação, justificar duas sugestões de melhoria: uma que maximizará a representatividade das amostras de óleo, recolhidas para efeito da sua manutenção condicionada, envolvendo a uniformização de intervalos de amostragem; e outra, apontando para uma melhor identificação do local da possível origem de alguma anomalia, por ampliação do conjunto de portas de amostragem presentes no equipamento.

Apesar de não possuírem qualquer carácter disruptivo, estas propostas poder-se-ão revelar extremamente úteis na melhoria contínua do processo de monitorização e de manutenção condicionada do equipamento, numa altura em que as crescentes necessidades e competitividade do mercado exigem cada vez mais das capacidades dos equipamentos industriais. Estas medidas de melhoria exploram ainda mais os benefícios provenientes de um programa de análise de óleos, permitindo a elaboração e planificação de ações corretivas no tempo correto, aumentando a disponibilidade e o desempenho operacional da turbina.

Ao pôr em prática estas sugestões de melhoria, para além de um possível aumento de vida útil do equipamento e do óleo que o lubrifica, o CIFF poderá daí retirar mais vantagens de teor operacional e financeiro, ao:

- diagnosticar precocemente e localmente a falha;
- prevenir a avaria;

- maximizar a eficiência operacional do equipamento;
- garantir a segurança operacional;
- reduzir custos e tempo de inatividade devido a avaria;

4.2. Perspetivas Futuras

Hoje em dia, existe uma extrema pressão operacional nos equipamentos, não só para consumirem menos e assim economizar mais energia, mas também para que possuam componentes que assegurem as maiores vidas úteis económicas. A tribologia terá, como sempre, e no futuro mais do que nunca, um papel fundamental nessa temática.

Nesse sentido, deverão ser futuramente estudadas, quer a nível académico quer a nível industrial, soluções que estejam em linha com a maior eficiência dos equipamentos na minimização do atrito e do desgaste, e na sustentabilidade das operações industriais, por forma a conseguir uma maior produtividade num futuro mais competitivo e ecológico.

Um dos exemplos mais significativos será a integração do conceito de “indústria 4.0” com a Tribologia, provavelmente com uma conexão mais direta através das tecnologias de informação e comunicação. Dados operacionais de contatos tribológicos são transferidos e analisados facilmente com a utilização da internet e redes *wireless*, integrando todos os equipamentos entre si, através de vários dispositivos eletrónicos [53].

Zhu et al. conduziu um estudo onde concluiu que a monitorização da condição dos óleos lubrificantes e dos equipamentos lubrificadas, em tempo real com a utilização de sistemas de sensores *online*, pode eficazmente reduzir os custos operacionais, ao reduzir os custos de inspeções e ações de manutenção calendarizadas [54].

Geralmente, a monitorização das propriedades físico-químicas e da condição do óleo é executada, ou através de sensores *offline*, ou através da recolha de amostras físicas no sistema de lubrificação que têm de ser posteriormente analisadas em laboratório, como se viu anteriormente neste documento.

Apesar destes processos *offline* oferecerem informação detalhada e precisa da condição operacional do óleo, os mesmos requerem muitas vezes a utilização de equipamento caro, profissionais especializados e levam algum tempo a ser executados. Além disso, estes procedimentos não fornecem informação em tempo real da condição do óleo e do equipamento, logo, em tempo útil para que se possam impedir falhas catastróficas durante a operação.

A eficiência de um programa de manutenção condicionada pode ser grandemente melhorada conectando várias máquinas em diversos locais numa fábrica, e monitorizando-as remotamente com sensorização *wireless*. A integração de todos os dados emitidos pelos vários equipamentos via *cloud* permite sincronizar o processo de manutenção com a operação geral.

Assim, aplicando-se este conceito de *e-maintenance* [55] a análises de óleos em serviço, com uso de um sistema integrado de sensores *online* ligados por uma rede sem fios (WSN – Wireless Sensor Networks) pode-se efetivamente efetuar a monitorização e acompanhamento da condição do óleo e do equipamento em tempo real, permitindo a deteção precoce da falha potencial, um aumento da sua fiabilidade e eficiência, constituindo assim uma vantagem quer a nível económico, quer a nível operacional para a indústria [54].

Esta integração de sistemas de sensores ligados entre si, via internet, tem de ser acompanhada não só com o contínuo desenvolvimento de bases e redes de dados tribológicos, como também com o desenvolvimento de modelos inteligentes que consigam analisar e interpretar com eficácia os dados obtidos, minimizando cada vez mais os custos de mão-de-obra [53].

Para além da transição digital, que mesmo na área da manutenção e da tribologia se pode evidenciar como um fator de crescente competitividade, também o tema da sustentabilidade ganha bastante relevo quer nos tempos atuais, quer para o futuro próximo.

Agora, as preocupações das indústrias deixam de ser apenas económicas e passam também a ser ambientais. A dependência gritante dos combustíveis fósseis é uma das fraquezas da sociedade moderna e como tal, mesmo no campo da tribologia, pequenos avanços sustentáveis têm vindo a ser estudados. Recentemente, foi introduzido o termo de tribologia verde (*Green Tribology*), representando a área de estudo responsável pelos avanços sustentáveis na área da tribologia.

Nesses avanços está incluído o desenvolvimento de fluidos lubrificantes facilmente recicláveis ou de outros fluidos renováveis, ou reproduzíveis, que, devidamente trabalhados, possam efetuar a atividade de lubrificação, como a água, o nitrogénio ou o hidrogénio, ajudando na tão necessária transição dos óleos minerais para lubrificantes menos nocivos para o meio ambiente [53] [56] [57].

Nesse sentido, está ainda a ser estudada a possibilidade de se desenvolverem sistemas tribológicos ambientalmente benignos, passando pelo estudo de revestimentos de superfície de alta resistência e dureza e baixo coeficiente de atrito, eliminando totalmente a necessidade de utilização de lubrificantes e seus aditivos, alguns deles conhecidos como sendo altamente tóxicos para o meio ambiente [56].

Referências Bibliográficas

- [1]Spinerg - Soluções para Energia, S.A. (2º Trimestre de 2019). Lubrificantes para Turbinas. *Revista Manutenção N°141*, pp. 66-69.
- [2]Kamal, G. (March 2013). In-Service Condition Monitoring of Turbine Oils. *Second Middle East Turbomachinery Symposium*. Doha, Qatar.
- [3]Graça, B., Sousa, P., & Seabra, J. (1º Trimestre 2013). Análise de Lubrificantes em Turbinas a Vapor - Um caso de estudo. *Revista Manutenção*.
- [4]Instituto Português da Qualidade. (Setembro de 2007). Norma Portuguesa - NP EN 13306 Terminologia da Manutenção.
- [5]Mishra, R.C., Reliability and Maintenance Engineering, New Age International(P)Ltd, New Delhi,2006, 96.
- [6]Shenoy, D., & Bhadury, B. (1998). *Maintenance Resources Management: adapting MRP*. Taylor & Francis.
- [7]Wright, J. (s.d.). *The Evolution of Industrial Maintenance*. Obtido em 11 de Abril de 2020, de Web site da Advanced Technology Services, Inc.: <https://www.advancedtech.com/blog/evolution-of-industrial-maintenance/>.
- [8]Assis, R. (1997). *Manutenção Centrada na Fiabilidade - Economia das Decisões*. LIDEL.
- [9]Massala, D. C. (2018). *RAM Analysis applied to centrifugal gas compressors "Case study of an Oil and Gas Company"* - Thesis to obtain the Master of Science Degree in Mechanical Engineering. Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa, Departamento de Engenharia Mecânica.
- [10]Cabral, J. S. (1998). *Organização e Gestão da Manutenção - Dos Conceitos à Prática*. LIDEL.
- [11]Holmberg, K., & Erdemir, A. (Julho de 2017). Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Springerlink*.
- [12]Silva, F. P. (1985). *Tribologia - 1º Volume Noções Gerais*. Fundação Calouste Gulbenkian.
- [13]Miller, R.W. (1993). *Lubricants and their Applications*. McGraw-Hill.
- [14]Troyer, D., & Fitch, J. (1999). *Oil Analysis Basics*. Noria Corporation.
- [15]APETRO. (19 de Novembro de 2012). *Informação Lubrificantes*. Obtido em 16 de Abril de 2020, de Página Web da APETRO: <https://www.apetro.pt/noticias/inf-13-lubrificantes/223>.
- [16]Mobil Oil Portuguesa. (1971). *Fundamentos da Lubrificação - Coleção Técnica Mobil* (1ª ed., Vol.3).
- [17]Mang, T., & Dresel, W. (2007). *Lubricants and Lubrication* (2ª ed.). Wiley - VCH.

- [18]Sander, J. (2012). Steam Turbine Oil Challenges. *Lubrication Engineers White Paper*. Obtido de <https://www.l Lubricants.com/newsroom/white-papers/>.
- [19]Flores, P. & Claro, J. C. P. (2005). Cinemática dos Mecanismos, obtido de https://www.researchgate.net/publication/296332691_Introducao_ao_Estudo_de_Mecanismos.
- [20]Branco, C., Ferreira, J., Costa, J., & Ribeiro, A. (2005). *Projecto de Órgãos de Máquinas*. Fundação Calouste Gulbenkian.
- [21]Renk AG. (s.d.). *Produkte & Service*. Obtido em 12 de Outubro de 2020, de Web site da Renk AG: <https://www.renk-ag.com/de/produkte-service/produkte/gleitlager/horizontallager/uebersicht/>.
- [22]Bright Hub Engineering. (s.d.). *Rolling Element Bearings or Anti-Friction Bearings*. Obtido em 12 de Outubro de 2020, de Web site de Bright Hub Engineering: <https://www.brighthubengineering.com/machine-design/12886-rolling-element-bearings-or-anti-friction-bearings/>.
- [23]SKF Group. "SKF Lubrication Management." (2011), pp. 2-3.
- [24]Queijo, J. P. (2017). *Lubrificação de Equipamentos: Plano de manutenção preventiva numa indústria de mobiliário*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [25]Dufresne, P. (s.d.). *Creating an Effective Plant Lubrication Program*. Obtido em 8 de Julho de 2020 de: <http://media.noria.com/sites/WhitePapers/WPFILES/Trico3.pdf>.
- [26]Graça, B. (2012). Análise de Lubrificantes: redução de custos e recursos na manutenção industrial. *Revista Manutenção*, nº 112.
- [27]Fitch, J. (Março de 2001). Vacuum Dehydrators Explained and Illustrated. *Practicing Oil Analysis*.
- [28]Cash, W. (Outubro de 2012). The Importance of Dirt-Holding Capacity in Oil Filters. *Machinery Lubrication*.
- [29]Troyer, D., & Fitch, J. (Setembro de 2004). The Basics of Used Oil Sampling. *Practicing Oil Analysis*.
- [30]Troyer, D., & Fitch, J. (Agosto de 2011). Setting Limits and Targets for Effective Oil Analysis. *Machinery Lubrication*.
- [31]MAN Energy Solutions. (s.d.). *Steam Turbine and Expander Service*. Obtido em 19 de Maio de 2020, de Web site da MAN Energy Solutions: https://primeserv.man-es.com/compressors_turbomachineries/steam-turbines-expanders/steam-glance.
- [32]Hannon, J. (Março de 2002). Performance Evaluation of New and In-Service Turbine Oils. *Practicing Oil Analysis*.
- [33]Spoonmore, K. (Junho de 2019). Oxidation: Why Good Oil Turns Bad. *Machinery Lubrication*.

- [34]Cash, W. (Agosto de 2016). Can Defoamant Additives Be Filtered? *Machinery Lubrication*.
- [35]Lobo, M. (2018). *Artigos, Tribologia*. Obtido em 8 de Julho de 2020, de ALS Global: <https://alsglobal.blog/espuma-no-oleo-lubrificante-solucoes/>.
- [36]Noria Corporation. (Outubro de 2012). Base Oil Groups Explained. *Machinery Lubrication*.
- [37]Mobil. (2009). *Turbine Oil Condition Monitoring*. Technical Training Guide.
- [38]Livingstone, G., Ameye, J., & Thompson, B. (Maio de 2010). Rethinking Condition Monitoring Strategies for Today's Turbine Oils. *Machinery Lubrication*.
- [39]Mobil. (2016). *Laboratory tests for steam and gas turbine oils*. Technical Topic.
- [40]Huysman, W. Utilizing Analytical Ferrography for Root Cause Analysis and Failure Prevention. Reliability web.
- [41]The Navigator Company (2018). *Estudo de Impacte Ambiental - Nova Caldeira a Biomassa da Navigator Pulp Figueira*.
- [42]The Navigator Company. (2018). *Nova Caldeira a Biomassa da Navigator Pulp Figueira*. Procedimento de Avaliação de Impacte Ambiental, The Navigator Company.
- [43]Couto, A. (2015). *Estudo de viabilidade de sistema de autoconsumo industrial com cogeração*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [44]Siemens AG. (2019). *Siemens Steam Turbine Portfolio - Steam Turbines from 10 kW to 1900 MW*. Siemens AG, Gas and Power, Erlangen, Alemanha. Obtido em 12 de Junho de 2020, de [siemens.com/steamturbines](https://www.siemens.com/steamturbines).
- [45]Coelho, M., Gouveia, J., & Monteiro, J. (2014). *Relatório Inspeção das 25.000 horas Turbina Siemens 76679 – TG4*. Grupo Portocel Soporcel.
- [46]Siemens AG. (2010). *Manual de Operação (Rev.:00-08.06.2010)*. Documento da Instalação - Grupo turbo-alternador Soporcel 76679.
- [47]Burke, J. (19 de Abril de 2017). *Siemens Delivers Steam Turbine For CCP In Kuwait*. Obtido em 13 de Junho de 2020, de Diesel and Gas Turbine Worldwide: <https://dieselgasturbine.com/siemens-delivers-steam-turbine-ccp-kuwait/>.
- [48]Siemens AG. (2007). *List of approved turbine oils according to TLV 9013 04*. Power Generation.
- [49]Castrol. (2019). *Product Data - Perfecto X Range*.
- [50]Fitch, B. (Junho de 2014). Anatomy of a Representative Oil Sample: Part 3 - Sampling Frequency and Location. *Machinery Lubrication*.
- [51]Cash, W. (Agosto de 2014). Why One Oil Sampling Point Isn't Always Enough. *Machinery Lubrication*.

[52]Cash, W. (Fevereiro de 2013). Sampling is Key to Oil Analysis Accuracy. *Machinery Lubrication*.

[53]Ciulli, E. (Setembro de 2019) Tribology and Industry: From the Origins to 4.0. *Front. Mech. Eng.* 5:55. doi: 10.3389/fmech.2019.00055.

[54]Zhu, X., Zhong, C., & Zhe, J. (2017). Lubricating oil conditioning sensors for online machine health monitoring - A review. *Tribology International*.

[55]Krupitzer, C., Wagenhals, T., Zufle, M., Lesch, V., Schafer, D., Mozaffarin, A., . . . Kounev, S. (2020). *A Survey on Predictive Maintenance for Industry 4.0*.

[56]Perry, S. S., & Tysoe, W. T. (2005). Frontiers of fundamental tribological research. *Tribology Letters, Vol.19* .

[57]Kato, K. (2013). Tribology in the past and future. *Mechanical Engineering Reviews, JSME* .

Anexos

Anexo A – Elementos detetados em óleos de turbina e respetivas origens

Elementos	Origem
Alumínio (Al)	<ul style="list-style-type: none">• Desgaste de Chumaceiras• Desgaste de outros componentes estruturais
Cálcio (Ca)	<ul style="list-style-type: none">• Aditivos Detergentes• Contaminação por água
Chumbo (Pb)	<ul style="list-style-type: none">• Revestimento (Metais Brancos) de Chumaceiras• Resíduos de Tintas
Cobre (Cu)	<ul style="list-style-type: none">• Revestimento (Metais Brancos) de Chumaceiras• Desgaste de Componentes de Bronze
Cromo (Cr)	<ul style="list-style-type: none">• Desgaste de Chumaceiras• Desgaste do Rotor da Turbina
Enxofre (S)	<ul style="list-style-type: none">• Aditivos EP
Estanho (Sn)	<ul style="list-style-type: none">• Desgaste de Chumaceiras (tipicamente, junto com o Cobre)
Ferro (Fe)	<ul style="list-style-type: none">• Desgaste do Rotor da Turbina• Desgaste de Engrenagens
Fósforo (P)	<ul style="list-style-type: none">• Aditivos AW
Magnésio (Mg)	<ul style="list-style-type: none">• Aditivos Detergentes• Resíduos do Líquido de Refrigeração• Contaminação por água
Níquel (Ni)	<ul style="list-style-type: none">• Desgaste de Chumaceiras• Desgaste do Rotor da Turbina
Silício (Si)	<ul style="list-style-type: none">• Aditivos Anti-Espuma• Poeiras Exteriores
Sódio (Na)	<ul style="list-style-type: none">• Aditivos Detergentes• Resíduos de Anticongelante• Contaminação por água
Titânio (Ti)	<ul style="list-style-type: none">• Desgaste de Pás da Turbina
Zinco (Zn)	<ul style="list-style-type: none">• Desgaste de componentes galvanizados com Zinco

Anexo B – Características Típicas do Óleo Castrol Perfecto X46

Nome	Método	Unidades	X46
Densidade @ 15°C	ISO 12185 / ASTM D4052	kg/m ³	863
Viscosidade cinemática @ 40°C	ISO 3104 / ASTM D445	mm ² /s	46
Viscosidade cinemática @ 100°C	ISO 3104 / ASTM D445	mm ² /s	7.0
Índice Viscosidade	ISO 2909 / ASTM D2270	-	112
Sequência I Espuma - tendência / estabilidade	ISO 6247 / ASTM D892	ml/ml	10/0
Libertação de ar @ 50°C	ISO 9120 / ASTM D3427	min	3
Demulsificação - método de vapor	IP 19	seg.	100
Separação de água @ 54°C (40/37/3)	ISO 6614 / ASTM D1401	min	10
Ponto de fluxão	ISO 3016 / ASTM D97	°C	-12
Ponto de inflamação- vaso aberto	ISO 2592 / ASTM D92	°C	220
Número de acidez	ISO 6619 / ASTM D664	mgKOH/g	0.1
Teste ferrugem - água salgada (24 hrs)	ISO 7120 / ASTM D665B	-	Passa
Estabilidade Oxidação - Pressão rotativa	ASTM D2272	min	>1,300
Corrosão ao Cobre (3 hrs @ 100°C)	ISO 2160 / ASTM D130	Rating	1b

Anexo C – Relatório Modelo de Análise de Óleos

predict

Equipment Condition Report



Diagnóstico Global
NORMAL

BPCM

Máquina ID:	Turbine Test	Lubríf. (h/km):	Nº Amostra Lab.:	GP12952
Descrição:	Turbine	Máquina (h/km):	Nº Etiqueta:	
Fabricante:		Filtro (h/km):	Nº de Ref. Máquina:	LGD4007
Nº Encasamento:		Capacidade (l):	Data de Amostra:	07/02/2020
Lubrificante:	-	Atasco (l):	Data de Recolha:	07/02/2020

GP12952
07/02/2020

Comentários sobre a condição do lubrificante:

Comentários sobre a condição do equipamento:

Recomendações:

Data do Relatório: 07/02/2020 |

As recomendações são unicamente indicativas e baseadas na suposição de que os dados fornecidos do equipamento são precisos e que a amostra retirada é representativa.

Testes	Método	Unidade	Resultados
GP12952			
ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA			
Cor	ASTM-D1500	-	
Aspecto visual	OMS 13662	-	
Conteúdo água	ASTM-D6304	ppm	
Viscosidade Cinemática @40°C	ASTM-D445	mm ² /s	
Ponto de inflamação (COC)	ASTM-D92	°C	
Acidez (AN)	ASTM-D954	mg KOH/g	
FT-IR Oxidação	ASTM-E2412	A/cm	
Microfiltração 0.45 µm	ASTM-D4899	mg/100 mL	
Demulsibilidade (P18)	P18	sec	
Libertação de ar (AR)	DIN ISO 9120	min.	
Espuma - Sequência I	ASTM-D992	mL / mL	
PO - Índice de desgaste	OMS 14456	-	
Corrosão ao cobre	ASTM-D130	Klasse	
Corrosão de aço - A	ASTM-D855A	pass/no-pass	
Antioxidante amínico	ASTM-D6971	%	
Antioxidante fenólico	ASTM-D6971	%	
MPC - Índice de E	ASTM-D7843	None	
MPC - a (valor vermelho)	ASTM-D7843	None	
MPC - b (valor amarelo)	ASTM-D7843	None	
MPC - Luminoscência	ASTM-D7843	None	
ANÁLISE ESPECTROMETRIA			
Alumínio (Al)	ASTM-D6185	ppm	
Bário (Ba)	ASTM-D6185	ppm	
Cálcio (Ca)	ASTM-D6185	ppm	
Cl	ASTM-D6185	ppm	
Cromo (Cr)	ASTM-D6185	ppm	
Cobre (Cu)	ASTM-D6185	ppm	
Ferro (Fe)	ASTM-D6185	ppm	
Magnésio (Mg)	ASTM-D6185	ppm	
Manganês (Mn)	ASTM-D6185	ppm	
Molibdênio (Mo)	ASTM-D6185	ppm	
Sódio (Na)	ASTM-D6185	ppm	
Níquel (Ni)	ASTM-D6185	ppm	
Fósforo (P)	ASTM-D6185	ppm	
Chumbo (Pb)	ASTM-D6185	ppm	
Silício (Si)	ASTM-D6185	ppm	
Estanho (Sn)	ASTM-D6185	ppm	
Zinco (Zn)	ASTM-D6185	ppm	
Potássio (K)	ASTM-D6185	ppm	
Enxofre (S)	ASTM-D6185	ppm	
Antimônio (Sb)	ASTM-D6185	ppm	
Telúrio (Te)	ASTM-D6185	ppm	
Vanádio (V)	ASTM-D6185	ppm	
ÍNDICE DE DESGASTE			
Densidade óptica - grande	OMS 13675	-	
Densidade óptica - pequena	OMS 13675	-	
WPC - Índice de desgaste	OMS 13675	-	
% Partículas grandes	OMS 13675	%	
FERROGRAFIA ANALÍTICA			
PARTÍCULAS FERROSAS			
Desgaste normal (FW-NR)	ASTM-D7690	µm max.	
Índice desgaste normal (FW-NR)	ASTM-D7690	-	
Escorregamento severo (FW-SS)	ASTM-D7690	µm max.	
Índice escorregamento severo (FW-SS)	ASTM-D7690	-	
Corde (FW-AW)	ASTM-D7690	µm max.	
Índice corde (FW-AW)	ASTM-D7690	-	

Testes	Método	Unidade	Resultados GP12952
Pedaços de fadiga (FW-FC)	ASTM-D7690	µm max.	
Índice pedaços de fadiga (FW-FCI)	ASTM-D7690	-	
Escala de fadiga (FW-FF)	ASTM-D7690	µm max.	
Índice escala de fadiga (FW-FFI)	ASTM-D7690	-	
Esteras (FW-S)	ASTM-D7690	µm max.	
Índice esteraz (FW-SI)	ASTM-D7690	-	
Índice óxido escuro (FW-DO)	ASTM-D7690	-	
Índice óxido vermelho - fumaça (FW-RO)	ASTM-D7690	-	
Índice desgaste corrosivo (FW-Cor)	ASTM-D7690	-	
Índice de desgaste lento (FW-SI)	ASTM-D7690	-	
PARTÍCULAS NÃO-FERROSAS			
Liga metal branco (NFW-WM)	ASTM-D7690	µm max.	
Índice liga metal branco (NFW-WMI)	ASTM-D7690	-	
Ligas de cobre (NFW-Cu)	ASTM-D7690	µm max.	
Índice ligas de cobre (NFW-CuI)	ASTM-D7690	-	
Índice desgaste não ferroso (NFW-SI)	ASTM-D7690	-	
CONTAMINANTES			
Índice partículas cristalinas (Con-CPI)	ASTM-D7690	-	
Índice partículas amorfas (Con-API)	ASTM-D7690	-	
Índice polímeros de fricção (Con-FPI)	ASTM-D7690	-	
Índice fibras (Con-FIB)	ASTM-D7690	-	
Índice outros contaminantes (Con-OCI)	ASTM-D7690	-	
Índice de contaminação (Con-SI)	ASTM-D7690	-	
PARTICLE COUNT			
Contagem automática de partículas - ISO	ISO 4406	Class	
Número de partículas ($\geq 4 \mu\text{m}$)	ISO 4406-2	#/mL	
Número de partículas ($\geq 6 \mu\text{m}$)	ISO 4406-2	#/mL	
Número de partículas ($\geq 14 \mu\text{m}$)	ISO 4406-2	#/mL	
Número de partículas ($\geq 21 \mu\text{m}$)	ISO 4406-2	#/mL	
Número de partículas ($\geq 38 \mu\text{m}$)	ISO 4406-2	#/mL	
Número de partículas ($\geq 70 \mu\text{m}$)	ISO 4406-2	#/mL	

Anexo D – Tabela Resumo Frequência de Amostragem

Datas	Viscosidade Cinemática a 40°C	Código de Limpeza ISO	TAN	Conteúdo de água pelo método de KF	ICP ("só metais de desgaste")	MPC	FTIR	RULER	ICP ("completa")	Ferrografia	Tendência e Estabilidade de Espuma (Seq.: 1)
2015/06/04	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2015/07/27	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2015/12/22	X	X	X	X	X		X				
2016/02/26	X	X	X	X	X		X				
2016/05/05	X	X	X	X	X		X				
2016/06/07	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
2016/08/22	X	X	X	X	X		X				
2016/11/08	X	X	X	X	X		X				
2016/11/30	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2017/02/08	X	X	X	X	X		X				
2017/05/12	X	X	X	X	X		X				
2017/07/26	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
2017/11/15	X	X	X	X	X		X				
2017/12/27	X	X	X	X	X	X	X		X	X	
2018/01/26	X	X	X	X	X		X				
2018/05/29	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
2018/08/10	X	X	X	X	X		X				
2018/11/05	X	X	X	X	X		X				
2019/02/04	X	X	X	X	X		X				
2019/05/13	X	X	X	X	X		X				
2019/05/28	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2019/08/09	X	X	X	X	X		X				
2019/10/07	X	X	X	X	X	X		X	X		
2019/10/12	X	X	X	X	X						
2019/10/23	X	X	X	X	X		X				
2019/12/20	X	X	X	X	X	X			X	X	
2020/02/13	X	X	X	X	X		X				