U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

Continental

Plataforma de Lubrificação - Linha de Misturação

Análise da Monitorização da Condição de uma Caixa Redutora da Nova Linha de Misturação da Continental Mabor

Bruno Miguel Alves Ribeiro

Dissertação submetida à
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
para obtenção do grau de:

Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador na FEUP:
Doutor Luís Andrade Ferreira
(Professor Associado)

Orientador na CONTINENTAL:
Bruno Nunes
(Diretor do Departamento de Engenharia - Misturação)

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, setembro de 2020

O trabalho apresentado nesta dissertação foi desenvolvido na
Fábrica de Lousado da Continental Mabor
Departamento de Engenharia 1
Continental Mabor - Indústria de Pneus, S.A.
Lousado, Portugal.

Bruno Alves Ribeiro
up201505661@fe.up.pt

Resumo

Nas últimas décadas, tem-se assistido a uma grande transformação da manutenção industrial, devida, principalmente, à aplicação de novas tecnologias capazes de otimizar cada vez mais os processos produtivos das empresas. A manutenção assume um papel fundamental na definição da estratégia de uma empresa, e a monitorização da condição de um equipamento desempenha uma função relevante na manutenção baseada na condição, que é considerada a estratégia mais eficiente para manutenção em todos os setores.

O objetivo principal da presente dissertação é analisar a monitorização da condição de uma caixa redutora da nova linha de misturação da Continental Mabor.

Inicialmente, descreve-se o Grupo Continental AG, com particular enfoque na empresa Continental Mabor, empresa onde esta dissertação foi realizada. Descreve-se o Sistema Produtivo da Continental Mabor, dando especial atenção à etapa de Misturação. De seguida, descreve-se e analisa-se a metodologia estruturada RCM. Esta análise começa com a apresentação da análise FMEA e FMECA, e termina com a descrição e análise do diagrama de decisão RCM. Posteriormente, aborda-se a Monitorização da Condição, descrevendo a monitorização da vibração e do óleo. A monitorização do óleo é centrada na análise das partículas presentes no mesmo. Deste modo, realiza-se uma análise de desgaste, explorando os diferentes métodos de análise de desgaste. O caso de estudo é apresentado, aplicando a metodologia FMECA à caixa redutora do andar superior de misturação e estabelecendo as ações recomendadas de acordo o diagrama de decisão RCM. Através da análise FMECA conclui-se que os componentes mais críticos são as engrenagens, rolamentos e veios, contribuindo em 80% para a criticidade global do sistema. A aplicação do diagrama de decisão RCM revelou que todos os modos de falha deveriam ser tratados com técnicas de manutenção condicionada. No caso das engrenagens e rolamentos devem monitorizar-se as vibrações e as partículas de desgaste, enquanto que no caso dos veios apenas se devem monitorizar as vibrações. O método de monitorização das partículas de desgaste selecionado foi a contagem de partículas, e estabelece-se o sistema de monitorização do teor de condensados, com a seleção de um sensor de humidade. Por fim, elabora-se o plano base de lubrificação da caixa redutora.

Em suma, o trabalho desenvolvido permitiu concluir que a metodologia RCM é útil para estabelecer o procedimento que visa garantir que um determinado equipamento continua a cumprir a sua função. No que concerne à monitorização da condição, foi possível concluir que esta aumenta a fiabilidade da operação, tempo de operação da máquina, redução de danos consequentes e melhoria da eficiência operacional a um custo operacional mais baixo. A monitorização da condição realiza-se através da análise de determinados parâmetros, tais como, vibração, temperatura e óleo. Foram apresentadas várias propostas de trabalhos futuros que complementam o trabalho desenvolvido e podem contribuir para otimizar/melhorar a análise da monitorização da condição realizada.

Palavras-chave: Análise RCM, FMECA, Manutenção, Lubrificação, Caixa Redutora, Monitorização da Condição, Análise de desgaste

Abstract

During the last few decades, industrial maintenance has been the subject of great transformation, mainly due to the use of new technologies, capable of continuous production process optimization. Maintenance plays a key role in defining a company's strategy and monitoring the equipment condition plays a decisive role in Condition-Based Maintenance, which is considered the most efficient strategy for maintenance in all sectors.

The main objective intended in this dissertation is the analysis of the condition monitoring of the gearboxes within Continental Mabor's new mixing line.

At first, Continental AG group is described, with particular emphasis being given on Continental Mabor, where this dissertation was made. Continental Mabor's Productive System is described, with a special focus on the Mixing stage. Afterwards, the RCM's structured methodology is both described and analysed. The analysis starts with a presentation of the FMEA and FMECA and finishes by describing and analysing the RCM decision diagram. Subsequently, the stage of Condition Monitoring is discussed, describing both oil and vibration monitoring. The oil analysis is centred on the analysis of the particles contained within it. Consequently, a wear analysis is carried out exploring different wear analysis methods. The case study is presented, applying the FMECA methodology to the gearbox of the upper mixing floor, and establishing the recommended actions, according to the RCM decision diagram. Through the FMECA analysis it is concluded that the critical components are gears, bearings and shafts, which account for 80% of the system's global criticality. The application of the RCM decision diagram disclosed that all failure modes should be dealt with by using conditioned maintenance techniques. In the case of gears and bearings, vibrations and wear particles should be monitored, whilst in the case of shafts, only vibrations should be monitored. The selected method to monitor particle wear was particle counting, and a condensate content monitoring system was established, by selecting a humidity sensor. Finally, the gearbox's base lubrication plan is drawn up.

To summarize, the work developed allowed to conclude that the RCM methodology is useful to establish the procedure aiming to ensure that a given piece of equipment continues to fulfil its assigned function. Regarding condition monitoring, it was concluded that it increases operation reliability, operating machine time, consequential damage reduction and operational efficiency improvement while carrying lower operational cost. Condition monitoring is performed through the analysis of certain parameters, such as vibration, temperature and oil. Several proposals for ensuing work were presented aiming the further advancement of the current work that may well contribute to optimize/improve the analysis of the condition monitoring performed.

Keywords: RCM Analysis, FMECA, Maintenance, Lubrication, Gearbox, Condition Monitoring, Wear analysis

Dedicada ao meu avô, Albano.

'Our greatest weakness lies in giving up. The most certain way to succeed is always to try just one more time.'

Thomas Edison

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço ao Professor Doutor Luís Andrade Ferreira por ter aceite ser o meu orientador por parte da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Agradeço-lhe a disponibilidade, acompanhamento, sabedoria, toda a motivação e confiança depositada. As diversas reuniões que fomos tendo ao longo destes oito meses, contribuíram para o sucesso deste projeto, mas sobretudo para o meu desenvolvimento pessoal.

À Continental Mabor agradeço a oportunidade oferecida para realizar um estágio em contexto empresarial. Agradeço a todos os profissionais da Direção de Engenharia 1, em particular ao engenheiro Bruno Nunes, por me ter acolhido na Continental Mabor, e por me ter atribuído um tema bastante desafiante e relevante para a empresa. Agradeço ainda pelas diversas trocas de palavras e opiniões, que contribuíram fortemente para o meu desenvolvimento profissional. Agradeço aos engenheiros Paulo Rodrigues, Pedro Campos e Rafael Manso por estarem sempre disponíveis para fornecer informações e conhecimentos, e ao senhor Horácio Costa pelo esclarecimento de todas as questões práticas relacionadas com a linha de misturação.

Agradeço também ao professor Doutor Jorge Seabra e à engenheira Beatriz Graça, que sempre se mostraram disponíveis para me auxiliar na área das partículas de desgaste.

Por fim, a nível académico, não posso deixar de agradecer ao Professor Doutor Paulo Tavares de Castro pela sua disponibilidade e prontidão em esclarecer as minhas dúvidas, e por todos os conselhos providenciados ao longo destes últimos anos.

Um agradecimento especial à minha família, por estarem sempre presentes, por me apoiarem e incentivarem de forma incondicional. Aos meus pais, Armando e Carminda, agradeço todos os sacrifícios que fazem pela nossa família, pelos conselhos e por me incutirem e demonstrarem o poder da resiliência e do trabalho. Aos meus avós quero agradecer por toda a ternura e proteção, principalmente ao meu avô Albano pelos sábios conselhos e por me ensinar o significado de respeito. Ao meu irmão, João, agradeço o companheirismo ao longo desta jornada e a troca de conhecimentos que provou ser essencial para alcançar momentos de sucesso. À minha irmã, Beatriz, agradeço a boa disposição e companhia.

Aos meus colegas de curso e amigos, devo os momentos inesquecíveis vividos ao longo destes cinco anos, a amizade e companheirismo, que ajudaram a ultrapassar os momentos menos fáceis deste percurso.

Quero deixar uma agradecimento particular ao Evandro e à Conceição, por toda a ajuda ao longo destes oito meses, por terem sido um suporte durante esta fase, através de carinho e motivação. A ambos e ao Vítor agradeço por me terem proporcionado um local de trabalho, aquando da passagem para trabalho remoto.

Por último, mas de forma muito especial, agradeço à Catarina pela sua presença constante, pelas suas palavras de motivação e pela sua incansável ajuda.

A todos, o meu sincero obrigado.

Bruno Alves Ribeiro

Conteúdo

Resumo **i**

Abstract **iii**

Agradecimentos **ix**

Lista de Figuras **xvii**

Lista de Tabelas **xxi**

Lista de acrónimos e siglas **xxiii**

1 Introdução **1**
1.1 Contextualização . . . 1
1.2 Continental Mabor . . . 2
1.3 Objetivos . . . 2
1.4 Estrutura da dissertação . . . 3

2 Descrição da Empresa **5**
2.1 Introdução . . . 5
2.2 Continental AG . . . 5
2.2.1 Cronologia . . . 5
2.2.2 Departamentos . . . 6
2.2.3 Localizações . . . 7
2.3 Continental Mabor . . . 7
2.3.1 Cronologia . . . 7
2.3.2 Política da Empresa, Visão e Missão . . . 9
2.3.3 Estrutura Organizacional . . . 10
2.3.3.1 Direção de Engenharia 1 . . . 10
2.3.4 Produto Final . . . 11

3 Descrição e Análise do Sistema Produtivo **13**
3.1 Introdução . . . 13
3.2 Descrição Geral do Sistema Produtivo . . . 13
3.2.1 Receção de Matérias-Primas . . . 15
3.2.2 Departamento I - Misturação . . . 16
3.2.3 Departamento II - Preparação . . . 17
3.2.4 Departamento III - Construção . . . 18
3.2.5 Departamento IV - Vulcanização . . . 20
3.2.6 Departamento V - Inspeção Final . . . 20

3.2.7 Armazenamento e expedição do Produto Acabado 21
3.3 Análise do processo de Misturação 22
3.3.1 Matérias-Primas 22
3.3.1.1 Óleos 22
3.3.1.2 Pigmentos 22
3.3.1.3 Borrachas 23
3.3.1.4 Enchedores 23
3.3.2 Linha de misturação 24
3.4 Conclusões 31

4 RCM - Manutenção Centrada na Fiabilidade 33
4.1 Introdução 33
4.2 Descrição da metodologia RCM 33
4.3 FMEA/FMECA - Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade 35
4.3.1 Cronologia 35
4.3.2 Conceitos 36
4.3.2.1 Modo de Falha 36
4.3.2.2 Efeito do Modo de Falha 37
4.3.2.3 Causa do Modo de Falha 38
4.3.3 FMEA 38
4.3.4 FMECA 39
4.3.5 Categorias de FMEA/FMECA 41
4.3.6 Procedimento para a execução 42
4.3.6.1 Escolha dos membros da equipa 44
4.3.6.2 Análise e hierarquização do sistema 44
4.3.6.3 Seleção do subsistema a analisar 45
4.3.6.4 Estudo funcional e seleção de um estado de funcionamento 45
4.3.6.5 Identificação de um modo potencial de falha 45
4.3.6.6 Identificação dos efeitos possíveis do modo de falha 45
4.3.6.7 Identificação das respetivas causas 46
4.3.6.8 Identificação dos métodos de deteção e de prevenção 46
4.3.6.9 Estimar a severidade dos efeitos do modo de falha em estudo 46
4.3.6.10 Estimar a probabilidade de ocorrência do modo de falha . 48
4.3.6.11 Estimar a probabilidade de deteção do modo de falha . . . 48
4.3.6.12 Análise da criticidade 49
4.3.6.13 Revisão do formulário e seleção das ações principais 50
4.3.7 Formulário 50
4.4 Diagrama de decisão RCM 53
4.4.1 Ações 53
4.4.1.1 Manutenção Preventiva 53
4.4.1.1.1 Manutenção Preventiva Sistemática 54
4.4.1.1.2 Manutenção Preventiva Condicionada 54
4.4.1.2 Manutenção Corretiva 57
4.4.1.3 Técnica de Deteção de Falhas 57
4.4.1.4 Técnica de Reprojeto 57
4.4.2 Descrição do diagrama de decisão 58
4.5 Conclusões 61

5 Monitorização da Condição 63
5.1 Introdução 63

5.2 Cronologia 64
5.3 Escolha das técnicas de monitorização da condição 65
5.4 Implementação de um sistema de monitorização da condição 66
5.4.1 Análise de custo-benefício 68
5.4.2 Auditoria de equipamentos 68
5.4.2.1 Identificação do equipamento 68
5.4.2.2 Identificação da função do equipamento 68
5.4.3 Auditoria de fiabilidade e criticidade 68
5.4.3.1 Diagrama de blocos de fiabilidade 68
5.4.3.2 Criticidade do equipamento 68
5.4.3.3 Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade 69
5.4.4 Seleção da estratégia de manutenção apropriada 69
5.4.5 Método de monitorização 69
5.4.5.1 Técnica de medição 69
5.4.5.2 Viabilidade da monitorização 69
5.4.5.3 Intervalo de monitorização 70
5.4.5.4 Locais de medição 70
5.4.5.5 Critérios iniciais de alerta/alarme 70
5.4.5.6 Dados da linha de base 70
5.4.6 Aquisição e análise de dados 71
5.4.6.1 Medição e tendências 71
5.4.6.2 Qualidade das medições 71
5.4.6.3 Comparação de medidas com critérios de alerta/alarme . . 71
5.4.6.4 Diagnóstico e prognóstico 71
5.4.6.5 Melhorar a confiança no diagnóstico e/ou prognóstico . . . 72
5.4.7 Determinação da ação de manutenção 72
5.4.8 Revisão 73
5.5 Monitorização da vibração 74
5.5.1 Introdução 74
5.5.2 Métodos de monitorização 74
5.5.2.1 Monitorização *on-line* 74
5.5.2.2 Monitorização *off-line* 74
5.5.3 Técnicas de análise de vibração 75
5.5.3.1 Análise no Domínio do Tempo 75
5.5.3.2 Análise no Domínio da Frequência 76
5.5.3.3 Análise pelo Nível Global de Vibrações 78
5.5.3.4 Demodulação 78
5.5.4 Fontes de vibração da caixa redutora 79
5.5.4.1 Vibrações das Engrenagens 79
5.5.4.1.1 Harmónicos de frequência de desmultiplicação do dente 79
5.5.4.1.2 Componentes fantasmas 81
5.5.4.1.3 Bandas laterais 82
5.5.4.1.4 Pequenos harmónicos à velocidade de rotação do rotor 82
5.5.4.1.5 Componentes de intermodulação 82
5.5.4.2 Vibrações do Veio 82
5.5.4.2.1 Desequilíbrio 82
5.5.4.2.2 Desalinhamento 83

5.5.4.2.3 Veio em flexão . . . 83
5.5.4.2.4 Fendas no veio . . . 83
5.5.4.3 Vibrações do Rolamento . . . 83
5.5.5 Transdutor . . . 84
5.5.5.1 Acelerómetro piezoelétrico . . . 84
5.5.6 Considerações finais sobre a monitorização da vibração nas Caixas Redutoras . . . 85
5.6 Monitorização do óleo . . . 87
5.6.1 Introdução . . . 87
5.6.2 Tipos de óleo lubrificante . . . 88
5.6.2.1 Óleos minerais . . . 88
5.6.2.2 Óleos sintéticos . . . 88
5.6.3 Viscosidade dos lubrificantes . . . 88
5.6.3.0.1 Viscosidade dinâmica: . . . 88
5.6.3.0.2 Viscosidade cinemática: . . . 89
5.6.4 Classificação dos Óleos Lubrificantes . . . 89
5.6.5 Lubrificação das caixas redutoras . . . 90
5.6.5.1 Lubrificação por salpico . . . 90
5.6.5.2 Lubrificação de circulação forçada . . . 91
5.6.6 Posição de monitorização . . . 93
5.6.6.1 Monitorização *on-line* e *in-line* . . . 93
5.6.6.2 Monitorização *off-line* . . . 93
5.6.7 Análise de desgaste . . . 94
5.6.7.1 Mecanismos de desgaste . . . 94
5.6.7.1.1 Desgaste abrasivo . . . 95
5.6.7.1.2 Desgaste adesivo . . . 96
5.6.7.1.3 Desgaste por fadiga . . . 97
5.6.7.1.4 Desgaste corrosivo . . . 97
5.6.7.2 Danos microscópicos . . . 98
5.6.7.3 Danos macroscópicos . . . 99
5.6.7.3.1 Geração de partículas . . . 100
5.6.8 Métodos de análise de desgaste . . . 101
5.6.8.1 Espectroscopia elementar . . . 101
5.6.8.2 Densidade ferrosa . . . 101
5.6.8.2.1 Ferrografia de leitura direta . . . 102
5.6.8.3 Contagem de partículas . . . 104
5.6.8.3.1 Bloqueio de luz . . . 104
5.6.8.3.2 Bloqueio de poros . . . 105
5.6.8.3.3 Indutivo . . . 106
5.6.8.4 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X . . . 108
5.6.8.5 Ferrografia analítica . . . 109
5.6.8.6 LaserNet Fines . . . 111
5.6.9 Considerações finais sobre a monitorização de óleo nas Caixas Redutoras . . . 113
5.7 Conclusões . . . 114

6 Caso de estudo **115**
6.1 Introdução . . . 115
6.2 Descrição do problema . . . 115

6.2.1 Descrição da caixa redutora . . . 115
6.2.2 Descrição do sistema de lubrificação da caixa redutora . . . 125
6.3 Análise FMECA . . . 129
6.3.1 Construção das tabelas . . . 129
6.3.1.1 Severidade dos efeitos do modo de falha . . . 129
6.3.1.2 Probabilidade de ocorrência do modo de falha . . . 130
6.3.1.3 Probabilidade de deteção do modo de falha . . . 131
6.3.1.4 Formulários FMECA . . . 131
6.3.2 Preenchimento dos formulários FMECA . . . 137
6.3.2.1 Método *Delphi* . . . 137
6.3.2.2 Base de dados/valores de referência . . . 138
6.3.2.3 Simplificação dos formulários FMECA . . . 139
6.3.3 Formulários FMECA sem contribuição dos controlos atuais . . . 139
6.3.3.1 Análise dos resultados . . . 145
6.3.3.2 Criticidade global . . . 149
6.3.4 Formulários FMECA com contribuição dos controlos atuais . . . 150
6.3.4.1 Análise dos resultados . . . 152
6.3.4.2 Criticidade global . . . 152
6.4 Ações recomendadas . . . 153
6.4.1 Ações recomendadas segundo os valores NPR - FMECA . . . 153
6.4.2 Ações recomendadas segundo o diagrama de decisão proposto - RCM 154
6.4.2.1 Descrição do diagrama de decisão proposto - RCM . . . 154
6.4.2.2 Aplicação do diagrama de decisão proposto . . . 158
6.4.2.2.1 Modos de falha 1.1, 2.1 e 3.1 . . . 159
6.4.2.2.2 Modo de falha 4.1 . . . 160
6.4.2.2.3 Modo de falha 5.1 . . . 161
6.4.3 Análise das técnicas de manutenção estabelecidas . . . 164
6.5 Monitorização das partículas de desgaste . . . 165
6.5.1 Introdução . . . 165
6.5.2 Seleção do método de monitorização das partículas de desgaste . . . 165
6.5.3 Contadores de partículas disponíveis no mercado . . . 172
6.5.4 Seleção do contador de partículas . . . 176
6.5.4.1 Sistema de contagem de partículas . . . 180
6.5.4.2 *Software* . . . 181
6.6 Monitorização do teor de condensados . . . 183
6.7 Plano base de lubrificação . . . 187

7 Conclusões e Trabalhos Futuros **195**
7.1 Conclusões . . . 195
7.2 Trabalhos Futuros . . . 197

Referências **199**

A Dados técnicos do óleo Shell Omala S4 GX 320 **213**

B Tabelas FMECA **217**

C Unidade de Lubrificação da Caixa Redutora **227**

D Catálogos Contadores de Partículas **229**

D.1 Contadores HYDAC 229
D.1.1 MCS 1000 229
D.2 Contadores FILTERTECHNIK 238
D.2.1 PC 9001 238
D.3 Contadores PARKER 242
D.3.1 IcountPD 242
D.3.2 Metallic Wear Debris Sensor 249
D.4 Contador PAMAS 252
D.4.1 PAMAS S50 252
D.5 Contador PRUFTECHNIK 255
D.5.1 WEARSCANNER 255

E Diferentes posições do Contador de Partículas **259**

F Catálogo Sensor Humidade **261**

G Plano de Lubrificação **265**

Lista de Figuras

2.1 Locais de presença da Continental AG [8]. 7
2.2 Fábrica Mabor em 1946 [9]. 8
2.3 Fábrica Mabor em 1990 [3]. 8
2.4 Fábrica Mabor em 2020 [3]. 9
2.5 Organigrama da Continental Mabor. 10
2.6 Principais elementos estruturais do pneu [11]. 11

3.1 Descrição das etapas do sistema de produção da Continental Mabor (Adaptado de [12]). 14
3.2 Representação esquemática do sistema de produção da Continental Mabor. 15
3.3 Exemplo de armazém de matérias-primas [13]. 16
3.4 Sala de misturação (Adaptado de [15]). 17
3.5 Cassetes de transporte das paredes [16]. 18
3.6 Máquina KM [16]. 19
3.7 Máquina PU, onde se observa o "pneu em verde" [16]. 19
3.8 Prensa de vulcanização [17]. 20
3.9 Inspeção visual de um pneu [18]. 21
3.10 Armazém de produto acabado [19]. 21
3.11 Esquema do processo de misturação. 22
3.12 Transportador-balança [22] 24
3.13 Misturador simples (Adaptado de [23]). 25
3.14 Misturador *Tandem* (Adaptado de [23]). 26
3.15 Sistema de acionamento do misturador (Adaptado de [22]). 26
3.16 Conjunto extrusora-calandra [23]. 27
3.17 Moinho de homogeneização [23]. 28
3.18 Marcação mecânica [22]. 28
3.19 Banho no tanque [22]. 29
3.20 *Loop* de composto [22]. 29
3.21 Ventiladores laterais [22]. 29
3.22 Transporte do composto para a zona de empilhamento [22]. 30
3.23 Sistema de empilhamento [22]. 30

4.1 Etapas do processo RCM (Adaptado de [26]). 34
4.2 Representação esquemática onde se observa a ação interna (modo de falha) e a ação externa (efeito). 38
4.3 Custos associados às diferentes fases de desenvolvimento de um produto (Adaptado de [40]). 40
4.4 Iterações entre as diferentes categorias FMEA (Adaptado de [42]). 42
4.5 Fluxograma da análise FMECA (Adaptado de [36]). 43

4.6 Curva P-F [25]. 56
4.7 Os diferentes potenciais de avaria que podem anteceder uma avaria [25]. . . 56
4.8 Diagrama de decisão RCM (Adaptado de [25]). 59

5.1 Cronologia das técnicas mais utilizadas para monitorizar o estado dos equipamentos industriais. (Adaptado de [61]). 65
5.2 Fluxograma do procedimento de monitorização da condição (Adaptado de [64]). 67
5.3 Sinal de vibração no domínio do tempo (Adaptado de [78]). 75
5.4 Vibração característica de cada componente da máquina no domínio do tempo (Adaptado de [78]). 76
5.5 Sinal vibratório no domínio do tempo vs domínio da frequência (Adaptado de [80]). 77
5.6 Sinal de vibração no domínio da frequência (Adaptado de [80]). 77
5.7 Norma ISO 10816-3 [82]. 78
5.8 Deflexão dos dentes de uma engrenagem por ação da carga (Adaptado de [85]). 80
5.9 Desgaste típico no perfil do dente (Adaptado de [85]). 80
5.10 Alteração no nível das vibrações dos três primeiros harmónicos da engrenagem devido ao desgaste (Adaptado de [85]). 81
5.11 Criação de componentes fantasmas (Adaptado de [85]). 81
5.12 Componentes do rolamento (Adaptado de [88]). 84
5.13 Configuração de acelerómetros piezoeléctricos (Adaptado de [89]). 85
5.14 Lubrificação por salpico: lubrificação de rolamentos por meio de reservatórios intermediários [113]. 90
5.15 Exemplos de placas guia de óleo (Adaptado de [113]). 91
5.16 Desenho esquemático de um sistema de lubrificação por cárter húmido (Adaptado de [113]). 92
5.17 Desenho esquemático de um sistema de lubrificação por cárter seco (Adaptado de [113]). 92
5.18 Posições de monitorização de análise de óleo (Adaptado de [115]). 93
5.19 Representação esquemática dos mecanismo de desgaste [129]. 95
5.20 Representação esquemática do desgaste abrasivo de 2 e 3 corpos (Adaptado de [105]). 96
5.21 Variação da taxa de desgaste (Adaptado de [118]). 96
5.22 Desgaste corrosivo em função do tempo [69]. 98
5.23 Dente de engrenagem com desgaste abrasivo causado por partículas duras presentes no lubrificante [96]. 99
5.24 Micrografia de uma pista de rolamento onde uma única partícula amassou a superfície (A), iniciando corrosão e fragmentação [96]. 99
5.25 Micrografia da secção transversal de um rolamento. Danos na superfície do rolamento (b) iniciaram fendas que se propagaram através do metal. [96]. . 100
5.26 Relação entre a geração de partículas e o processo de desgaste (Adaptado de [129]). 100
5.27 Equipamento utilizado para realizar a espectroscopia elementar [137]. . . . 101
5.28 Representação esquemática do processo de funcionamento da ferrografia de leitura direta [138]. 102
5.29 Representação esquemática do processo de funcionamento do contador de partículas por bloqueio de luz (Adaptado de [140]). 105

5.30 Representação esquemática do processo de funcionamento do contador de partículas por bloqueio de poros (Adaptado de [141]). 106
5.31 Diminuição do caudal de óleo com a obstrução do filtro (Adaptado de [141]).106
5.32 Representação esquemática do processo de funcionamento do contador de partículas indutivo (Adaptado de [142]). 107
5.33 Equipamento utilizado para a obtenção do ferrograma [144]. 109
5.34 Representação esquemática do processo de funcionamento da ferrografia analítica (Adaptado de [138]). 110
5.35 Deposição das partículas ferrosas e não ferrosas no ferrograma (Adaptado de [145]). 110
5.36 Representação esquemática do processo de funcionamento do LaserNet Fines (Adaptado de [146]). 111
5.37 Classificação das partículas utilizando LaserNet Fines [146]. 112
5.38 Partículas de fadiga detetadas com recurso ao LaserNet Fines (Adaptado de [146]). 113

6.1 Representação esquemática do misturador *Tandem* e os respetivos sistemas de ativação (Adaptado de [148]). 116
6.2 Caixa redutora do andar superior da linha de misturação número 12. 116
6.3 Vista do corte da caixa redutora superior pelo plano de partição (Adaptado de [149]). 118
6.4 Vista frontal da caixa redutora superior (Adaptado de [149]). 119
6.5 Diagrama de transmissão de potência da caixa redutora (Adaptado de [149]).121
6.6 Nível de óleo na caixa redutora (Adaptado de [149]). 124
6.7 Unidade de lubrificação da caixa redutora. 125
6.8 Sistema de lubrificação da caixa redutora, com a identificação da posição dos componentes constituintes (Adaptado de [149]). 126
6.9 Sensores de temperatura que ativam a válvula 2. 127
6.10 Painel onde são apresentados alguns valores medidos através de transdutores, nomeadamente o valor da pressão e da temperatura do óleo à entrada da caixa redutora. 128
6.11 Processo de execução do método de *Delphi* (Adaptado de [204]). 138
6.12 Representação 3D do NPR, onde o eixo dos xx representa o índice de severidade, o eixo dos yy o índice de ocorrência e o eixo dos zz o índice de detetabilidade. 147
6.13 Diferentes combinações possíveis para o NPR. 148
6.14 Diagrama do índice de criticidade dos componentes alvos de análise não considerando os controlos atuais. 149
6.15 Diagrama do índice de criticidade dos componentes alvos de análise considerando os controlos atuais. 153
6.16 Diagrama de decisão proposto (Adaptado de [25]). 156
6.17 Consequência dos modos de falha. 164
6.18 Categorias das técnicas de manutenção condicionada dos modos de falha. . 164
6.19 Imagens microscópicas do teste *Millipore*. 169
6.20 Resultados das análises *off-line*. 171
6.21 Contadores Hydac (Adaptado de [207]). 174
6.22 Contadores Filtertechnik (Adaptado de [208; 209]). 174
6.23 Contadores Parker (Adaptado de [210; 211]). 175
6.24 Contador Pamas - S50 (Adaptado de [212]). 175
6.25 Contador Prüftechnik - WEARSCANNER (Adaptado de [213]). 175

6.26 Diferentes posições do contador de partículas: A- em série e B- em paralelo. 177
6.27 Viscosidade cinemática em função da temperatura para óleos Omala S4 GX (Adaptado de [150]). 179
6.28 Contadores Filtertechnik PC9001 (Adaptado de [209]). 180
6.29 Esquema do sistema de contagem de partículas. 181
6.30 Interface principal do *software* do contador de partículas (Adaptado de [209]).182
6.31 Gráfico da evolução da contagem de partículas obtido com o *software* (Adaptado de [209]). 182
6.32 Opções de visualização do Gráfico da evolução da contagem de partículas obtido com o *software* do contador de partículas (Adaptado de [209]). . . . 183
6.33 Sensor de humidade LubCos H_2O [214]. 184
6.34 Diferentes posições de montagem do sensor de humidade (Adaptado de [215]).185
6.35 Esquema do sistema de lubrificação com o sensor de humidade. 186
6.36 *Layout* do andar superior de misturação. 188
6.37 Identificação das operações 1 e 5. 190
6.38 Identificação da operação 2. 191
6.39 Identificação das operações 3 e 4. 192

G.1 Identificação das operações 8, 9, 10 e 11. 267
G.2 Identificação da operação 13. 269

Lista de Tabelas

4.1 Modos de falha obtidos com a abordagem funcional e estrutural. 37
4.2 Exemplo de classificação da severidade do efeito do modo de falha (Adaptado de [59]). 47
4.3 Exemplo de classificação da ocorrência do modo de falha (Adaptado de [59]). 48
4.4 Exemplo de classificação da detetabilidade do modo de falha (Adaptado de [59]). 49
4.5 Formulário FMEA [36]. 51
4.6 Formulário FMECA [36]. 52
4.7 Condições que as técnicas devem possuir para "valerem a pena fazerem-se" e serem "tecnicamente praticáveis" no processo de seleção do diagrama de decisão RCM (Adaptado de [25]). 60

5.1 O que cada técnica de monitorização da condição consegue ou não satisfazer (Adaptado de [61]). 66
5.2 Classificação ISO para lubrificantes industrias [103]. 89
5.3 Danos provocados pelas partículas, tendo em conta o tamanho das partículas em relação às folgas entre as superfícies de contacto [96]. 98
5.4 Limites aceitáveis para WPC (DRL + DRS) [138]. 103
5.5 Limites aceitáveis para WPC (DRL) [138]. 104
5.6 Classificação ISO 4406 [69]. 108

6.1 Caracterização genérica dos componentes da caixa redutora. 117
6.2 Lubrificantes utilizados nas caixas redutoras da GUIBE (Adaptado de [149]). 123
6.3 Equipamentos da unidade de lubrificação da caixa redutora. 127
6.4 Classificação da severidade do efeito do modo de falha em termos ambientais. 129
6.5 Classificação da severidade do efeito do modo de falha em termos de segurança. 130
6.6 Classificação da severidade do efeito do modo de falha em termos económicos. 130
6.7 Classificação da ocorrência do modo de falha. 131
6.8 Classificação da detetabilidade do modo de falha. 131
6.9 Literatura utilizada para elaboração dos formulários FMECA. 132
6.10 FMECA rolamento. 133
6.11 FMECA simplificado caixa redutora sem contribuição dos controlos atuais. 140
6.12 Índice de severidade. 141
6.13 Índice de severidade económico. 142
6.14 Cálculo NPR dos modos de falha caixa redutora sem contribuição dos controlos atuais. 145
6.15 Criticidade dos modos de falha sem contribuição dos controlos atuais. . . . 149
6.16 Cálculo NPR dos modos de falha da caixa redutora com contribuição dos controlos atuais. 150

6.17 FMECA simplificado caixa redutora com contribuição dos controlos atuais. 151
6.18 Criticidade dos modos de falha com contribuição dos controlos atuais. . . . 152
6.19 Influência dos controlos atuais na criticidade dos modos de falha. 152
6.20 Caracterização dos diferentes modos potenciais de falha das caixas redutoras.158
6.21 Caracterização dos custos associados à reparação da falha e às consequências operacionais e dos custos da implementação do sistema de monitorização. . 160
6.22 Folha de decisão RCM. 163
6.23 Comparação entre os diferentes contadores de partículas. 173
6.24 Custos de aquisição dos contadores PC9001-31/61. 178
6.25 Dados técnicos do sensor de humidade LubCos H_2O. 185
6.26 Custos de aquisição dos equipamentos para monitorizar o teor de condensados.186
6.27 Plano de lubrificação da Caixa Redutora - Misturador. 189
6.28 Período, em horas, da mudança do óleo da caixa redutora em função da temperatura e do tipo de óleo. 193
6.29 Procedimentos de operações do plano de lubrificação. 193

B.1 FMECA engrenagem. 218
B.2 FMECA veio. 220
B.3 FMECA vedante. 221
B.4 FMECA parafuso da partição. 222
B.5 FMECA carcaça. 223
B.6 FMECA chaveta. 224
B.7 FMECA válvula de drenagem. 225

G.1 Plano de lubrificação do Misturador - Corpo. 266
G.2 Plano de lubrificação do Motor - misturador. 268

Lista de acrónimos e siglas

AE	Análise Acústica
DE1	Direção de Engenharia 1
DRL	Concentração de partículas grandes
DRS	Concentração de partículas pequenas
EMD	Decomposição de Modo Empírico
EUA	Estados Unidos da América
FFT	Rápida Transformada de Fourier
FMEA	Análise dos Modos de Falha e seus Efeito
FMECA	Análise de Modos de Falha, Efeitos e Criticidade
FT	Transformada de Fourier
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
IR	Termografia Infravermelha
ISO	Organização Internacional de Normalização
KM	*Karcass Machine*
KPI	Indicador-Chave de Desempenho
MTBF	Tempo médio entre falhas
NASA	Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço
NPR	Número de Prioridade de Risco
OA	Análise de Óleo
PU	*Pressure Unity*
RCM	Manutenção Centrada na Fiabilidade
RMS	*Root Mean Square*
SAE	Society of Automotive Engineers
SI	Sistema Internacional de Unidades
STFT	Transformada de Fourier de tempo curto
SVM	Máquina de vetor de suporte
TAN	*Total Acid Number*
VA	Análise de Vibração
WPS	Concentração de partículas de desgaste
WT	Transformada Wavelet
WVD	Distribuição Wigner-Ville

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Atualmente, a manutenção assume um papel fundamental na definição da estratégia de uma empresa. A manutenção industrial tem uma grande influência na fiabilidade, disponibilidade, e qualidade dos produtos e serviços. Para além disso, tem como finalidade promover a redução de consequências ao nível da segurança, ambiente e operação, tornando, desta forma, a empresa mais rentável do ponto de vista económico. Assim, a manutenção industrial tem como objetivo garantir o correto funcionamento da indústria, dos seus equipamentos e processos.

Antes da Indústria 4.0, os Engenheiros de Manutenção eram responsáveis por recolher e analisar dados, para descobrir o que aconteceu, ou o que estava a acontecer com um determinado equipamento que apresentava mau funcionamento. Por vezes, as informações que tinham para analisar eram de baixa qualidade, ou os próprios dados eram difíceis de recolher e/ou analisar.

A Indústria 4.0, também denominada de quarta revolução industrial, procura transformar os ativos em equipamentos inteligentes, com recursos a novas tecnologias digitais: *Internet of Things*, o *Big Data* e a Inteligência Artificial. Com a utilização de sensores e de outras tecnologias é possível extrair dados, em tempo real, cada vez mais precisos sobre os equipamentos ou máquinas. Posteriormente, esses dados podem ser analisados, por exemplo, com recurso da Inteligência Artificial. Desta forma, a Indústria 4.0 pretende limitar a participação dos operadores e técnicos de manutenção no processo de monitorização e análise dos processos de fabrico. A manutenção industrial 4.0 permite otimizar os processos de manutenção, o que se traduz em vários benefícios para a empresa. Assim, consegue aumentar-se a disponibilidade do equipamento, reduzir os custos de manutenção, melhorar a utilização da mão-de-obra e melhorar os planos de manutenção planeada.

A principal função do sistema de monitorização de condição inteligente é enviar alertas e indicar ações para prevenir a produção de componentes fora das especificações determinadas pela a empresa, e evitar falhas das máquinas, de modo a evitar a paragem da linha de produção. O sistema também deve auxiliar na implementação prática da Manutenção Preditiva e Prescritiva [1]. A manutenção preditiva é baseada na análise de dados obtidos com recurso a sensores e outras tecnologias, que conseguem realizar medições de determinados parâmetros antecipadamente estabelecidos, como por exemplo, temperatura, vibração ou

pressão, conseguindo seguir-se em tempo real o desgaste/degradação de uma máquina. O principal objetivo deste tipo de manutenção é o de intervir antes da falha acontecer, de forma a reduzir as reparações, reduzindo os custos de manutenção, aumentar a vida útil das máquinas e aperfeiçoar a sua capacidade de produção [2]. Por sua vez, a manutenção prescritiva utiliza a inteligência artificial para prescrever ações de manutenção com base nos dados recolhidos sobre cada equipamento.

Conclui-se, assim, que a manutenção industrial está a atravessar grandes transformações, devendo-se principalmente à aplicação de novas tecnologias capazes de otimizar cada vez mais os processos produtivos das empresas.

Devido ao crescimento que a Continental Mabor tem vindo a apresentar nos últimos anos, e de acordo com as previsões relativas a um futuro próximo, a Continental Mabor tem a necessidade de ajustar as suas políticas de manutenção a esta nova realidade. Estas mudanças estão a levar à inserção de novas linhas de misturação no sistema produtivo do pneu, aplicando-se novas tecnologias digitais.

Esta dissertação foi realizada no âmbito do prémio ContiBest. O prémio ContiBest é promovido pela empresa Continental Mabor, sendo atribuído ao estudante do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica que se apresente a concurso com a média mais elevada. O vencedor recebe um prémio monetário e a possibilidade de realizar um Estágio Curricular em ambiente empresarial.

1.2 Continental Mabor

O presente projeto foi realizado na Fábrica de Lousado da Continental Mabor. Esta fábrica é uma das unidades mais importantes do grupo Continental no mundo dos pneus, constituindo-se como a quinta maior exportadora em Portugal. A Continental Mabor implementou tecnologias de topo na produção de pneus, contando com uma equipa de profissionais altamente qualificados nos processos de fabrico [3].

Esta dissertação foi elaborada na Direção de Engenharia 1 (DE1) que é responsável pela manutenção corretiva e planeada, e projetos na área de misturação.

O tema da dissertação foi proposto pela Continental, de acordo com as suas necessidades, sendo um trabalho de análise do funcionamento de uma nova linha de misturação, mais especificamente, o sistema de lubrificação da mesma. A pandemia de Covid-19 impediu a realização da totalidade do estágio nas instalações da fábrica, tendo sido adaptado de modo a continuar remotamente.

1.3 Objetivos

O objetivo principal da presente dissertação é analisar a monitorização da condição de uma caixa redutora da nova linha de misturação da Continental Mabor. Para alcançar tal objetivo foi necessário primeiro definir vários subobjetivos, que se apresentam de seguida:

- Descrever e analisar o sistema produtivo da Continental Mabor, dando especial atenção à etapa de Misturação;

- Analisar e descrever a metodologia de Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM);
- Explorar e descrever as diferentes técnicas de Monitorização da Condição, especialmente, os métodos de análise de partículas de desgaste presentes no óleo;
- Descrever e analisar a Caixa Redutora, e o seu sistema de Lubrificação;
- Aplicar a metodologia RCM;
- Implementar um sistema de monitorização das partículas de desgaste;
- Elaborar o plano base de lubrificação da Caixa Redutora.

1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturada em sete capítulos apresentados da seguinte forma:

Capítulo 2

No Capítulo 2 descreve-se o grupo Continental AG, com particular enfoque na empresa Continental Mabor. Em primeiro lugar é apresentada uma breve descrição histórica do grupo Continental AG, seguida de uma breve descrição dos seus departamentos e os locais onde se encontra. Em segundo lugar, aborda-se a história da Continental Mabor, apresenta-se a sua estrutura organizacional, política, visão e missão. Por último, descreve-se, muito brevemente, o produto final da Continental Mabor, o pneu.

Capítulo 3

No Capítulo 3 é descrito o Sistema Produtivo da Continental Mabor, dando especial atenção à etapa de Misturação. Numa primeira fase, apresenta-se o *layout* da fábrica que enuncia as diferentes etapas do sistema de produção do pneu. Depois de enunciadas, as diferentes etapas são devidamente caracterizadas. O capítulo termina com a análise do processo de Misturação. Nesta análise inclui-se a caracterização das várias etapas do processo de misturação, assim como a descrição detalhada do funcionamento de uma linha de misturação.

Capítulo 4

O Capítulo 4 é essencialmente dedicado à descrição e análise da metodologia de Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM). Começa por se apresentar as diferentes sete questões da metodologia RCM, sendo que as primeiras cinco se referem à análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade (FMEA/FMECA). De seguida, apresenta-se uma breve descrição histórica da metodologia FMEA/FMECA, abordam-se os diferentes conceitos relacionados com a metodologia e esclarecem-se as principais diferenças entre a metodologia FMEA e FMECA, assim como as diferentes categorias. O procedimento FMEA/FMECA é descrito e apresentam-se os formulários que devem ser devidamente preenchidos. Por fim, as duas últimas questões da metodologia RCM são esclarecidas, sendo descrito e analisado o diagrama de decisão RCM.

Capítulo 5

No Capítulo 5 aborda-se a Monitorização da Condição. Inicialmente, apresenta-se uma breve descrição histórica da Monitorização da Condição, seguida da apresentação das diferentes técnicas. É ainda abordado o processo de implementação de um sistema de monitorização da condição segundo a Norma ISO 17359. De seguida, descreve-se a monitorização da vibração, apresentando os diferentes métodos de monitorização, as técnicas de análise de vibração, as fontes de vibração da caixa redutora, e uma breve descrição dos transdutores de vibração. Posteriormente, aborda-se a monitorização do óleo e alguns conceitos relativos à lubrificação das caixas redutoras. No que diz respeito à lubrificação das caixas redutoras, esclarecem-se os tipos, viscosidade e classificação de óleos lubrificantes, e exploram-se os diferentes mecanismos de lubrificação das caixas redutoras. Relativamente à monitorização do óleo propriamente dita, identificam-se e descrevem-se as diferentes posições de monitorização e centra-se na análise das partículas presentes no óleo. Desta forma, é feita uma análise de desgaste, com a identificação dos mecanismos de desgaste e descrição do processo de geração de partículas. Por último, exploram-se os diferentes métodos da análise de desgaste, sendo cada um dos métodos descrito com o devido detalhe.

Capítulo 6

No Capítulo 6 apresenta-se o caso de estudo. O capítulo começa com a descrição do problema em estudo, que consiste na descrição da caixa redutora e do sistema de lubrificação da mesma. Em primeiro lugar, aplica-se a metodologia FMECA segundo a análise estrutural, elaborando os formulários FMECA de todos os componentes da caixa redutora. Em segundo lugar, devido à falta de dados que permitiam conhecer e caracterizar as falhas nas caixas redutoras, foi necessário reduzir a análise aos componentes principais e tornar a aplicar a metodologia FMECA, agora segundo a análise funcional. Em terceiro lugar, preencheram-se os formulários FMECA simplificados sem, e com a contribuição dos controlos atuais, e analisa-se os valores de NPR obtidos. Em quarto lugar, estabelecem-se ações recomendadas, inicialmente, apenas segundo os valores NPR, e, posteriormente, segundo o diagrama de decisão RCM proposto, que é devidamente descrito e aplicado. As ações recomendadas com base apenas na metodologia FMECA são revistas com as estabelecidas com a metodologia estruturada RCM. Em quinto lugar, selecciona-se o método de monitorização das partículas de desgaste, e estabelece-se uma comparação entre os diferentes contadores de partículas existentes no mercado, sendo o sistema de contagem de partículas devidamente selecionado. Em sexto lugar, estabelece-se o sistema de monitorização do teor de condensados, com a seleção de um sensor de humidade. Por fim, elabora-se o plano base de lubrificação da caixa redutora.

Capítulo 7

Por fim, no Capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões alcançadas com o trabalho desenvolvido ao longo da dissertação. São ainda mencionadas algumas sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Descrição da Empresa

2.1 Introdução

Neste capítulo descrever-se-á o grupo Continental AG, com particular enfoque na empresa Continental Mabor, local onde o trabalho de campo foi desenvolvido.

Assim, irá ser abordada, resumidamente, a história do grupo Continental AG, os seus departamentos e os locais onde se encontra. No caso da Continental Mabor, será, resumidamente, abordada a sua história, apresentada a sua estrutura organizacional, política, visão e missão, e será feita uma breve descrição do seu produto final, o pneu.

2.2 Continental AG

2.2.1 Cronologia

A Continental AG foi fundada em 8 outubro de 1871 na cidade de Hanôver, na Alemanha. A produção da fábrica principal, na rua Vahrenwalder, incluía produtos de borracha suave, tecidos revestidos de borracha e pneus maciços para bicicletas e carruagens. Em 1898, começou a produzir pneus pneumáticos para automóveis sem padrão do piso. Desde esse momento, acompanha a evolução da indústria automóvel, sendo que os pneus Continental passaram a equipar os carros vencedores de diversas competições automóveis. Alguns exemplos dessas vitórias: em 1901, o primeiro carro produzido pela Daimler, com o nome de Mercedes, alcança uma vitória na corrida de carros Nice-Salon-Nice com os pneus Continental e, em 1914, ocorre a tripla vitória no Grand Prix de França para carros da Daimler equipados com pneus Continental [4].

Nos anos seguintes, a Continental realiza a aquisição de muitas empresas e abre instalações espalhadas pelo mundo [4; 5]:

- em 1979, aquisição da empresa europeia de pneus Uniroyal, Inc., o que proporcionam à Continental uma base mais alargada na Europa;
- em 1985, aquisição do negócio de pneus da empresa Semperit;

- em 1987, aquisição do fabricante norte-americano de pneus General Tire, Inc. incluindo a fábrica de Mount Vernon (EUA);
- em 1989, é criada uma *joint venture* com a empresa portuguesa Mabor para a produção de pneus em Lousado, Vila Nova de Famalicão. A Continental adquire a empresa na totalidade em 1993;
- em 1992/93, a aquisição da fábrica de Otrokovice (República Checa). A Barum passa a integrar o Grupo Continental;
- em 1998, a Continental reforça a sua posição de fabricante de pneus global abrindo instalações na África do Sul (Port Elizabeth);
- em 1999, aquisição da fábrica de Púchov (Eslováquia);
- em 2006, abertura da fábrica de Camaçari (Brasil);
- em 2007, a Continental adquire a Siemens VDO Automotive AG e adquire uma participação maioritária na empresa eslovaca Continental Matator Rubber s.r.o;
- em 2009, ocorre a abertura da nova sede asiática e a Schaeffler KG torna-se a principal acionista da Continental AG;
- em 2011, é aberta e primeira fábrica de pneus na China e ocorre a aquisição da Modi Tyres Company Ltd., incluindo as fábricas de Modipuram e Partapur (Índia);
- em 2015, aquisição da Veyance Technologies, uma empresa da área da tecnologia de borrachas e plásticos. Compra da Elektrobit Automotive GmbH, especialista em soluções inovadoras de software.

Nos últimos anos o grupo Continental tem-se focado, sobretudo, em pesquisa e desenvolvimento, de forma a potenciar inovações para o aumento de segurança, o desenvolvimento de componentes não prejudiciais ao meio ambiente e melhorar o conforto e desempenho dos veículos. Assim, em 2017, ocorreu a abertura do novo centro de investigação e desenvolvimento em Silicon Valley. Este centro procura encontrar soluções pioneiras para a mobilidade sustentável do futuro. Em 2018, a Continental abriu o laboratório de investigação e experimental "Taraxagum Lab Anklam" em Anklam, Alemanha. Neste laboratório, realiza-se a investigação do cultivo e do tratamento do dente-de-leão russo, uma vez que se apresenta como uma matéria-prima alternativa à seringueira [4]. (Seringueira é o nome de várias árvores que produzem um líquido (látex) usado na fabricação da borracha natural [6]).

2.2.2 Departamentos

O Grupo Continental é dividido em "Sistemas Automotivos", e "Componentes de Borracha", e consiste em cinco departamentos [7]:

- Chassis e Segurança: engloba tecnologias modernas para a segurança ativa e passiva e de dinâmica do veículo;
- *Powertrain*: representa sistemas e soluções inovadoras e eficientes para o *powertrain* do presente e do futuro;

- Interior: combina todas as atividades relacionadas com a apresentação e gestão de informações do veículo;

- Pneus: oferece os pneus certos para cada aplicação - sejam veículos ligeiros, pesados, motas ou bicicletas. A Continental Pneus apresenta um rastreamento excepcionalmente confiável em todas as condições meteorológicas;

- ContiTech: desenvolve e produz componentes e sistemas para a indústria automóvel e para outras indústrias-chave.

2.2.3 Localizações

O grupo Continental, tem uma presença à escala mundial, sendo possível ver na figura 2.1 os vários locais em que a Continental está presente.



Figura 2.1: Locais de presença da Continental AG [8].

2.3 Continental Mabor

2.3.1 Cronologia

A Continental Mabor nasceu em dezembro de 1989, sendo que o seu nome provém da união de duas empresas, a Mabor, empresa portuguesa, e a Continental AG [5]. A empresa Mabor - Manufactura Nacional de Borracha foi a primeira fábrica de pneumáticos de Portugal, tendo sido criada a 6 de abril de 1946 na freguesia de Lousado, no concelho de Vila Nova de Famalicão, ver figura 2.2 [9].



Figura 2.2: Fábrica Mabor em 1946 [9].

Em julho de 1990, iniciou-se o programa de reestruturação que transformou a antiga unidade da Mabor na mais moderna das 21 unidades da Continental AG, existentes à altura, ver figura 2.3 [3].



Figura 2.3: Fábrica Mabor em 1990 [3].

Em 1993, a Continental assume o controlo total da Continental Mabor (até então detinha 60% do capital) e integra o valor da marca no seu espólio de produtos [10].

Esta empresa sofreu grandes transformações ao longo do tempo no que respeita às suas instalações, tendo sido ampliada sete vezes face à sua área inicial. Atualmente, a fábrica de Lousado, ver figura 2.4, é uma das unidades mais importantes da Continental no mundo dos pneus, constituindo-se como a quinta maior exportadora em Portugal [3].



Figura 2.4: Fábrica Mabor em 2020 [3].

2.3.2 Política da Empresa, Visão e Missão

A política de empresa assenta na prática diária dos valores do Grupo Continental que são os seguintes:

- confiança;
- paixão por vencer;
- liberdade por agir;
- solidariedade.

A política da empresa também assenta na visão de ser Líder:

- **L**ousado eficiente;
- **I**nova e antecipa as necessidades dos clientes;
- **D**esenvolve produtos de alta tecnologia;
- **E**xcelente no conhecimento e nos processos;
- **R**entável de forma sustentada.

A visão da empresa deve servir de inspiração para os seus colaboradores tirarem o máximo partido das suas capacidades e alcançarem níveis mais elevados de excelência profissional. No fundo, a visão consiste em ser o fabricante de pneus de referência mundial em termos de rentabilidade sustentada.

A Continental Mabor tem como missão antecipar as tendências do mercado e responder rapidamente às necessidades dos clientes. Para além disso, tem como missão fabricar produtos e prestar serviços de elevado valor acrescentado, de forma cada vez mais eficiente e inovadora.

2.3.3 Estrutura Organizacional

Na figura 2.5 é possível observar as diferentes direções existentes na empresa.

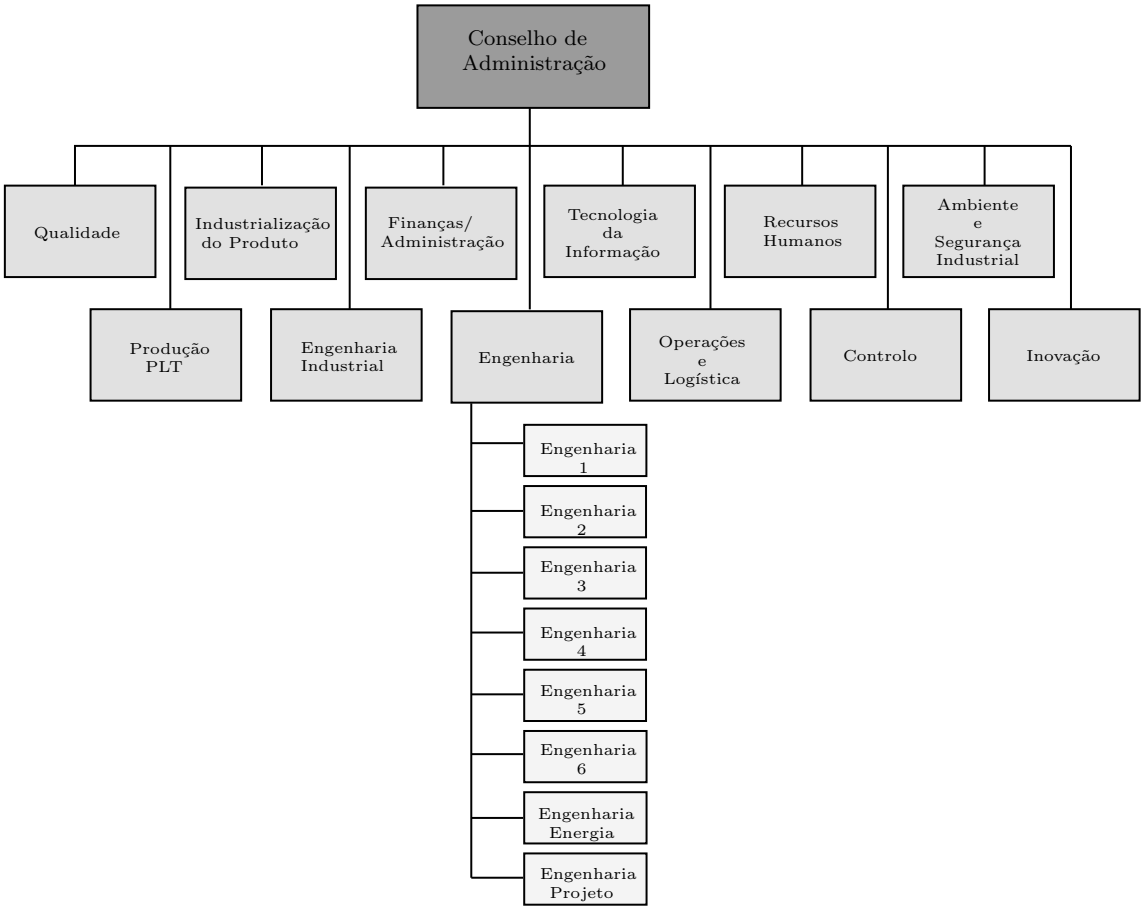


Figura 2.5: Organigrama da Continental Mabor.

2.3.3.1 Direção de Engenharia 1

A Direção de Engenharia 1 assume particular relevo, uma vez que este trabalho foi desenvolvido no seu seio. O Departamento de Engenharia 1 integra a Direção de Engenharia da fábrica, sendo constituído por um conjunto de engenheiros, técnicos elétricos e mecânicos, e empresas prestadoras de serviço. Este departamento é responsável pela manutenção corretiva e planeada, e projetos na área de misturação. Todas as atividades estão definidas no mapeamento do processo do departamento da direção de engenharia, dos quais se destacam os recursos, objetivos e KPI's.

Assim, tendo em conta o plano de atividades da Direção de Engenharia 1, o projeto desenvolvido tem bastante importância para a empresa.

2.3.4 Produto Final

O produto final é o pneu, sendo constituído por diferentes partes, tal como se observa na figura 2.6.



Figura 2.6: Principais elementos estruturais do pneu [11].

O pneu tem uma estrutura complexa, sendo constituído pelos seguintes componentes [11]:

1. Piso: Assegura uma boa aderência à estrada e permite a não retenção de água, sendo fabricado em borracha sintética e natural;
2. Telas sem união: Permitem uma boa estabilidade a altas velocidades;
3. Telas com cinta e cordas de aço: Otimizam a estabilidade direcional e o atrito ao rodar;
4. Tela de fibra têxtil: Controla a pressão interna conservando a forma do pneu;
5. Revestimento interior: Relacionado com a estanquidade do pneu;
6. Flanco: Protege o pneu dos danos externos;
7. Reforço do talão: Permite a estabilidade direcional e uma resposta de direção precisa;
8. Cunha do talão: Relaciona-se com a performance da direção e o nível de conforto;
9. Núcleo do talão: Assegura o encaixe firme sobre a jante.

Capítulo 3

Descrição e Análise do Sistema Produtivo

3.1 Introdução

Para a mais correta aplicabilidade dos princípios inerentes ao estudo que se pretende realizar na Continental Mabor, o conhecimento do processo produtivo da organização é crucial.

Neste capítulo descreve-se de uma forma geral o sistema produtivo da Continental Mabor, começando pela apresentação do seu *layout*, e caracterizando cada uma das suas fases.

Posteriormente, será realizada uma análise detalhada da fase de misturação. Nesta análise inclui-se a caracterização das etapas do processo de misturação, assim como a descrição detalhada do funcionamento de uma linha de misturação.

Seria também interessante realizar uma reflexão sobre a qualidade genérica dos produtos ditos em curso que vão sendo produzidos e como as falhas dos equipamentos podem dar origem, para além de paragens não programadas, a perdas de qualidade. A qualidade do processo produtivo afeta a criticidade do sistema, sendo de esperar um aumento de criticidade com uma possível perda de qualidade. Uma perda de qualidade provoca: perda económica e material, e deterioração do processo.

Contudo, a informação sobre a qualidade dos produtos, o seu controlo ao longo do processo produtivo e quais os fatores que devem ser controlados para que a qualidade dos produtos ditos em curso seja mantida não foi disponibilizada pela Continental Mabor por motivos de confidencialidade, não sendo possível realizar a reflexão enunciada anteriormente.

3.2 Descrição Geral do Sistema Produtivo

O sistema de produção da Continental Mabor é bastante complexo, ver figura 3.1, podendo ser dividido em três grandes etapas: receção de matérias-primas, processo produtivo e armazenamento e expedição do produto acabado.

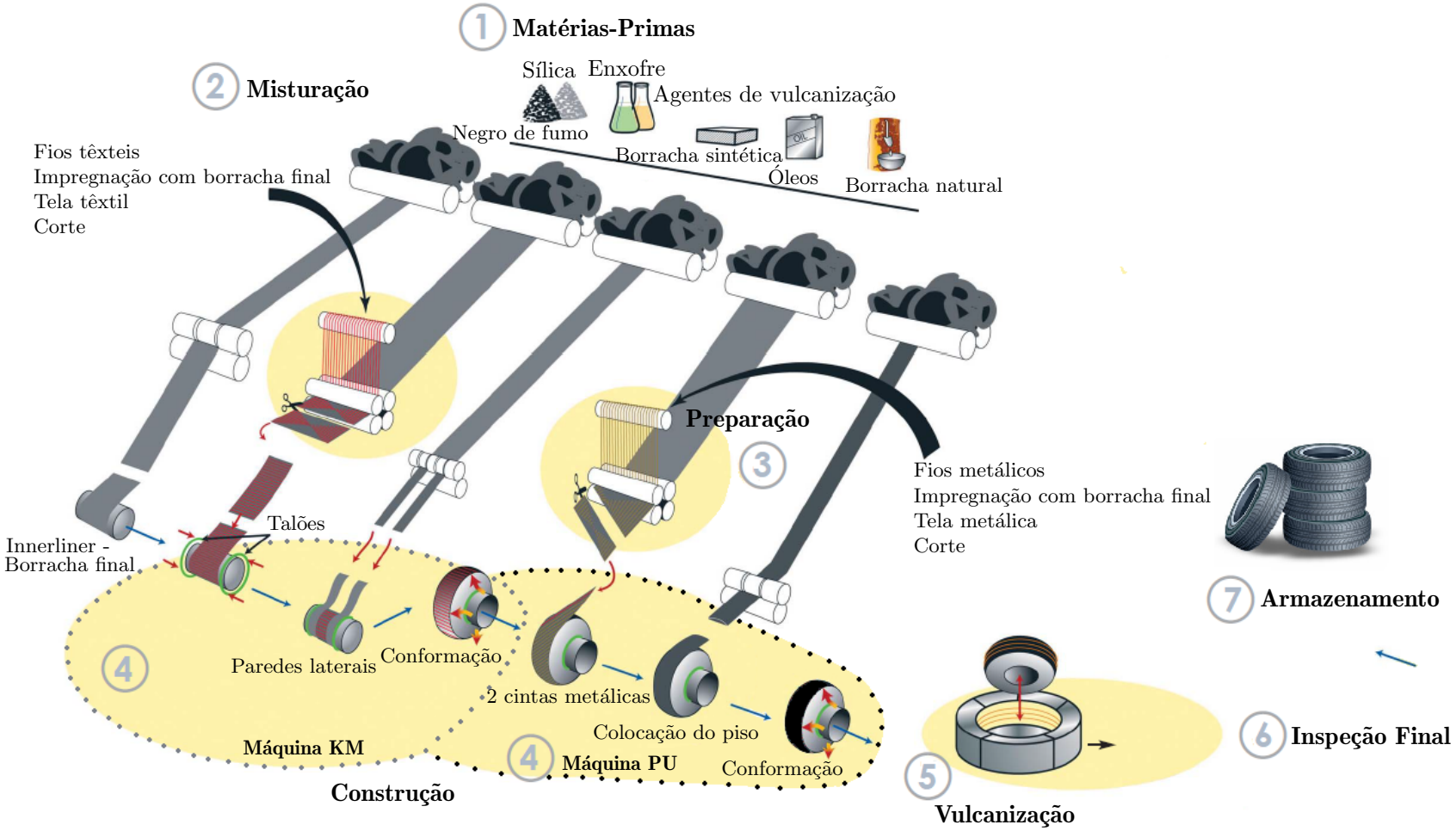


Figura 3.1: Descrição das etapas do sistema de produção da Continental Mabor (Adaptado de [12]).

De notar que a etapa correspondente ao processo produtivo pode ser dividida nas seguintes cinco fases, correspondendo cada uma a um departamento:

- Misturação;
- Preparação;
- Construção;
- Vulcanização;
- Inspeção final.

Assim, o sistema de produção da Continental Mabor é constituído por dois armazéns, o de matérias-primas e o de produto acabado, e por cinco departamentos que constituem o processo de produção do pneu, ver figura 3.2.

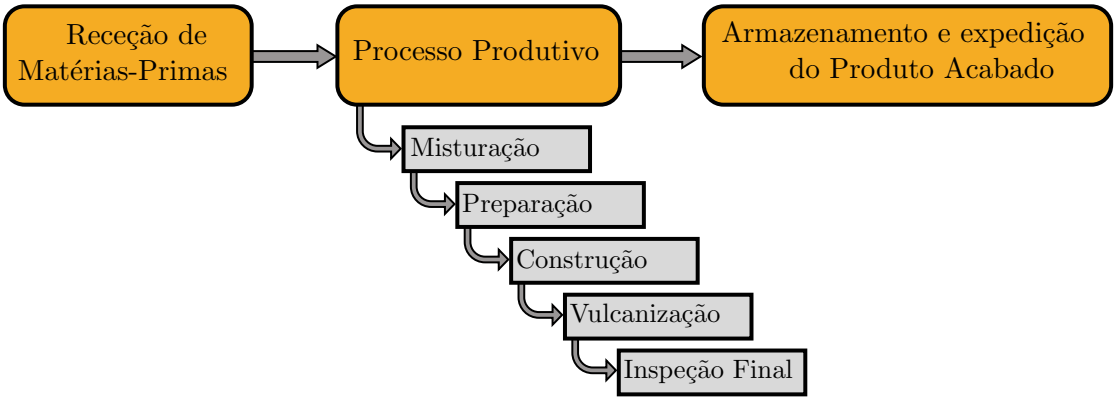


Figura 3.2: Representação esquemática do sistema de produção da Continental Mabor.

Seguidamente, descrever-se-á de forma sucinta cada uma das fases do processo de produção.

3.2.1 Receção de Matérias-Primas

Para se obter o produto final são necessárias matérias-primas. Na Continental Mabor o *stock* de segurança de matérias-primas é assegurado através de entregas periódicas pelos fornecedores.

Inicialmente, as matérias-primas são recebidas e sujeitas a processos de controlo de qualidade, para verificar o cumprimento dos requisitos e a qualidade requerida. Após esta fase, são devidamente armazenadas, ver figura 3.3.



Figura 3.3: Exemplo de armazém de matérias-primas [13].

Nesta fase é evidente a ligação direta da indústria de fabrico de pneu a outras indústrias [14]:

- **Indústria têxtil**: Fornecimento de poliéster, *rayon*, *nylon* e fibras de aramida que são utilizadas para reforçar os pneus;
- **Indústria química**: Fornece a borracha sintética;
- **Indústria siderúrgica**: Fornece aço de elevada resistência que é utilizado na produção de cintas de aço e bases de talão.
- **Indústria de extração de borracha natural**: Fornece a borracha natural.

3.2.2 Departamento I - Misturação

A misturação é a primeira fase do processo produtivo. Nesta fase, a borracha, que pode ser de origem natural ou sintética, é misturada com diferentes produtos químicos, nomeadamente, resinas, óxido de enxofre e zinco, sílica, óleos e negro de fumo (derivado da refinação do petróleo que é responsável pela cor preta do pneu). Da mistura de todas as matérias-primas, obtém-se compostos de borracha com características específicas para cada zona e tipo de pneu.

Existem dois tipos de compostos: os *masters* e os compostos finais. Os compostos *masters* são compostos intermédios da fase de produção dos compostos finais. Depois de produzidos os compostos finais, estes seguem para a próxima fase do processo produtivo.

Na figura 3.4 está representada uma sala de misturação, na qual se observa os silos de armazenamento das matérias-primas e as diferentes zonas/máquinas do processo de misturação: doseamento e pesagem, alimentação de polímeros, equipamento de misturação e túnel de arrefecimento.

O processo de misturação será explicado com mais detalhe na secção 3.3.

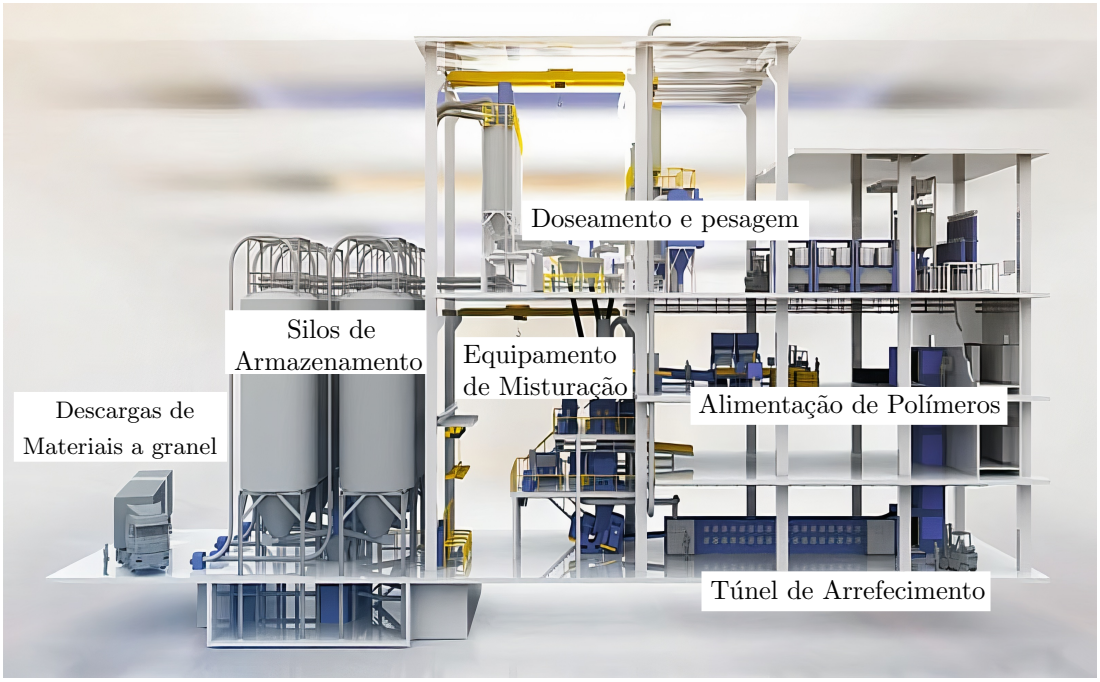


Figura 3.4: Sala de misturação (Adaptado de [15]).

3.2.3 Departamento II - Preparação

Nesta fase, utilizando os compostos da fase anterior, ocorre o fabrico de vários componentes que constituem o pneu. Diferentes máquinas são utilizadas, nomeadamente, extrusoras, calandras e máquinas de corte. Devido à complexidade desta fase, pode ser subdividida em duas: a preparação a quente e a preparação a frio. De seguida, apresenta-se cada uma.

Na preparação a quente são produzidos os seguintes componentes:

- Perfis de Piso: a peça do pneu que se encontra em contacto com o solo;
- Paredes: faces laterais do pneu, onde se pode ler a dimensão, características da carga, pressão, velocidade e utilização do pneu;
- Cunhas;
- Talões: aros de arame de aço impregnados de composto de borracha, com dimensões específicas em diâmetro, número e combinação de arames.

Por sua vez, na preparação a frio, é produzido o seguinte:

- Tela metálica;
- Tela têxtil;
- Camada interna: garante que o pneu seja estanque (não perder ar);
- Cinta metálica: cordas de aço impregnadas de composto de borrachas, cortadas de acordo com os requisitos de cada pneu;
- Cinta têxtil.

Depois de estes componentes serem produzidos, são transportadas para a próxima fase, a construção, por carros de piso e/ou cassetes, ver figura 3.5.



Figura 3.5: Cassetes de transporte das paredes [16].

3.2.4 Departamento III - Construção

A construção é um processo complexo, não só porque estamos a falar de peças de borracha, que nesta altura ainda apresentam um comportamento plástico, mas também porque na montagem tudo tem de estar colocado no sítio certo e com a maior precisão.

Esta fase é realizada num módulo constituído por duas máquinas: a KM (*Karcass Machine*) e a PU (*Pressure Unity*).

Na máquina KM ocorre a construção da carcaça usando os talões, as telas têxteis, as paredes e a camada estanque do pneu, ver figura 3.6. Por sua vez, na máquina PU incorpora-se à carcaça a tela metálica, as cintas e o piso, ver figura 3.7.

No final desta fase obtém-se um produto semiacabado designado por "pneu em cru" ou "pneu em verde", que é transportado para a próxima fase em tapetes automatizados.

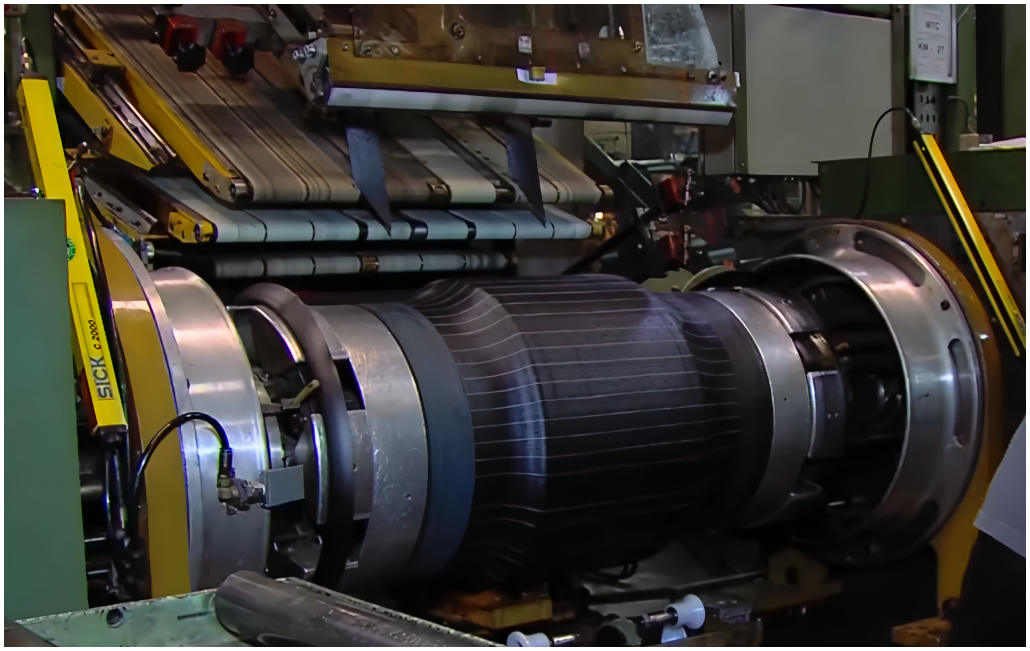


Figura 3.6: Máquina KM [16].

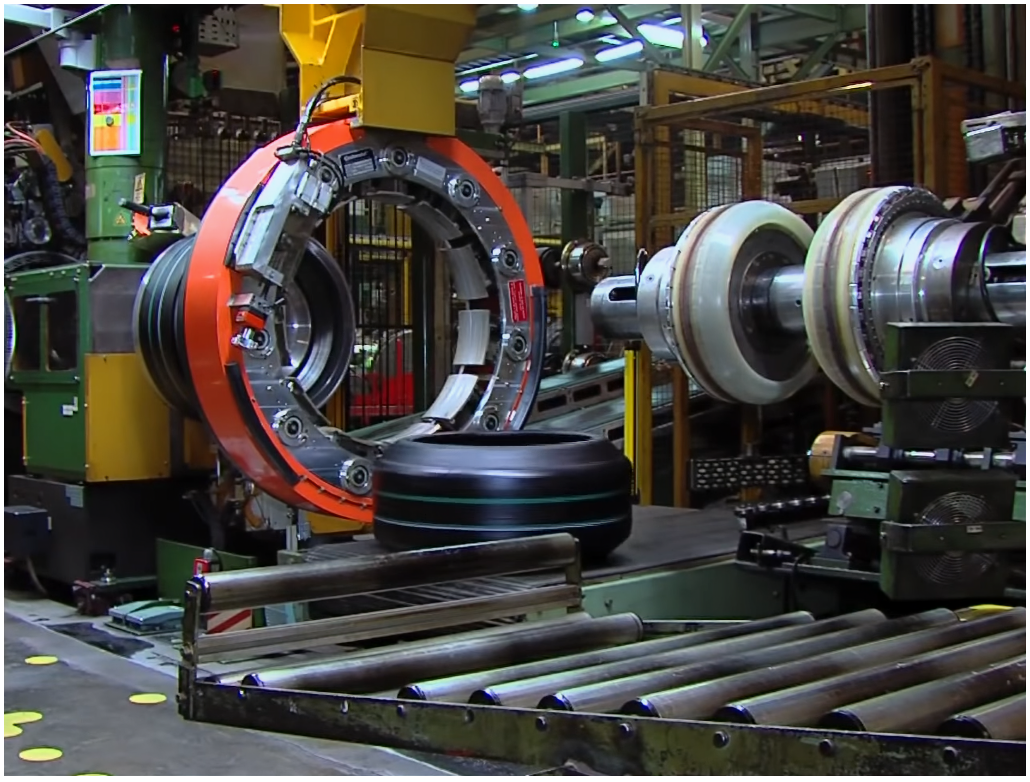


Figura 3.7: Máquina PU, onde se observa o "pneu em verde" [16].

3.2.5 Departamento IV - Vulcanização

Antes da vulcanização, os pneus vão para as cabines de pintura, onde se aplica uma solução que irá melhorar o acabamento, prolongando o seu tempo de vida. Posteriormente, são armazenados em carros e transportados para as prensas, onde irá ocorrer a vulcanização, ver figura 3.8.

A vulcanização consiste numa reação química onde a borracha no estado plástico atinge o estado elástico. Este processo é conseguido através de temperaturas elevadas, por exemplo, para um pneu ligeiro cerca de 175°C, e pressão de vapor de água durante um dado período de tempo que varia consoante a dimensão do pneu, mas que em média é de 11 minutos.

Finalizada a vulcanização, o pneu segue para a zona de inspeção final.



Figura 3.8: Prensa de vulcanização [17].

3.2.6 Departamento V - Inspeção Final

A última fase do processo produtivo corresponde à inspeção final e tem como função avaliar a qualidade do produto, confirmando se todos os pneus produzidos cumprem todos os requisitos.

Inicialmente, é feita uma avaliação visual, para verificar se existem falhas de aparência, ver figura 3.9. Por fim, através de máquinas, realizam-se vários testes de forma a avaliar algumas propriedades, como por exemplo, a geometria e o balanceamento.

Os pneus que forem aprovados, seguem para a próxima fase do sistema produtivo.



Figura 3.9: Inspeção visual de um pneu [18].

3.2.7 Armazenamento e expedição do Produto Acabado

Os pneus que obtiveram aprovação na inspeção final são encaminhados para o armazém de produto acabado, ver figura 3.10, através de um sistema Transportador Aéreo de Pneus. Seguidamente são paletizados segundo as suas características, em paletes metálicas. Ficam no armazém até irem para o cliente final. Antes dos pneus entrarem nos camiões, são novamente inspecionados, de forma a verificar se existe algum defeito.

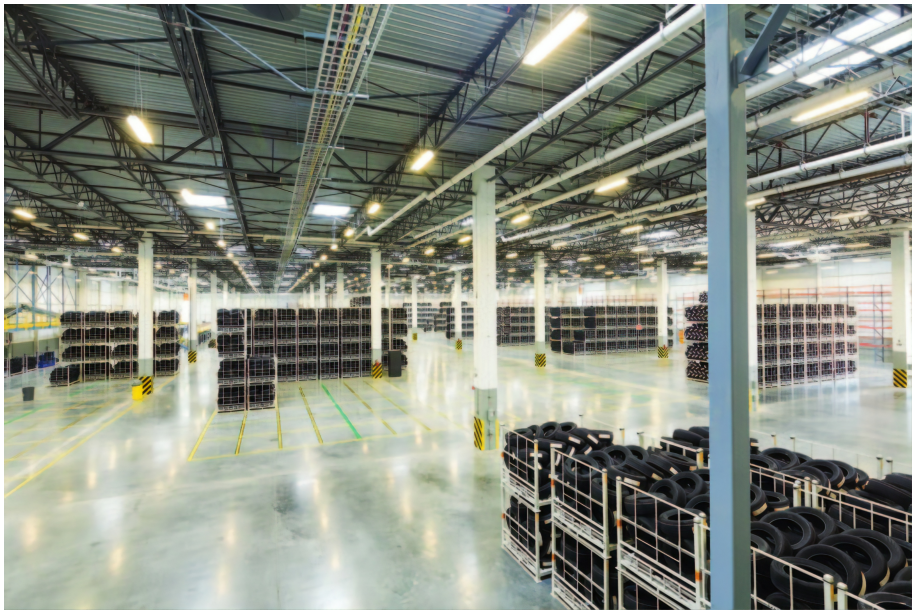


Figura 3.10: Armazém de produto acabado [19].

3.3 Análise do processo de Misturação

Nesta secção, descrever-se-á, com maior detalhe, o processo de misturação.

A figura 3.11 representa um esquema do processo de misturação, onde se pode observar diferentes compostos consoante a sua posição no processo: os *masters* e os finais.

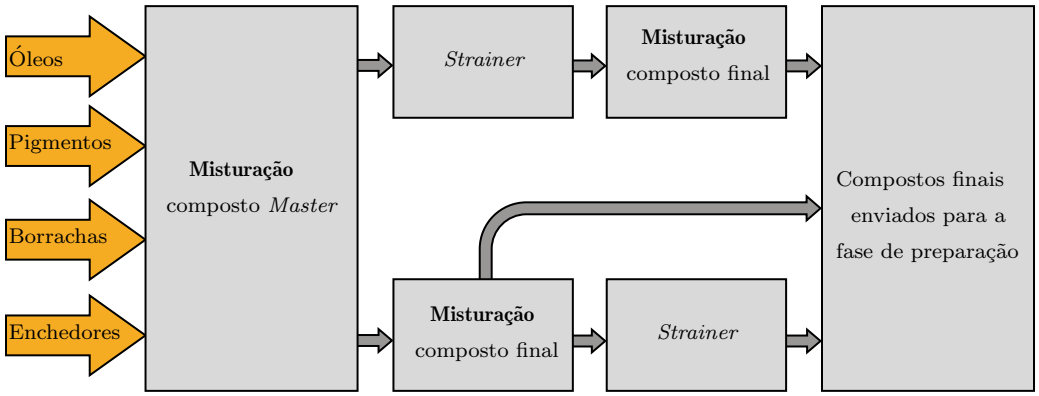


Figura 3.11: Esquema do processo de misturação.

3.3.1 Matérias-Primas

O processo de misturação inicia-se com as matérias-primas, ver figura 3.11. Seguidamente, caracterizar-se-á os quatro tipos de matérias-primas utilizadas: óleos, pigmentos, borrachas e enchedores.

3.3.1.1 Óleos

Os óleos influenciam diferentes fases do sistema produtivo. Na fase de misturação, permitem a incorporação de novos ingredientes mais facilmente, com especial destaque para os enchedores, uma vez que os óleos afetam as propriedades da borracha, tornando a mistura com uma rigidez inferior. Na fase de preparação, diminuem a fricção nos processos de extrusão e calandragem, o que reduz a probabilidade de ocorrer pré-vulcanização do composto de borracha. Ainda atuam na vulcanização, melhorando o comportamento do composto, o que irá influenciar o fluxo de borracha no molde [20].

Os óleos são designados ajudantes de processamento, sendo classificados em:

- amaciadores;
- plastificadores;
- promotores de adesividade.

3.3.1.2 Pigmentos

Elementos que se consideram pigmentos são os seguintes [21]:

- **Antidegradantes:** evitam a deterioração do composto provocada por influência de fatores ambientais (ar, luz, calor e radiação). Tendo em conta a proteção que se pretende estabelecer, pode utilizar-se diferentes tipos de ceras e de antioxidantes;
- **Ativadores:** juntamente com os aceleradores favorecem a vulcanização. Exemplos de ativadores: óxido de zinco, ácido esteárico ou estearato de zinco;
- **Aceleradores:** elementos químicos que controlam a taxa de vulcanização, contribuindo para a obtenção das propriedades desejadas. Cada composto, por norma, apresenta mais do que um tipo de acelerador. No entanto, não é impossível apresentar apenas um;
- **Agentes de vulcanização:** enxofre, provoca a vulcanização da borracha, responsável pelo estabelecimento de ligações permanentes, transformando o estado plástico em elástico.

De notar que os ativadores, aceleradores e agentes de vulcanização são considerados componentes de vulcanização, visto que têm influência no processo de vulcanização.

3.3.1.3 Borrachas

A borracha é o componente base do composto de borracha obtido. Existem dois tipos de borracha:

- Natural: obtida da coagulação do látex da árvore seringueira;
- Sintética: obtida a partir de derivados de petróleo.

3.3.1.4 Enchedores

Os tipos de enchedores utilizados são:

- Sílica;
- Negro de fumo;
- Carbonato de cálcio.

Os enchedores têm influência nas propriedades do composto, sendo as seguintes características melhoradas pela sua utilização:

- dureza;
- resistência ao desgaste;
- resistência à abrasão;
- resistência ao rasgo.

3.3.2 Linha de misturação

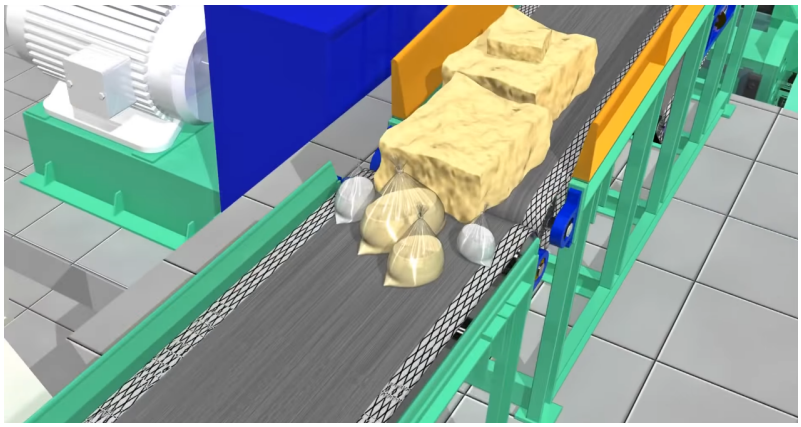
Existem dois tipos de linha de misturação: as linhas simples e as linhas *Tandem*. As linhas *Tandem* apresentam dois andares de misturação. As linhas simples, apenas um. O misturador que se utiliza em cada uma das linhas assume o nome das mesmas, assim pode afirmar-se que existem dois tipos de misturador: os misturadores simples e os misturadores *Tandem*. Posteriormente, explicar-se-á com mais detalhe, as diferenças.

Na Continental Mabor existem linhas de misturação simples e de misturação *Tandem*.

O processo numa linha de misturação começa com o transporte, doseamento e pesagem de pós granulados. A alimentação é efetuada segundo uma receita diretamente para a câmara de misturação. A alimentação dos polímeros é assegurada pelo transportador-balança, que contém uma passadeira rolante, ver figura 3.12.



(a) Pesagem



(b) Transporte

Figura 3.12: Transportador-balança [22]

Assim, as matérias-primas entram pela porta de alimentação que é acionada por um cilindro hidráulico que funciona em modo manual ou automático.

Depois de entrarem na câmara de misturação, adiciona-se os enchedores e óleos, enquanto que o martelo exerce pressão de forma a garantir a entrada de todas as matérias-primas no misturador. O martelo é acionado por um sistema hidráulico constituído por dois cilindros. Existe um circuito interno de água que garante a refrigeração do martelo. É nesta câmara que ocorre a misturação propriamente dita, com o apoio de dois rotores, que apresentam a mesma velocidade, contudo em direções contrárias no sentido do centro. De notar que a velocidade de trabalho dos rotores pode ser variável. A temperatura da câmara é ajustada para um valor previamente estabelecido. Isto é possível, visto que existe um circuito fechado de água que assegura o controlo interno da temperatura da câmara e a refrigeração interna de cada rotor.

Nas figuras 3.13 e 3.14 apresenta-se um misturador simples e um misturador *Tandem*, respetivamente. A grande diferença entre os dois, é que o misturador *Tandem* apresenta duas câmaras de misturação distintas.

De notar que o misturador está acoplado a uma caixa redutora, estando esta acoplada a um motor, como se verifica na figura 3.15. No caso do misturador *Tandem*, este apresenta dois motores e duas caixas redutoras, estando cada conjunto motor/caixa redutora em cada andar de misturação, uma vez que possuí duas câmaras de misturação.

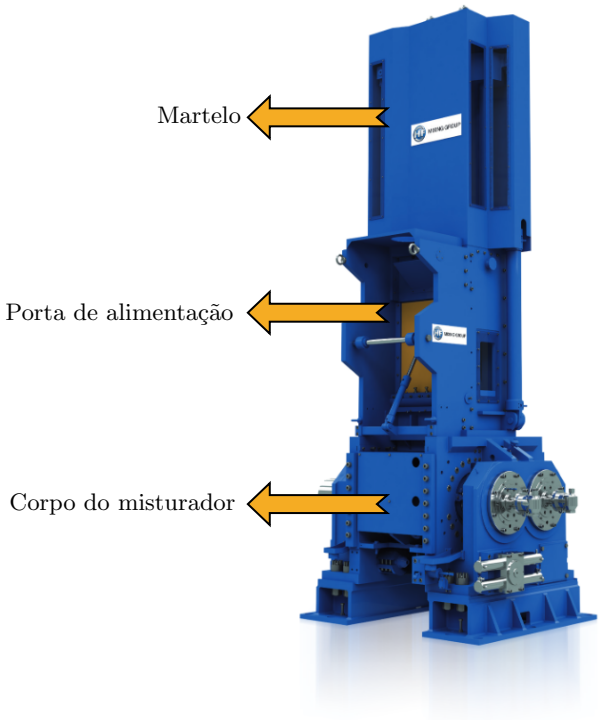


Figura 3.13: Misturador simples (Adaptado de [23]).

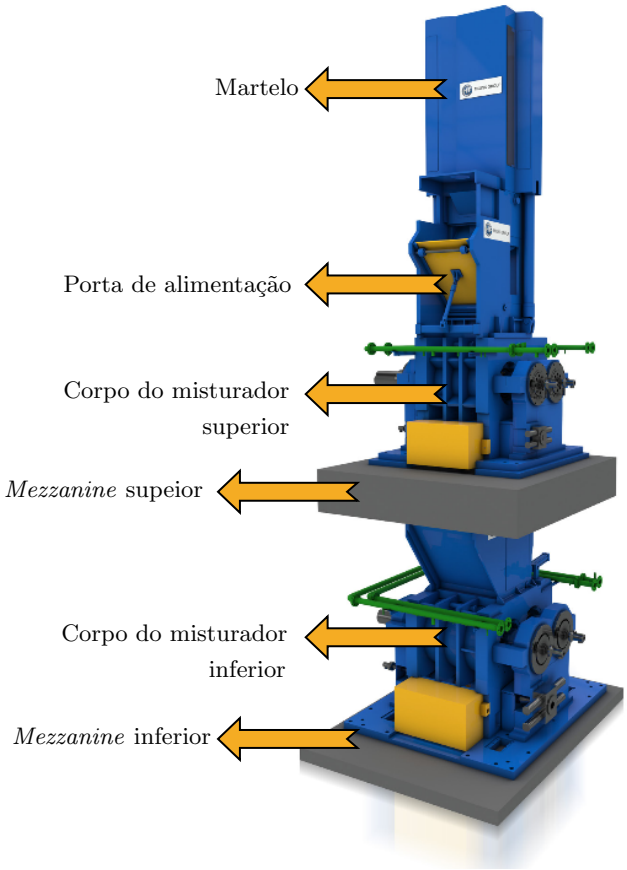


Figura 3.14: Misturador *Tandem* (Adaptado de [23]).

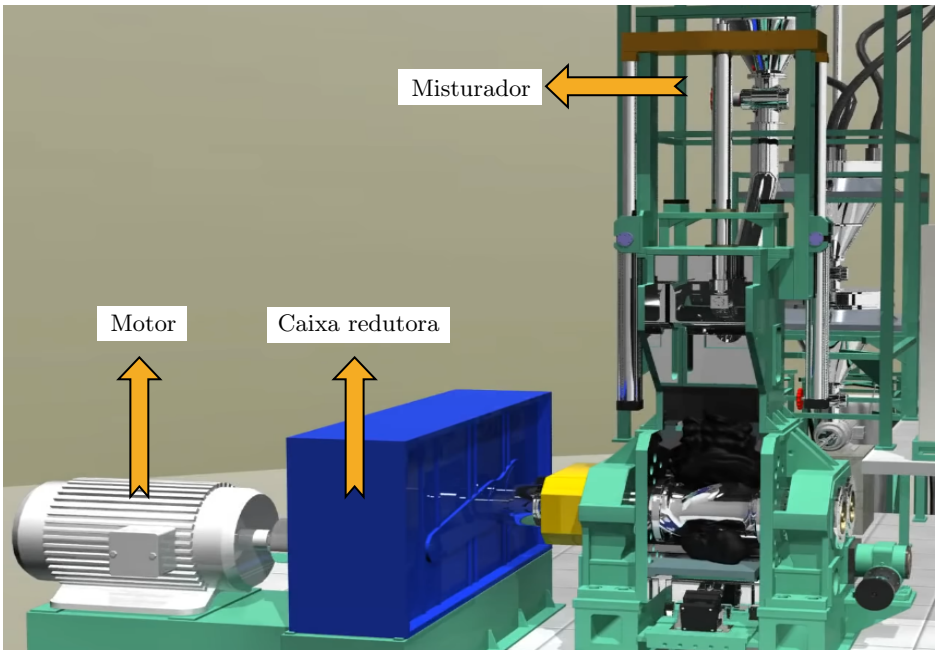


Figura 3.15: Sistema de acionamento do misturador (Adaptado de [22]).

Terminada a misturação, o composto sai pela porta de descarga diretamente para a extrusora. A porta de descarga é acionada por um atuador hidráulico que funciona em modo manual ou automático, sendo refrigerada por um circuito fechado de água.

A extrusora tem como função homogeneizar a carga. A extrusora é constituída por dois parafusos, que juntamente com o corpo da extrusora se encontram a uma temperatura pré-estabelecida. A regulação desta temperatura é realizada através de um circuito fechado de água. Os parafusos da extrusora funcionam com velocidade variável, sendo a velocidade estabelecida consoante a quantidade de borracha existente, e em direções opostas, ambas no sentido do centro. Feito isso, a carga segue para a calandra.

A calandra é responsável por perfilar a borracha numa folha contínua de largura pré-definida e espessura regulável. É constituída por dois rolos sobrepostos que funcionam com velocidade variável, dependendo da velocidade dos parafusos da extrusora. À semelhança do que acontecia com os parafusos da extrusora, também os rolos da calandra são refrigerados através de um circuito fechado de água.

A extrusora e a calandra estão acoplados, formando um único conjunto, ver figura 3.16.

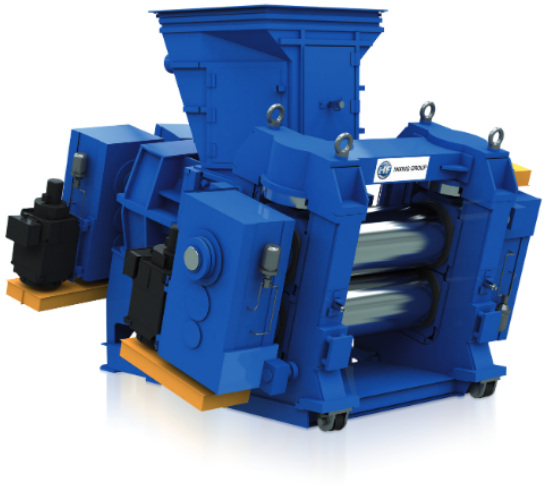


Figura 3.16: Conjunto extrusora-calandra [23].

À saída do conjunto extrusora-calandra, pode existir um equipamento para garantir a homogeneização final. Esse componente é o moinho de homogeneização, ver figura 3.17. Na Continental Mabor este componente apenas está presente nas linhas de misturação mais antigas, sendo que na linha em análise não está presente. O moinho de homogeneização é constituído por um conjunto de lâminas de corte de forma a garantir que a borracha é reencaminhada através de um rolo homogeneizador, reentrando no moinho e conseguindo assim uma melhor misturação. Para além disso, possui dois cilindros que apresentam velocidade variável.

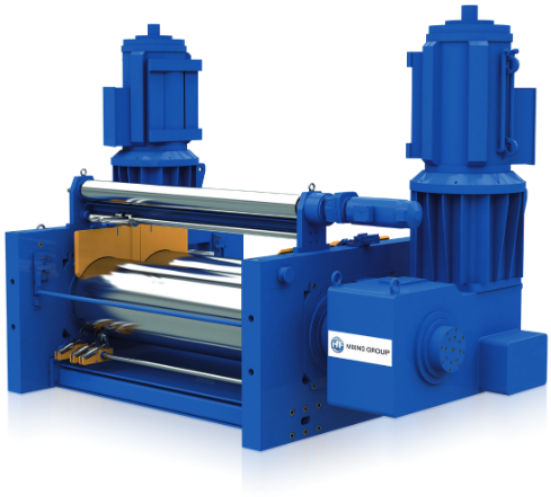


Figura 3.17: Moinho de homogeneização [23].

Após o composto sair do conjunto extrusora-calandra, sob a forma de folha contínua, é marcado continuadamente com uma roda de marcação mecânica, ver figura 3.18.

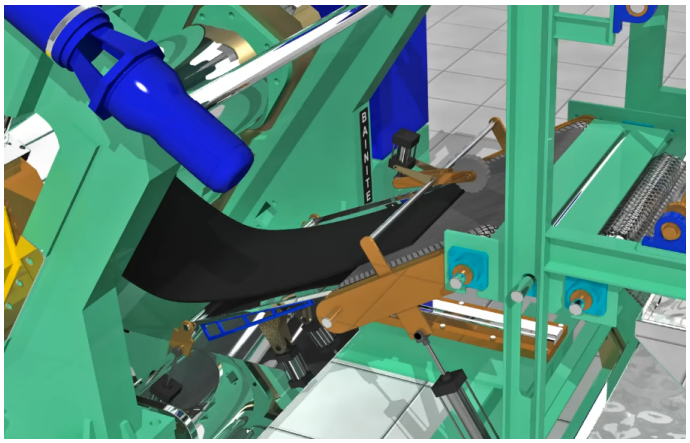


Figura 3.18: Marcação mecânica [22].

Posteriormente, passa por uma unidade de *batch-off*, onde é mergulhado num tanque com um soluto antiaderente que ao ser incorporado na folha do composto facilitará o processo de empilhamento e armazenamento, ver figura 3.19.

De seguida, realiza-se o arrefecimento e a secagem do composto. É importante realizar o arrefecimento e secagem, uma vez que o composto encontra-se a uma temperatura de cerca de 150°C e só se consegue empilhar para temperaturas não superiores a 40°C. Nesta fase verifica-se um *loop* de composto, ou seja, uma disposição ondulada do vão de composto na secagem, ver figura 3.20. O túnel de arrefecimento contém ventiladores laterais em funcionamento automático, ativando sempre que detetam a presença de borracha, ver figura 3.21.

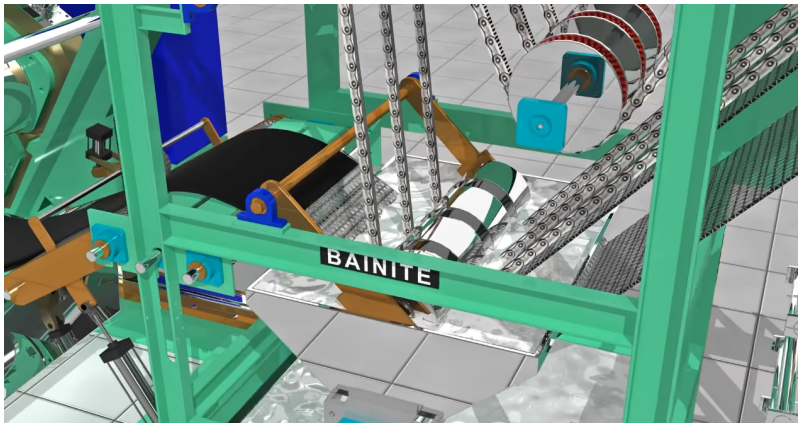


Figura 3.19: Banho no tanque [22].

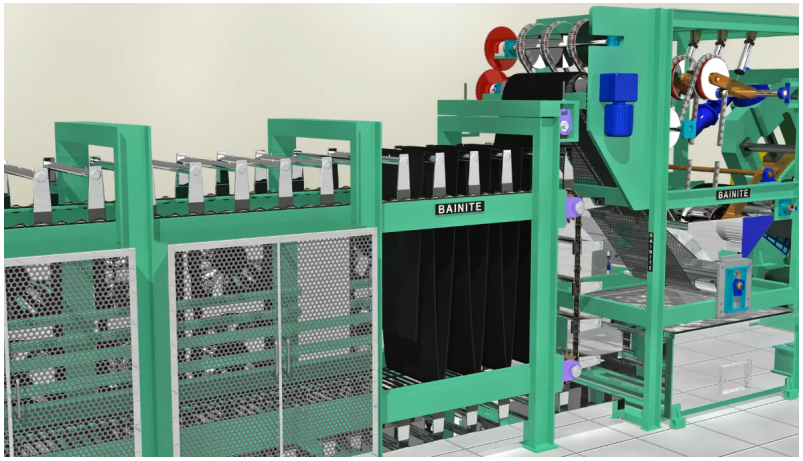


Figura 3.20: *Loop* de composto [22].

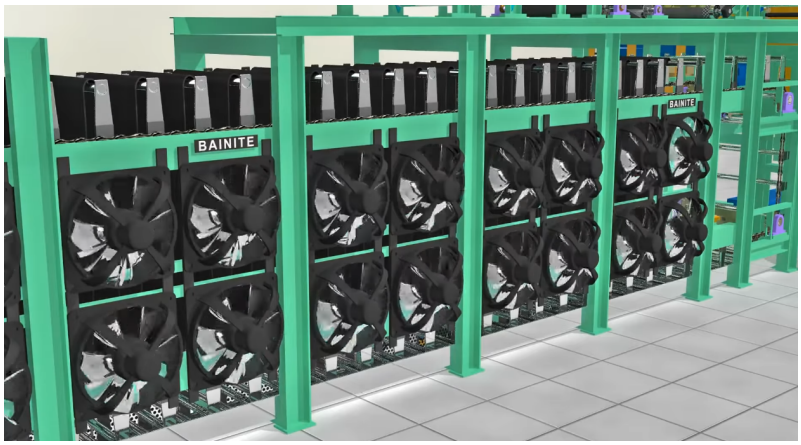


Figura 3.21: Ventiladores laterais [22].

Depois de o composto secar e arrefecer completamente, é necessário cortar e empilhar. Através de passadeiras transportadoras ascendentes consegue-se transferir o composto para a zona de empilhamento localizada na *mezzanine* superior, ver figura 3.22.

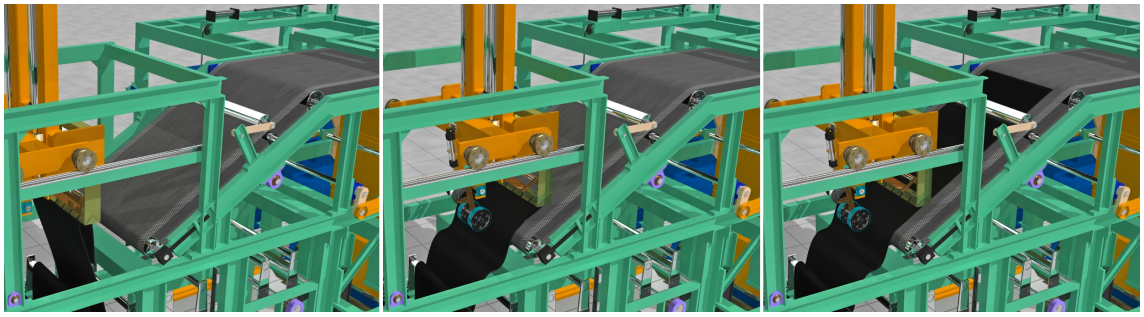
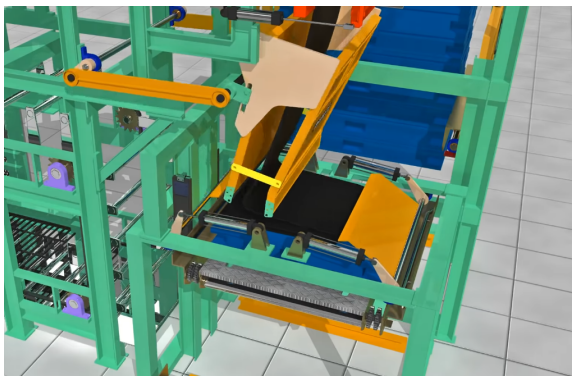
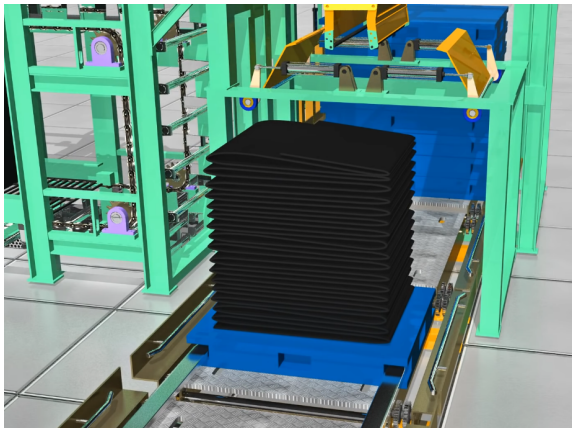


Figura 3.22: Transporte do composto para a zona de empilhamento [22].

O sistema de empilhamento permite armazenar a borracha em mesas próprias, sendo o empilhamento realizado de forma automática recorrendo a paletes. É por esta razão que este sistema de empilhamento também é designado de sistema paletizador. A figura 3.23 representa o processo de empilhamento. As paletes são posteriormente identificadas e armazenadas num armazém automático.



(a) Processo de empilhamento



(b) Palete pronta a ser transportada

Figura 3.23: Sistema de empilhamento [22].

3.4 Conclusões

O sistema produtivo da Continental Mabor pode ser dividido em três grandes etapas: receção de matérias-primas, processo produtivo, armazenamento e expedição do produto acabado. A etapa correspondente ao processo produtivo pode ser dividida em cinco fases: misturação, preparação, construção, vulcanização e inspeção final, correspondendo cada uma a um departamento. Assim, a Continental Mabor é constituída por cinco departamentos, e por dois armazéns, o de matérias-primas e o de produto acabado.

Na Continental Mabor existem dois tipos de linha de misturação, as linhas simples e as linhas *Tandem*. As linhas *Tandem* apresentam dois andares de misturação, enquanto que as linhas simples apenas um.

O misturador utilizado em cada uma das linhas assume o nome das mesmas, assim pode afirmar-se que existem dois tipos de misturador: os misturadores simples e os misturadores *Tandem*. O misturador está acoplado a uma caixa redutora, estando esta acoplada a um motor, constituindo o sistema de acionamento do misturador. No caso do misturador *Tandem*, este apresenta dois motores e duas caixas redutoras, estando cada conjunto motor/caixa redutora em cada andar de misturação.

Capítulo 4

RCM - Manutenção Centrada na Fiabilidade

4.1 Introdução

Nas empresas, uma interrupção de serviço pode pôr em risco a segurança, a saúde e o meio ambiente, e, consequentemente, provocar consequências económicas. É importante atuar de forma responsável na manutenção dos ativos para garantir a maior fiabilidade possível do sistema ao menor custo. Manter os ativos a trabalhar nas suas melhores condições e evitar que uma falha gere acidentes é cada vez mais uma preocupação. A metodologia RCM procura responder a estas necessidades [24].

Este capítulo descreve a metodologia RCM. A descrição consiste numa análise das sete questões da metodologia, sendo que as primeiras cinco se referem ao FMEA/FMECA - Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade.

Deste modo, começar-se-á por uma revisão bibliográfica sobre a metodologia FMEA/ FMECA. Enunciam-se os vários acontecimentos cronológicos, posteriormente, abordam-se os diferentes conceitos, recorrendo a definições para facilitar a compreensão. Apresenta-se uma caracterização da metodologia FMEA e FMECA e as principais diferenças entre as duas, assim como as diferentes categorias. Por fim, descrever-se-á todo o procedimento FMEA/FMECA e os formulários que devem ser preenchidos.

Posteriormente, as últimas duas questões da metodologia RCM e o processo que permite selecionar a técnica de manutenção mais adequada para cada modo de falha irão ser descritos e analisados. O processo baseia-se num diagrama de decisão, no qual os modos de falha são classificados numa categoria de consequências e avaliados relativamente às técnicas de manutenção consideradas na metodologia RCM.

4.2 Descrição da metodologia RCM

A metodologia RCM consiste num processo, ver figura 4.1, utilizado para estabelecer o procedimento que visa garantir que um equipamento ou sistema continue a cumprir a sua função no contexto de operação atual. Esta metodologia implica a análise de sete questões para um determinado equipamento ou sistema [25]:

1. Quais as funções do equipamento no seu contexto operacional?
2. De que maneiras podem essas funções falhar?
3. O que causa cada falha de função?
4. O que acontece quando uma falha ocorre?
5. Qual a importância das consequências de cada falha?
6. O que pode ser feito para prever ou prevenir cada falha?
7. O que fazer quando não é possível ou justificável uma política de manutenção preventiva?

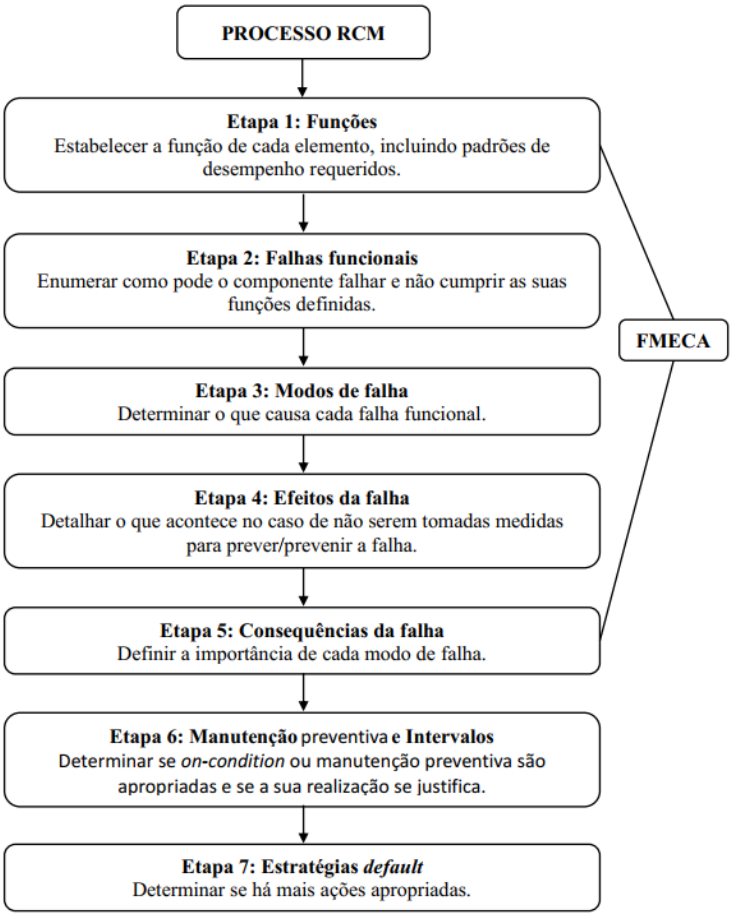


Figura 4.1: Etapas do processo RCM (Adaptado de [26]).

As respostas às cinco primeiras perguntas permitem compreender o funcionamento do equipamento no contexto operacional, e determinar as causas de falhas predominantes. Esta análise irá permitir também avaliar a criticidade do equipamento e perceber qual é a sua importância no sistema em que se encontra [25]. Como se observa na figura 4.1, as cinco primeiras perguntas correspondem à análise FMECA.

Assim, para compreender a metodologia RCM, é necessário responder às questões 6 e 7. Estas duas últimas questões da metodologia RCM consistem em determinar qual a

técnica de manutenção mais apropriada para cada modo de falha de um equipamento. O processo de seleção é realizado através de um diagrama de decisão, designado por diagrama de decisão RCM.

4.3 FMEA/FMECA - Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade

4.3.1 Cronologia

O primeiro documento oficial que retrata a metodologia FMEA/FMECA é o procedimento militar MIL-P-1629, desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos a 9 de novembro de 1949. Esta norma cujo título é *Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis* foi utilizada como uma técnica de avaliação da fiabilidade para determinar as falhas em equipamentos e efeitos nos sistemas. As falhas foram classificadas segundo as suas influências no sucesso das missões e na segurança das pessoas e equipamentos [27].

A Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA) elaborou um procedimento FMECA para ser utilizado no Programa Apollo, em 1966 [28]. Este procedimento foi, posteriormente, utilizado noutros programadas espaciais da NASA, tais como: Viking, Voyager, Magellan e Galileo [29]. Para além da indústria espacial, também o setor da aviação civil iniciou precocemente a aplicação da metodologia FMEA/FMECA, com a Society of Automotive Engineers a publicar a norma ARP926, em 1967 [30].

Na década de 1970, foram vários os setores que começaram a utilizar a técnica FMEA. Um desses setores foi o setor automóvel, onde se destaca a utilização do FMEA pela Ford Motor Company, quer internamente, para alcançar melhorias nas áreas de projeto e produção, quer externamente, através da estimulação do seu uso pelas empresas fornecedoras [31]. Em 1972, a NASA recomendou o uso do FMEA na avaliação da exploração de petróleo *offshore* ao Serviço Geológico dos Estados Unidos [32]. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos aplicou o FMEA às estações de tratamento de águas residuais, em 1973 [33]. Em 1974, o procedimento militar MIL-P-1629 foi substituído pela norma MIL-STD-1629. Esta alteração ocorreu após a elaboração de um procedimento FMECA pela NASA. Contudo, por vezes, é atribuído incorretamente o desenvolvimento do FMECA à NASA [34].

A norma militar MIL-STD-1629A surgiu em 1980, e tinha como objetivo substituir as normas MIL-STD-1629 e MIL-STD-2070 [35]. Na Europa, a Comissão Eletrotécnica Internacional publicou, em 1985, a norma IEC 812 que abordava a metodologia FMEA/FMECA para uso geral [36].

No final da década de oitenta, em 1988, a Organização Internacional de Normalização lançou a ISO 9000, pretendendo consciencializar as organizações relativamente aos seus deveres e compromissos quanto à satisfação das necessidades e expetativas dos seus clientes. Esta norma estabelece os conceitos, princípios e vocabulário fundamentais para o desenvolvimento de sistemas de gestão da qualidade [37]. Uma equipa de profissionais das empresas Chrysler Corporation, Ford Motor Company e General Motors Corporation desenvolveram a norma QS 9000, como uma interpretação da ISO 9000. Esta norma define o sistema de qualidade exigido pelas três empresas a fornecedores internos e fornecedores

externos de produção e fornecimento de materiais e componentes [27]. No âmbito da lógica da melhoria contínua, o método FMEA aparece como um instrumento de apoio possível de ser utilizado pelas empresas [31].

Em 1998, a norma militar MIL-STD-1629A foi cancelada não tendo tido substituição. Contudo, ainda é bastante utilizada em aplicações militares e espaciais [38].

Em janeiro de 2006, foi publicada uma segunda edição da norma IEC 812, com a designação IEC 60812. A nomenclatura da norma segue o preconizado desde 1 de janeiro de 1997, que indica que todas as publicações da IEC são emitidas com uma designação na série 60000. Esta segunda edição cancela e substitui a primeira, publicada em 1985, constituindo numa revisão técnica [36].

4.3.2 Conceitos

Para utilizar corretamente esta técnica é necessário ter um conhecimento prévio dos conceitos que irão ser abordados, nomeadamente, modo de falha, efeitos e causa. Recorrendo ao Dicionário da Língua Portuguesa da Porto Editora e às normas, é possível apresentar uma definição para cada um dos conceitos.

4.3.2.1 Modo de Falha

Segundo o Dicionário da Língua Portuguesa [39]:

- **Modo:** "forma particular de ser ou de estar; jeito, estilo"; "maneira de fazer algo; método, sistema"; "forma de se comportar; conduta, procedimento";
- **Falha:** "imperfeição física ou moral; ponto fraco; defeito"; "avaria"; "ato ou efeito de falhar".

Tendo em conta as duas definições anteriores é possível definir modo de falha como: a forma do defeito; maneira na qual o defeito se apresenta. A definição obtida é semelhante às apresentadas nas normas: maneira pela qual um componente falha [36]; maneira pela qual uma falha é observada; geralmente descreve a maneira como a falha ocorre e o seu impacto na operação do equipamento [35].

O modo de falha depende do componente em análise, visto que cada componente apresenta características particulares, tais como função, condições de trabalho, materiais, modo de fabrico e qualidade.

É importante realizar uma correta identificação dos modos de falha, existindo duas abordagens: a funcional e a estrutural.

A abordagem funcional baseia-se unicamente na função do componente, sendo o modo de falha apresentado como negação da função. Esta abordagem é simplista e não necessita de informações do projeto e/ou de engenharia [37].

Por outro lado, a abordagem estrutural é mais complexa, sendo muitas vezes difícil de aplicar. Tal acontece, uma vez que se necessita de especificações de engenharia, que nem

sempre se encontram disponíveis. Independentemente da abordagem selecionada é importante que se defina a função do componente, pois é a referência que permite identificar se o item está ou não em falha [37].

Na tabela 4.1 apresenta-se um exemplo que permite perceber as diferenças entre as duas abordagens:

Tabela 4.1: Modos de falha obtidos com a abordagem funcional e estrutural.

Abordagem	Componente	Função	Modo de Falha
Funcional	Eixo	Transmitir movimento	Não transmitir movimento
Estrutural			Desgaste

4.3.2.2 Efeito do Modo de Falha

Segundo o Dicionário da Língua Portuguesa [39]:

- **Efeito:** "resultado necessário ou acidental de uma causa; consequência"; "objetivo; finalidade; destino".

De facto, efeito do modo de falha pode ser definido como consequência de um modo de falha em termos de operação, função ou estado do componente. Os efeitos do modo de falha são classificados por [35; 36]:

- Efeitos locais: consequências que um modo de falha tem sobre a operação, função ou estado do item específico que está em análise;

- Efeitos intermédios: consequência que um modo de falha tem sobre a operação, função ou estado do item nos níveis intermédios, que não correspondem ao próprio item, nem ao sistema;

- Efeitos finais: consequência que um modo de falha tem sobre a operação, função ou estado do sistema.

Assim, uma vez que o efeito é a consequência do modo de falha, este retrata as alterações que a falha provoca no sistema, sendo a forma de como o modo de falha é detetado ao nível do sistema. O modo de falha ocorre no interior de componentes, subsistemas, gerando efeitos externos a este. Sendo assim, o modo de falha é uma ação interna que ocorre ao nível do componente e o efeito uma ação externa que ocorre ao nível do sistema, ver figura 4.2.

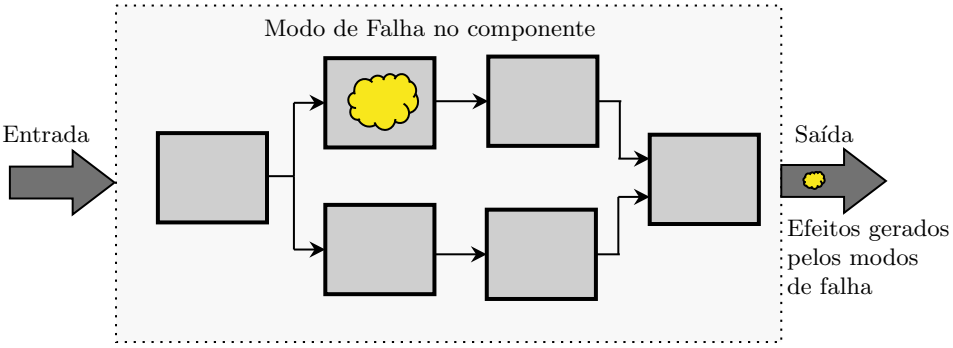


Figura 4.2: Representação esquemática onde se observa a ação interna (modo de falha) e a ação externa (efeito).

4.3.2.3 Causa do Modo de Falha

Segundo o Dicionário da Língua Portuguesa [39]:

- **Causa:** "Tudo o que determina a existência de uma coisa ou um acontecimento"; "motivo; razão; origem"; "agente".

De facto, causas do modo de falha podem ser definidas como motivos que levaram o modo de falha a ocorrer. As causas podem ter origem nos componentes da vizinhança, ambiente, erros humanos, ou no próprio componente [37]. Os processos físicos ou químicos, defeitos de projeto, defeitos de qualidade, aplicação incorreta de peças são alguns processos que podem originar falhas [35].

4.3.3 FMEA

O FMEA - *Failure Mode and Effects Analysis* traduz-se na Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos. Como a própria designação indica o FMEA é um método qualitativo que retrata os possíveis modos de falha dos componentes, sistemas, projetos e processos e os efeitos originados por esses modos de falha. O modo de falha é utilizado para caracterizar a falha, sendo o efeito a forma como o modo de falha se manifesta. Cada componente pode apresentar mais do que um modo de falha e, por sua vez, cada modo de falha pode apresentar mais do que um efeito [37].

Para além disso, um dado efeito pode estar associado a diferentes modos de falha, ou seja, existem diferentes modos de falha que se manifestam no sistema da mesma forma, sendo mais evidente quando existe a associação de um componente a outro. Deste modo, a relação entre modo de falha e efeito não é clara. Contudo, se bem controlada, esta relação constitui um contributo significativo para a análise de fiabilidade e para estabelecer o plano de manutenção [37].

É igualmente importante estudar o que provoca o modo de falha. Apesar de muitos modos de falha estarem associados ao componente em análise, o estudo das causas permite aprofundar a relação entre o componente e a função, e originar atitudes mais criteriosas, que têm em conta os efeitos, nas primeiras manifestações, no sentido de atuar de forma a antecipar-se à perda da função devido à ocorrência do modo de falha [37].

O FMEA é um documento que tem como função servir como ferramenta para a previsão de falhas e auxilia o desenvolvimento de projetos de produtos, processos ou serviços. Pode evitar que problemas do passado se repitam, uma vez que é um documento atualizado e tem o registo de todas as alterações efetuadas ao longo do tempo [37].

4.3.4 FMECA

O FMECA - *Failure Modes, Effects and Criticality Analysis* é também designado por Análise de Modos de Falha, Efeitos e Criticidade. Ao longo do tempo diversos autores utilizavam a palavra FMEA, contudo, a referência correta seria ao FMECA [40–42].

De seguida, apresenta-se a diferença entre FMEA e FMECA [43]:

$$\text{FMECA} = \text{FMEA} + \text{C} \tag{4.1}$$

onde,

$$\text{C} = \text{Criticidade} = \text{Ocorrência} \cdot \text{Severidade} \tag{4.2}$$

Como se verifica pela equação 4.1 a diferença entre o FMEA e o FMECA está na criticidade. Assim, a metodologia FMECA tem em atenção tudo o que foi descrito para a metodologia FMEA mais a análise de criticidade. Por sua vez, a criticidade depende de dois fatores: a ocorrência e a severidade, equação 4.2. O índice de ocorrência caracteriza a probabilidade da falha acontecer e a severidade avalia a gravidade dos efeitos do modo de falha. Enquanto que o índice de severidade se relaciona com os efeitos dos modos de falha por todos os autores, o índice de ocorrência pode relacionar-se com o modo de falha ou as causas do modo de falha, dependendo do autor [37].

Para além do índice de ocorrência e de severidade, existe um terceiro índice, que se designa de índice de deteção das falhas. Este índice é um valor numérico que caracteriza a eficiência de deteção da falha, sendo que quanto maior for este valor, maior será a dificuldade de detetar a falha. À semelhança do índice de ocorrência, pode estar relacionado com os modos de falha ou com as causas do modo de falha. Assim, existem duas abordagens possíveis [41]:

- abordagem nº1: índice de deteção e de ocorrência baseados nos modos de falha;
- abordagem nº2: índice de deteção e de ocorrência baseados nas causas da falha.

Na maioria dos trabalhos não se esclarece qual a abordagem utilizada. Contudo, independentemente da abordagem que esteja a ser considerada os resultados obtidos são os mesmos [41].

No FMECA é necessário calcular o NPR – Número de Prioridade de Risco, que é obtido pela seguinte expressão [37]:

$$\text{NPR} = \text{Ocorrência} \cdot \text{Severidade} \cdot \text{Deteção} \tag{4.3}$$

Tendo em conta a equação 4.2 , a equação 4.3 pode ser escrita da seguinte forma:

$$\text{NPR} = \text{Criticidade} \cdot \text{Deteção} \tag{4.4}$$

Pela equação 4.3 verifica-se que o NPR depende do índice de ocorrência e de deteção, que por sua vez podem estar associados aos modos de falha ou às causas da falha. Sendo assim, o valor NPR é em algumas abordagens atribuído ao modo de falha e em outras a cada causa do modo de falha.

Para determinar os três índices discriminados anteriormente é necessário, previamente, estabelecer três tabelas. Na literatura existem tabelas que podem ser utilizadas para a análise deste trabalho, contudo estas três tabelas devem ser construídas tendo em conta parâmetros internos da empresa [44].

O desenvolvimento de um produto é um processo complexo, que pode ser dividido em três grandes fases: conceito/viabilidade, projeto/desenvolvimento e produção/operação. Como é de fácil compreensão, à medida que o projeto se desenvolve, torna-se mais difícil alterá-lo/corrigi-lo. Isto acontece, porque os custos, o tempo e os recursos necessários para efetuar corretamente esta alteração aumentam com o tempo decorrido desde o início do projeto [40].

Pela análise da figura 4.3 verifica-se que durante as duas primeiras fases do desenvolvimento de um produto cerca de 15% do custo total do projeto é investido e decide-se sobre cerca de 95% do custo do ciclo de vida do produto.

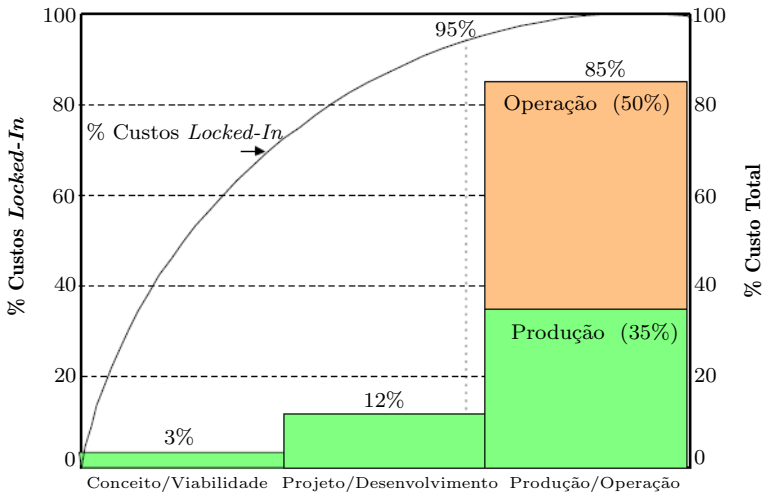


Figura 4.3: Custos associados às diferentes fases de desenvolvimento de um produto (Adaptado de [40]).

Pelos motivos anteriormente apresentados, o FMEA/FMECA deve ser iniciado nas fases iniciais do projeto. Quanto mais cedo se iniciar, menor será o custo associado a mudanças para melhoria do produto. Como nas fases iniciais a informação que se possui é reduzida, os modos de falha são analisados segundo a abordagem funcional. É durante estas fases iniciais que se deve recolher todas as especificações que permitam considerar este processo de análise ao longo do projeto. Decorridas as fases inicias, muitas características do produto foram, entretanto, recolhidas. Desta forma, a identificação e análise dos modos

de falha, pode ser realizada utilizando quer a abordagem funcional, quer a estrutural [37].

Apesar de ser vantajoso iniciar o FMEA/FMECA na fase de projeto, pelos motivos evidenciados anteriormente, tem de ficar claro que não se garante que todas as falhas dos processos seguintes do desenvolvimento do produto serão evitadas. Dada a complexidade e dificuldade de detetar as falhas, é normal que algumas ocorram durante a operação/produção. Deste modo, é importante ter em conta também o *feedback* do terreno [45]. Assim, surge o conceito de FMEA/FMECA modificado, que dá importância aos históricos do produto recolhidos durante a fase de uso. Esta abordagem permite reduzir o tempo gasto para o desenvolvimento do FMEA/FMECA, reduzir os custos e reduzir o número de pessoas envolvidas na elaboração do mesmo [46].

4.3.5 Categorias de FMEA/FMECA

O método FMEA/FMECA é aplicável a qualquer tipo de indústria, apresentando diferentes aplicações [47–54]. Contudo, não existe uma opinião generalizada relativamente às suas categorias.

Segundo Stamatis [42] o FMEA pode ser aplicado ao sistema, ao projeto, ao processo e ao serviço. Posteriormente, será efetuada uma breve explicação sobre cada categoria:

- **FMEA de Sistema:** permite analisar nas fases iniciais de conceito e projeto os sistemas e subsistemas, incluindo a interação entre os sistemas e os seus elementos. Este tipo de FMEA centra-se nos modos potenciais de falha causados por lacunas do sistema;
- **FMEA de Projeto:** utiliza-se para analisar produtos antes de estes seguiram para a produção. Este tipo de FMEA foca a atenção nos modos potenciais de falha causados por lacunas do projeto;
- **FMEA de Processo:** utiliza-se para analisar os processos de produção e montagem. Este tipo de FMEA centraliza a atenção nos modos potenciais de falha causados por lacunas do processo ou montagem;
- **FMEA de Serviço:** utiliza-se para analisar serviços antes que estes cheguem ao cliente. Este tipo de FMEA foca nos modos potenciais de falha causados por lacunas do sistema ou processo.

É possível estabelecer uma relação entre as diferentes categorias, ver figura 4.4.

Pela análise da figura 4.4 verifica-se que o FMEA de sistema é o ponto de partida para a elaboração dos restantes FMEAs. Partindo dos modos de falha do FMEA de sistema obtém-se todas as informações relativas aos FMEAs de projeto, processo e serviço. Embora os efeitos dos modos de falha sejam os mesmo em todos os tipos de FMEA, as causas dos modos de falha variam consoante o tipo de FMEA. As causas no FMEA de sistema tornam-se nos modos de falha do FMEA do projeto, que geram as suas próprias causas, causas essas que correspondem aos modos de falha no FMEA de processo/serviço. De notar que os efeitos dos modos de falha são sempre os mesmos, uma vez que a análise foi realizada considerando o utilizador final do produto.

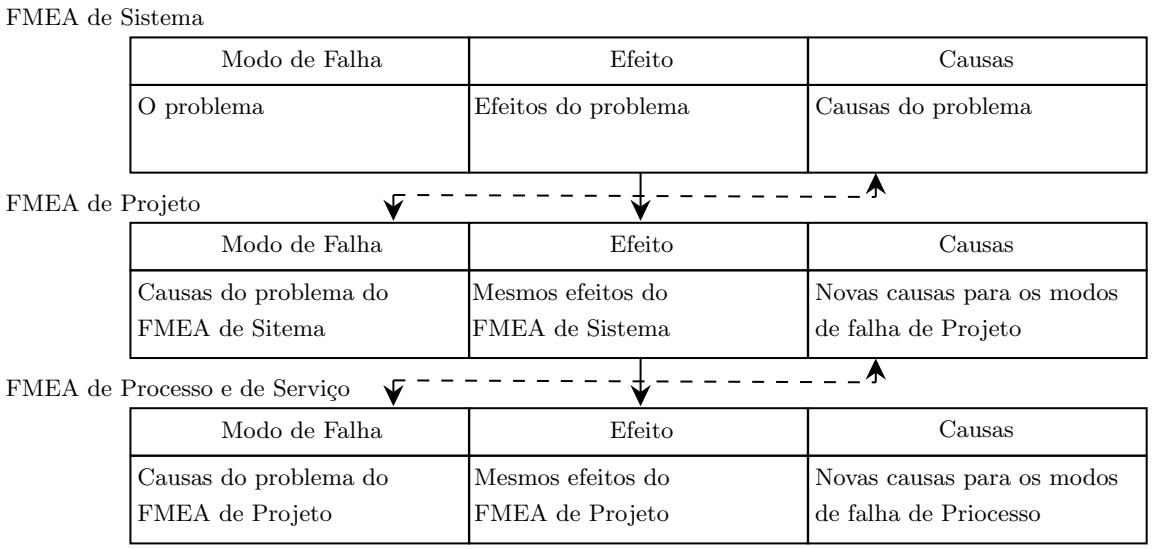


Figura 4.4: Iterações entre as diferentes categorias FMEA (Adaptado de [42]).

A Ford Motor Company apresenta apenas três categorias para a aplicação do FMEA/ FMECA: Conceito, Projeto e Processo [55].

As definições apresentadas por Stamatis de FMEA de projeto e processo são semelhantes às apresentadas pela Ford e a definição de FMEA de conceito apresenta-se semelhante à de FMEA de sistema de Stamatis [37].

4.3.6 Procedimento para a execução

Não existe um procedimento universal, sendo possível encontrar na literatura diferentes procedimentos, que são descritos tendo em conta a experiência dos seus autores. Apesar de serem diferentes, a grande maioria das etapas são semelhantes a todos os procedimentos, seguindo a mesma sequência [40; 42; 56].

Visto que existem diferentes opiniões, o procedimento apresentado foi elaborado tendo em conta principalmente a informação contida nas normas MIL-STD-1629A e IEC 60812 [35; 36]:

1. Escolha dos membros da equipa;
2. Análise e hierarquização do sistema;
3. Seleção do subsistema a analisar;
4. Estudo funcional e seleção de um estado de funcionamento;
5. Identificação de um modo potencial de falha;
6. Identificação dos efeitos possíveis do modo de falha;
7. Identificação das respetivas causas;
8. Identificação dos métodos de deteção e de prevenção;

9. Estimar a severidade dos efeitos do modo de falha em estudo;
10. Estimar a probabilidade de ocorrência do modo de falha;
11. Estimar a probabilidade de deteção do modo de falha;
12. Análise da criticidade;
13. Revisão do formulário e seleção das ações principais.

De notar que o procedimento previamente enunciado é referente à metodologia FMECA. O procedimento para o FMEA é muito semelhante, contudo não se realiza uma análise de criticidade, logo as etapas 9, 10, 11 e 12 não existem.

A figura 4.5 apresenta um fluxograma da análise FMECA [36]:

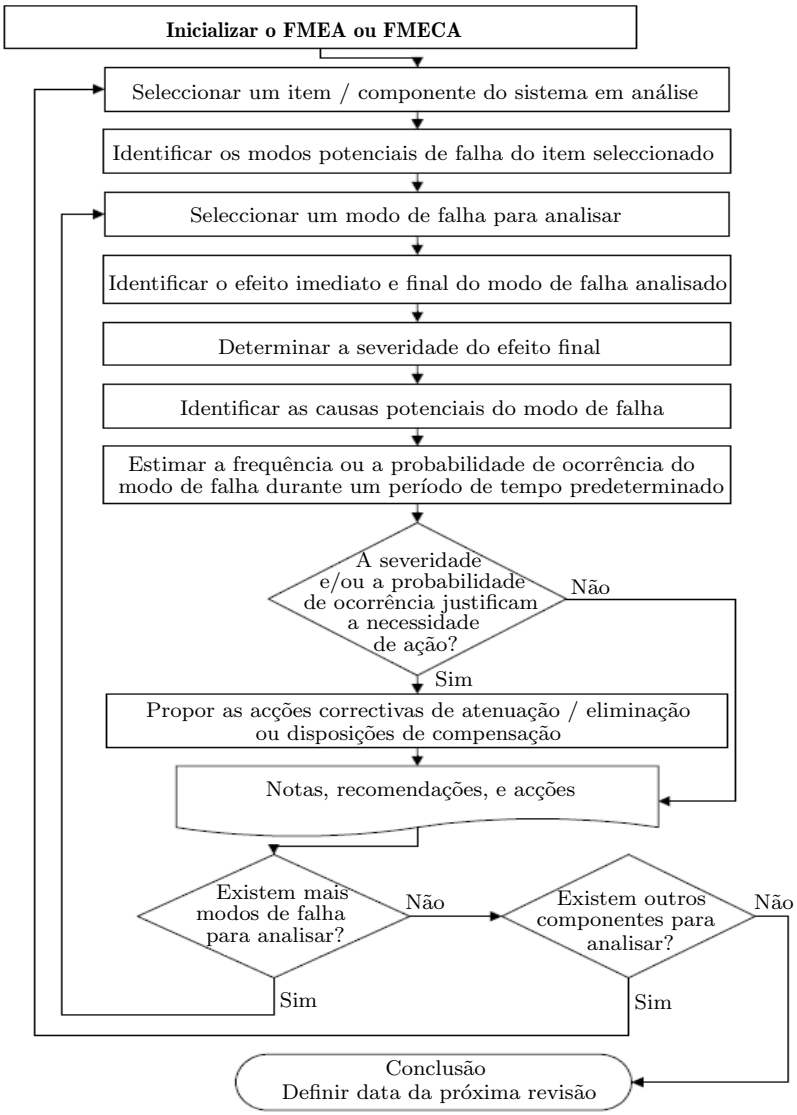


Figura 4.5: Fluxograma da análise FMECA (Adaptado de [36]).

As etapas acima mencionadas, serão descritas posteriormente.

4.3.6.1 Escolha dos membros da equipa

A maioria dos autores afirma que o FMEA deve ser desenvolvido por uma equipa de especialistas das diferentes áreas [40; 42]. Palady também defende que o FMEA deve ser realizado em equipa, mas afirma que pode ser realizado por uma única pessoa, apesar de não ser tão eficiente [41].

A equipa deve ser formada por especialistas das diferentes áreas, visto que a aplicação do FMEA vai exigir diversidade, qualidade e profundidade de informações [37]. Não há uma regra para definir o número de pessoas que devem integrar a equipa. Palady sugere um número de cinco a sete pessoas e Stamatis de cinco a nove pessoas [41; 42].

Palady recomenda que uma pessoa deve ser responsável pela duração do FMEA, pelo orçamento e pela eficácia do FMEA, enquanto que a equipa é responsável pelo seu desenvolvimento [41].

É necessário conter na equipa um responsável pelo projeto e pelo sistema, cuja função será tratar dos aspetos relacionados com o projeto, nomeadamente, modelo físico, modelos fiabilísticos, diagramas e que ficará responsável por implementar as decisões que ficarem acordadas. Para além disso, é importante ter na equipa uma pessoa especialista em FMEA, capaz de esclarecer dúvidas relativas a conceitos, organizar e registar todas as informações nos formulários. Os restantes membros da equipa são escolhidos em função do problema. É importante que os membros participantes tenham conhecimentos da metodologia FMEA [37].

4.3.6.2 Análise e hierarquização do sistema

Na análise do sistema, deve ser realizada a identificação e a hierarquização dos diferentes subsistemas e/ou componentes do mesmo [31]. É vantajoso representar o sistema através de diagramas simples realçando todas as funções importantes do sistema [36].

É durante esta fase que se define o sistema e identificam os diferentes componentes que o constituem. De notar que um componente não tem de ser necessariamente uma peça do equipamento. Quando o sistema é constituído por muitos equipamentos, para simplificar, pode e devem ser identificados os equipamentos que são mais críticos. Por componentes críticos, entendem-se aqueles cuja falha pode comprometer o sistema e/ou a segurança, os componentes cujo número de falhas é mais elevado, componentes novos e componentes que sofreram manutenção [37].

Nesta fase é importante definir o limite do sistema e o nível de análise pretendido. O limite do sistema consiste na interface física e funcional entre o sistema e o que o rodeia, nomeadamente, os outros sistemas com os quais o sistema em análise interage [31].

Nos sistemas mais complexos, os componentes dos sistemas podem ser agrupados em subsistemas. A definição do sistema e dos componentes é importante, uma vez que os modos de falha estão associados aos componentes, enquanto que os efeitos estão associados ao sistema, ver figura 4.2 [37].

4.3.6.3 Seleção do subsistema a analisar

Como o próprio nome indica, esta fase consiste em escolher o subsistema a analisar.

4.3.6.4 Estudo funcional e seleção de um estado de funcionamento

A descrição da função dos componentes deve ser o mais simples e exata, uma vez que é relevante na elaboração dos modos de falha, especialmente quando se utiliza a abordagem funcional. A descrição da função deve ser preparada pelo projetista e colocada em discussão para todos os membros da equipa responsável pela elaboração do FMEA [37].

Os desempenhos mínimos requeridos tanto no início do funcionamento do sistema como durante as fases de utilização e manutenção devem estar estabelecidos. Pode ser importante definir fatores como [36]:

- intervalo de tempo entre ensaios periódicos;
- intervalo de tempo mínimo requerido para a função;
- intervalo de tempo mínimo entre a ocorrência do modo de falha no sistema e a implementação de uma ação corretiva;
- procedimentos para realização testes de rotina se estes forem utilizados;
- procedimentos operacionais durante o funcionamento do sistema;
- tipo de controlo a realizar durante as fases operacionais;
- realização de manutenção corretiva e/ou preventiva.

4.3.6.5 Identificação de um modo potencial de falha

Os modos de falha correspondem a uma anomalia do componente que está a ser alvo de análise, sendo que todos os componentes do sistema são analisados. De forma a conseguir recolher todos os modos de falha dos componentes, devem ser consideradas quais são as maneiras possíveis de um componente ser defeituoso, ou como é que ele deixa de realizar a função para o qual foi idealizado [37]. O bom resultado desta fase depende do grau de pormenor alcançado durante as seguintes fases: divisão do sistema e análise funcional [31].

Para encontrar os modos potenciais de falha deve ser tida em conta a análise de documentos, experiências ou testes laboratoriais, experiência em campo e opinião de peritos [57]. O uso de FMEA anteriores, dos relatórios da qualidade, dos relatórios das reclamações de clientes ou intervenções efetuadas durante os períodos de garantia também podem facilitar a identificação dos modos potenciais de falha [31].

4.3.6.6 Identificação dos efeitos possíveis do modo de falha

É crucial a realização do correto levantamento de todos os efeitos, pois assim é possível saber como os modos de falha se manifestam, sendo possível projetar sensores para captar

essas informações. Esses sensores vão fornecer dados continuamente, sendo possível identificar o início de um processo de falha e, assim, programar as ações corretivas. O estudo dos efeitos pretende aprofundar o conhecimento e a perceção sobre o sistema de um ponto de vista externo, ou seja, o que o sistema está a emitir [37].

A análise dos efeitos pode ser feita localmente, ao nível do subsistema/componente em análise, ou ao nível de efeitos finais sobre o sistema global [31].

4.3.6.7 Identificação das respetivas causas

Para cada modo de falha potencial, devem ser identificadas e descritas as causas mais prováveis que originaram o seu aparecimento. De notar que as causas podem estar associadas ao próprio componente, aos componentes vizinhos, ou ao ambiente [37].

Caso se esteja a realizar um FMECA, deve-se ter em conta, nesta fase os efeitos e a gravidade dos modos de falha. Para avaliar os efeitos são usadas escalas que estimam o impacto em relação à segurança do cliente, meio ambiente, normas, imagem da empresa ou custos. As escalas que se utilizam não são universais, variando consoante a análise, tipo de produto, empresa e autor [58]. Verifica-se os modos de falha que apresentem efeitos com severidade mais elevada, e quanto mais graves forem os efeitos dos modos de falha, mais precisas e descritas devem ser as causas das falhas. Assim, não se perde tempo com a identificação das causas da falha que têm pouca influência no funcionamento do sistema [36].

4.3.6.8 Identificação dos métodos de deteção e de prevenção

Para cada modo de falha é importante saber como a falha é detetada e os meios através dos quais o utilizador ou o responsável pela manutenção se apercebe da ocorrência da falha. A deteção da falha pode ser realizada pelos seguintes métodos [31]:

- dispositivo automático da conceção;
- estabelecimento de um procedimento de verificação especial depois da entrada em funcionamento;
- atividades correntes de inspeção.

O método de deteção e prevenção tem como objetivo eliminar a ocorrência de modos de falha que coloquem em risco a segurança. Para além disso, é importante estudar e identificar outros modos de falha que originem efeitos semelhantes ao do modo em análise [31].

4.3.6.9 Estimar a severidade dos efeitos do modo de falha em estudo

A severidade avalia o impacto do efeito do modo de falha sobre o funcionamento do dispositivo que está a ser analisado. Deve ser considerada a severidade do efeito para a operação seguinte, produto final e cliente. A classificação de severidade dos efeitos deve ter em atenção os seguintes fatores [36]:

- efeitos possíveis sobre os utilizadores e sobre o meio envolvente;
- requisitos regulamentares ou de garantia;
- desempenho funcional do sistema ou do processo;
- cumprimento de exigências contratuais impostas pelo cliente.

A severidade é aplicada sobre o efeito do modo de falha, sendo um índice que indica o quão sério é o efeito do modo potencial de falha. Este índice pode variar entre dois números, sendo que quanto mais grave e crítico for o efeito maior é o índice de severidade. O índice de severidade pode ser alterado caso se realize uma mudança no projeto [37].

A tabela 4.2 representa um exemplo da classificação da severidade.

Tabela 4.2: Exemplo de classificação da severidade do efeito do modo de falha (Adaptado de [59]).

Efeito	Critério: Severidade do efeito	Índice
Perigoso sem aviso prévio	Pode causar grave perigo à máquina e ao operador. Não conformidade com legislação governamental sem aviso prévio.	10
Perigoso com aviso prévio	Pode causar grave perigo à máquina e ao operador. Não conformidade com a legislação governamental com aviso prévio.	9
Muito alto	Interrupção da linha de produção. Cem por cento do produto ficar danificado. Item inoperável, perda da função primária. Cliente muito insatisfeito.	8
Alto	Interrupção parcial da linha de produção. Produto parcialmente danificado. Item operável, mas com reduzida performance. Consumidor insatisfeito.	7
Moderado	Interrupção parcial da linha de produção. Produto parcialmente danificado. Item operável, mas com algumas funcionalidades limitadas. Cliente sente desconforto.	6
Baixo	Interrupção parcial da linha de produção. Cem por cento do produto tem de ser corrigido. Item operável, mas com algumas funcionalidades ligeiramente limitadas. O cliente sente alguma insatisfação.	5
Muito baixo	Interrupção parcial da linha de produção. O produto tem de ser parcialmente corrigido. Item operável, mas com algumas funcionalidades a causar ligeiro desconforto no uso. Defeito notado pela maioria dos clientes.	4
Menor	Interrupção parcial da linha de produção. O produto tem de ser parcialmente corrigido, fora da linha de produção. Item operável, mas com alguns defeitos em não conformidade. Defeito notado por alguns clientes.	3
Muito menor	Interrupção parcial da linha de produção. O produto tem de ser parcialmente corrigido, dentro da linha de produção. Item operável, mas com alguns defeitos em não conformidade. Defeito notado por clientes mais exigentes.	2
Nenhum	Sem efeito.	1

4.3.6.10 Estimar a probabilidade de ocorrência do modo de falha

A ocorrência do modo de falha é baseada na causa ou no modo de falha, correspondendo a um número estimado das falhas que poderiam ocorrer. Para determinar a probabilidade de aparecimento dos modos de falha, deve considerar-se o seguinte [36]:

- informações publicadas sobre as taxas de falha;
- falhas em dispositivos semelhantes;
- falhas ocorridas durante a exploração/funcionamento do sistema;
- taxas de falhas disponíveis em bases de dados;
- dados de ensaios da duração da vida do componente.

A ocorrência do modo de falha é caracterizada pelo índice de ocorrência. Este índice varia entre dois números, sendo que quanto maior for o índice maior é a probabilidade de a falha ocorrer. A probabilidade de a falha ocorrer pode ser diminuída, ou seja, pode diminuir-se o índice de ocorrência, se forem implementadas melhorias nas especificações de engenharia e/ou nos requisitos do processo com a finalidade de prevenir as causas e reduzir as suas frequências [37].

A tabela 4.3 representa um exemplo da classificação da probabilidade de ocorrência.

Tabela 4.3: Exemplo de classificação da ocorrência do modo de falha (Adaptado de [59]).

Probabilidade de falha	Critério: Taxa de falhas possíveis	Índice
Muito alta: falha quase inevitável	$\geq$ 1 em 2	10
	1 em 3	9
Alta: Falhas frequentes em processos similares	1 em 8	8
	1 em 20	7
Moderada: Falhas ocasionais em processos similares	1 em 80	6
	1 em 400	5
	1 em 2000	4
Baixa: Poucas Falhas em processos similares	1 em 15000	3
Muito baixa: Falhas isoladas em processos quase idênticos	1 em 150000	2
Remota. Falha improvável	$\leq$ 1 em 1500000	1

4.3.6.11 Estimar a probabilidade de deteção do modo de falha

A probabilidade do procedimento de controlo não detetar a causa da falha ou o modo de falha, antes de chegar ao cliente está relacionada com o índice de deteção [36]. Este índice varia entre dois números, sendo que quanto maior for o índice maior é a dificuldade de detetar o modo de falha [37].

A tabela 4.4 representa um exemplo da classificação da probabilidade de deteção.

Tabela 4.4: Exemplo de classificação da detetabilidade do modo de falha (Adaptado de [59]).

Deteção	Critério: Probabilidade de deteção pelo controlo	Índice
Incerteza Absoluta	O controlo de projeto não irá e/ou não pode detetar uma causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha; ou não existe controlo de projeto.	10
Muito remota	Possibilidade muito remota que o controlo de projeto irá detetar uma causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha.	9
Remota	Possibilidade remota que o controlo de projeto irá detetar uma causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha.	8
Muito baixa	Possibilidade muito baixa que o controlo de projeto irá detetar uma causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha.	7
Baixa	Possibilidade baixa que o controlo de projeto irá detetar uma causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha.	6
Moderada	Possibilidade moderada que o controlo de projeto irá detetar uma causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha.	5
Moderadamente alta	Possibilidade moderadamente alta que o controlo de projeto irá detetar uma causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha.	4
Alta	Possibilidade alta que o controlo de projeto irá detetar uma causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha.	3
Muito Alta	Possibilidade muito alta que o controlo de projeto irá detetar uma causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha.	2
Quase Certamente	Controlo atual quase certamente que irá detetar uma causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha.	1

4.3.6.12 Análise da criticidade

Como previamente observado, a criticidade é avaliada através do índice NPR, equação 4.3. Quanto maior for este índice, mais prioritária é a falha (causa ou modo de falha), contudo é necessário fazer uma análise dos valores parciais dos índices [31].

Para além de ser considerado o NPR, deve ser considerado o índice de severidade dos efeitos do modo de falha, para uma melhor consistência na tomada de decisões. Por exemplo, índices de severidade elevados (superiores a oito) significam que os modos potenciais de falha põem em causa a segurança e, como tal, requerem ações prioritárias. Neste caso, só é admissível a existência do processo/produto se a probabilidade de ocorrência for necessariamente baixa (inferior a 2). Deste modo é necessário um bom julgamento para

efetuar uma análise do valor do NPR obtido [36].

Com o cálculo e análise do NPR e dos índices parciais associados, é possível quantificar a amplitude relativa de cada falha e ordenar por prioridade as ações a desenvolver para reduzir/minimizar os efeitos que certas falhas podem originar [60]. Assim é apresentado um conjunto de ações recomendadas, que consistem em soluções apresentadas para diminuir os índices de severidade, ocorrência e deteção. Podem ser uma ação específica ou um estudo para realizar a longo prazo [37].

4.3.6.13 Revisão do formulário e seleção das ações principais

Durante esta etapa enumeram-se as ações de melhoria estabelecidas, ou seja, as ações que foram efetivamente postas em prática do conjunto de ações recomendadas. Este campo é importante para garantir/verificar que o que foi recomendado para eliminação da falha é, realmente, realizado. Para além disso estabelece-se a data de implementação e os responsáveis pelas ações [37].

Após a tomada das ações no sistema, os índices de ocorrência, severidade e deteção deveriam ser redefinidos e, assim, calcular um novo NPR de modo a reordenar as falhas. Este processo é realizado até a equipa de FMEA/FMECA decidir que já tiveram em conta todas as informações importantes. Na eventualidade de nenhuma ação ter sido tomada, estas colunas permanecem em branco [37].

4.3.7 Formulário

Os *layouts* dos formulários são elaborados de acordo com o critério de cada empresa, não existe uma padronização. A tabela 4.5 apresenta um formulário FMEA e a tabela 4.5 apresenta um formulário FMECA.

Tendo em conta o que foi descrito anteriormente e pela análise das tabelas 4.5 e 4.6, verifica-se que o preenchimento do formulário FMECA é muito semelhante ao do formulário FMEA, à exceção dos seguintes campos que não existem no formulário FMEA:

- índice de severidade;
- índice de ocorrência;
- controlos atuais;
- índice de deteção;
- NPR;
- resultado das ações.

Tabela 4.5: Formulário FMEA [36].

Sistema: _____ Participantes: _____ Página: _____ de _____ Data de início: _____ Data de revisão: _____							
Componente	Função	Modo de falha potencial	Efeitos potenciais de falha	Classs	Causas potenciais / Mecanismos de falha	Ações recomendadas	Responsabilidade & data de conclusão limite

Tabela 4.6: Formulário FMECA [36].

Sistema: Mecanismo distribuidor de mudas | Participantes: Wanilson M. Carrafa, Eduardo Y. Sakurada, Acrez Dias | (3) | Página: 1 de 1 | Data original: 05/09/00 | Data de revisão: 09/11/00

(1) Componente	Função	Modo potencial de falha	(2) Efeitos potenciais de falha	S e v	Causas potenciais / Mecanismos de falha	O c c u r	Controles atuais	D e t e c	N P R	Ações recomendadas	Responsabilidade & data de conclusão limite	Resultado das Ações: Ações Tomadas	S e v	O c c	D e t	N P R
1 -Alojador de mudas	– Alojar a muda	Quebrado	Impede a conclusão da muda		Material muito frágil, cargas dinâmicas		Testes, revisões de projeto.			- Utilizar um alojador mais resistente - Utilizar uma luva na braçadeira - Inchir uma placa de polímero na mesa.	Wanilson	Inchir uma placa de polímero na mesa				
(4)	(5)	(6)	(7) Plantio de muda danificada	(8)	(9) Vibrações, cargas dinâmicas.	(10)	(11) Testes, revisões de projeto.	(12)	(13)	(14) - Utilizar outro tipo de fixação para dobradiça - Inchir uma placa de polímero na mesa.	(15) Wanilson	(16) Inchir uma placa de polímero na mesa				(17)

1 – Identificar o nome do sistema ou o título de identificação do FMEA;
2 – Nome das pessoas que estão participando da reunião;
3 – Registrar a página do formulário, a data de início do projeto de FMEA e a data da reunião atual;
4 – Nome do item (componente, subsistema);
5 – A função que o item deve desempenhar;

11 – Controles atuais são os métodos para identificar e controlar as falhas.
12 – Valor de 1 a 10 do índice de detecção da falha (modo de falha ou causa do modo de falha);
13 – Número de prioridade de risco.
NPR = (severidade) x (ocorrência) x (detecção);
14 – Ações recomendadas pelo grupo para a eliminação da falha.

6 – Possíveis modos de falha;
7 – Possíveis efeitos que podem ser causados no sistema.
8 – Valor de 1 a 10 do índice de severidade dos efeitos;
9 – As causas que podem ter desencadeado o modo de falha;
10 – Valor de 1 a 10 do índice de ocorrência da falha (modo de falha ou causa do modo de falha);

15 – Nome da pessoa responsável em implementar a ação e data limite para conclusão das ações;
16 – Ação que foi utilizada para a eliminação da falha.
17 – Reavaliação dos índices e cálculo do novo NPR.

4.4 Diagrama de decisão RCM

Como se viu anteriormente o diagrama de decisão irá permitir determinar qual a ação mais apropriada para cada modo de falha. Assim, enumeram-se, inicialmente, e descrevem-se diferentes ações.

4.4.1 Ações

A divisão das ações pode ser realizada de várias formas, sendo descritas posteriormente.

4.4.1.1 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva tem como objetivo principal evitar que ocorram avarias catastróficas, tentando reduzir ao máximo a sua probabilidade de ocorrência, de forma a garantir um correto e eficiente funcionamento dos equipamentos. Este tipo de manutenção é realizado antes da ocorrência de falhas, de uma forma planeada. Assim, esta ação de manutenção também pode ser designada por manutenção planeada. Com ações de manutenção preventivas, obtém-se o seguinte [25]:

- Aumentar a fiabilidade e, consequentemente, a disponibilidade dos equipamentos, o que se traduz numa redução dos custos devido a avarias;
- Aumentar a segurança dos operadores dos equipamentos;
- Facilitar a gestão de *stocks*;
- Minimizar a indisponibilidade dos sistemas em que os equipamentos sujeitos a manutenção estão associados;
- Prever os custos da manutenção;
- Reduzir e regularizar a carga de trabalho através do melhoramento do planeamento dos trabalhos de manutenção.

A realização deste tipo de manutenção requer que seja possível realizar uma previsão antecipada da ocorrência das falhas. Deste modo, é importante realizar um registo histórico detalhado do período de vida útil do equipamento, ou seja, um registo das falhas funcionais já ocorridas e dos seus modos de falhas. A realização de um registo histórico detalhado do período de vida útil do equipamento é obtido através de informações de avarias, supervisões ao funcionamento do equipamento e intervenções de manutenção. Prever as avarias é um processo complexo, uma vez que uma máquina possui vários modos de falha. Assim, realizar o registo das falhas funcionais implica um custo, mas é fundamental na gestão da manutenção do equipamento [25]. Assim, com apoio dos registos será possível prever as datas em que as avarias irão ocorrer e preparar as tarefas de manutenção [24].

A manutenção preventiva divide-se em dois tipos de manutenção. A manutenção preventiva sistemática e a manutenção preventiva condicionada.

4.4.1.1.1 Manutenção Preventiva Sistemática

A manutenção preventiva sistemática é realizada de acordo um planeamento estabelecido com base no tempo. As ações de manutenção são planeadas com uma periodicidade que permite realizar as intervenções antes da ocorrência da falha. No entanto, não existe um controlo prévio do estado da máquina [24].

Este tipo de manutenção apresenta as seguintes vantagens [25]:

- permite prever os custos da manutenção;
- minimiza os efeitos negativos resultantes da indisponibilidade dos equipamentos, uma vez que se trata de manutenção planeada.

Contudo, apresenta as seguintes desvantagens [25]:

- não tem em conta o estado real dos equipamentos, logo:

  - pode realizar a manutenção, estando o equipamento a funcionar perfeitamente, havendo custos desnecessários;

  - o equipamento pode avariar antes da ocorrência deste tipo de manutenção, afetando o desempenho operacional dos equipamentos;

- tempos entre manutenções são fixos, o que não acompanha a evolução do tempo de operação do equipamento.

As ações preventivas sistemáticas dividem-se em duas [25]:

- de reparação;
- de substituição.

Uma tarefa de reparação programada implica restabelecer as capacidades iniciais de um componente ou equipamento, antes de uma idade limite específica, ou em intervalos de tempo fixos, independentemente da condição funcional que apresente nesse momento [25].

Uma tarefa de substituição programada envolve a substituição de um componente ou equipamento, antes de uma idade limite específica, ou em intervalos de tempo fixos, independentemente da condição funcional que apresente nesse momento [26].

4.4.1.1.2 Manutenção Preventiva Condicionada

A necessidade de se conhecer qual o estado de conservação dos equipamentos potenciou o desenvolvimento da manutenção preventiva condicionada [25].

Este tipo de manutenção consiste em controlar o estado real de um equipamento, o que permite ultrapassar algumas desvantagens da manutenção preventiva sistemática [24].

Tendo em conta as técnicas de monitorização do estado das máquinas, são definidas as ações de manutenção. Estas ações não se realizam com uma periodicidade constante, mas de uma forma variável, tendo em conta a condição de funcionamento dos equipamentos. Com este tipo de manutenção, apenas se realizam as ações de manutenção quando forem detetados sinais de mau funcionamento ou quando a avaria estiver próxima [25].

A manutenção preventiva condicionada apresenta as seguintes vantagens [25]:

- aumenta a disponibilidade das máquinas, uma vez que se realizam técnicas de inspeção contínuas;
- reduz os custos de manutenção;
- aumenta a segurança dos operadores das máquinas.

Existem diferentes técnicas de controlo da condição de equipamentos. Posteriormente, serão mencionadas as quatro grandes categorias de técnicas de manutenção preventiva condicionada [26]:

- técnicas de monitorização da condição, que envolvem a utilização de equipamento especializado para monitorizar outros equipamentos;
- técnicas baseadas nas variações da qualidade do produto;
- técnicas de monitorização dos efeitos primários, que utilizam equipamentos de monitorização do processo;
- técnicas baseadas no sentido humano.

A manutenção preventiva condicionada é baseada no facto de grande parte das avarias serem precedidas por alguma forma de pré-aviso, podendo este pré-aviso durar segundos, dias ou mesmo até meses [25].

Na figura 4.6 pode observar-se que a avaria começa (ponto A), deteriorando-se até a um ponto onde pode ser detetada. Esse momento é identificado pela letra P. Se a deteção não acontecer, ou se nada for feito para a evitar, a degradação começa a um ritmo mais acelerado, até atingir o ponto de avaria funcional identificado pela letra F [26]. Quanto mais próximo o ponto P estiver de A para um determinado sistema de monitorização de condição, melhor, uma vez que quanto mais cedo se deteta uma falha em desenvolvimento, menos danos a máquina sofrerá, menos energia será desperdiçada e menos custará a manutenção [61].

O ponto no processo de avaria onde se consegue detetar a ocorrência de uma avaria é designada de potencial de avaria. Assim, defini-se potencial de avaria como uma condição identificável que é prenúncio da ocorrência de uma avaria funcional [25].

O intervalo P-F é o intervalo de tempo entre o ponto P e o ponto F. Este intervalo indica a frequência com que as tarefas de manutenção preventiva condicionada devem ser efetuadas, ou seja, estas ações de manutenção devem ser realizadas em intervalos inferiores que o intervalo P-F [24].

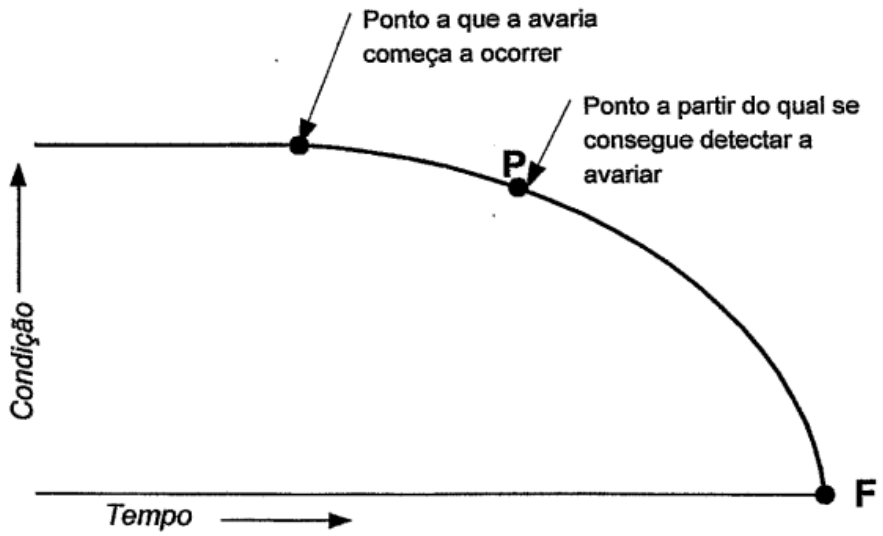


Figura 4.6: Curva P-F [25].

Muitos modos de falha são precedidos por várias avarias potenciais. Assim, mais do que uma categoria de técnica de manutenção preventiva condicionada poderá ser necessária. Cada uma destas técnicas apresenta um diferente intervalo P-F, e irá solicitar diferentes conhecimentos [26].

Por exemplo, na figura 4.7, observa-se que a avaria funcional de num dado rolamento é precedida por várias avarias potenciais, podendo cada uma das avarias ser detetada por uma diferente tarefa de manutenção preventiva condicionada [25].

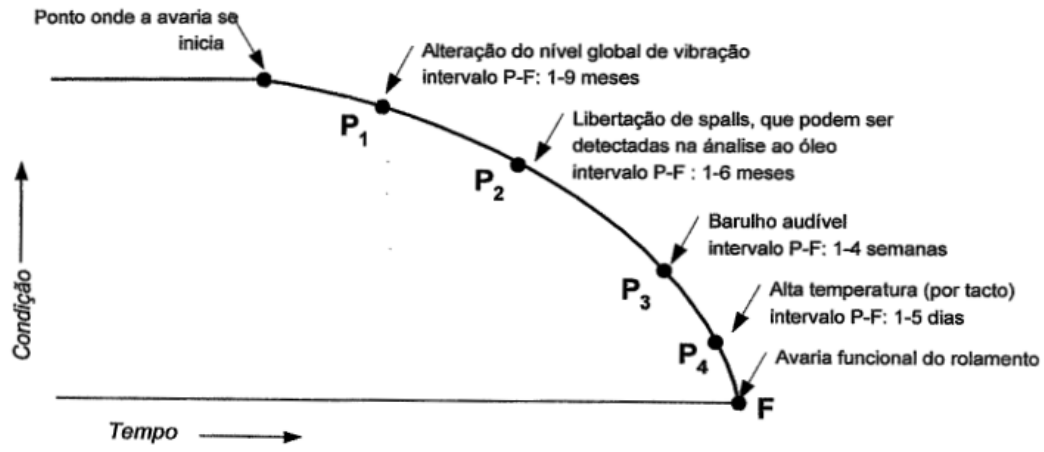


Figura 4.7: Os diferentes potenciais de avaria que podem anteceder uma avaria [25].

De notar que nem todos os rolamentos apresentam estas avarias potenciais, nem os mesmo intervalos P-F. Para além disso, nem todas estas técnicas podem ser sempre aplicadas [25]:

- o rolamento pode estar posicionado de tal forma que seja impossível medir com

precisão o nível de vibração;

- só se consegue detetar o barulho emitido pelo rolamento se não existir um nível ambiente que se sobreponha a este;
- só se consegue realizar uma deteção de partículas se o rolamento estiver a ser lubrificado a óleo;
- só é possível detetar a temperatura se o rolamento estiver acessível.

4.4.1.2 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva tem como objetivo repor e restaurar as funções do equipamento quando uma avaria súbita ocorre, não havendo oportunidade de intervir antecipadamente e evitar a avaria. Este tipo de manutenção normalmente aplica-se a equipamentos de custo reduzido, cujo o seus impacto no sistema é baixo e os custos que apresenta com a manutenção preventiva são superiores à substituição ou reparação do equipamento após a falha [25].

Este tipo de manutenção apresenta as seguintes desvantagens [25]:

- elevados custos como mão-de-obra, equipamentos de reserva e custos de manutenção;
- trabalho extra;
- elevados tempos de paralisação dos equipamentos e consequente falha no serviço aos clientes.

Visto que este tipo de manutenção apresenta várias desvantagens, se esta manutenção for integrada com outros tipos de manutenção torna-se vantajoso, provocando uma redução nos custos [25].

4.4.1.3 Técnica de Deteção de Falhas

As técnicas de deteção de falhas utilizam-se de forma a realizar a verificação de que determinado equipamento ainda funciona e são utilizadas apenas na presença de falhas "escondidas", ou seja, falhas cujas consequências não têm um impacto direto no sistema. No entanto podem levar à ocorrência de falhas múltiplas com consequências catastróficas [25]. Assim, o objetivo desta técnica é fornecer segurança de que uma função de proteção atua caso seja preciso. Para além disso, utiliza-se apenas em equipamentos de proteção cujas falhas das funções não são evidentes para as equipas de manutenção em circunstâncias normais de operação [24].

As tarefas de deteção de falhas permitem reduzir a indisponibilidade dos equipamentos de proteção e, assim, reduzir a probabilidade da ocorrência de falhas múltiplas [25].

4.4.1.4 Técnica de Reprojeto

As técnicas de reprojeto correspondem a ações que permitem mudar a configuração de uma máquina, ou até mesmo de um componente de uma determinada máquina. Pode

também ser alterado o contexto de operação, ou mudar o método usado pelos operadores para realizarem as tarefas de manutenção [25]. A aplicação desta técnica de manutenção implica a mudança imediata das capacidades iniciais de um sistema [24].

4.4.2 Descrição do diagrama de decisão

Para determinar qual a ação de manutenção mais apropriada para cada modo de falha de um equipamento, utiliza-se o diagrama de decisão representado na figura 4.8. As condições em que as técnicas de manutenção devem possuir para "valerem a pena fazer-se" e serem "tecnicamente praticáveis" são apresentadas na tabela 4.7.

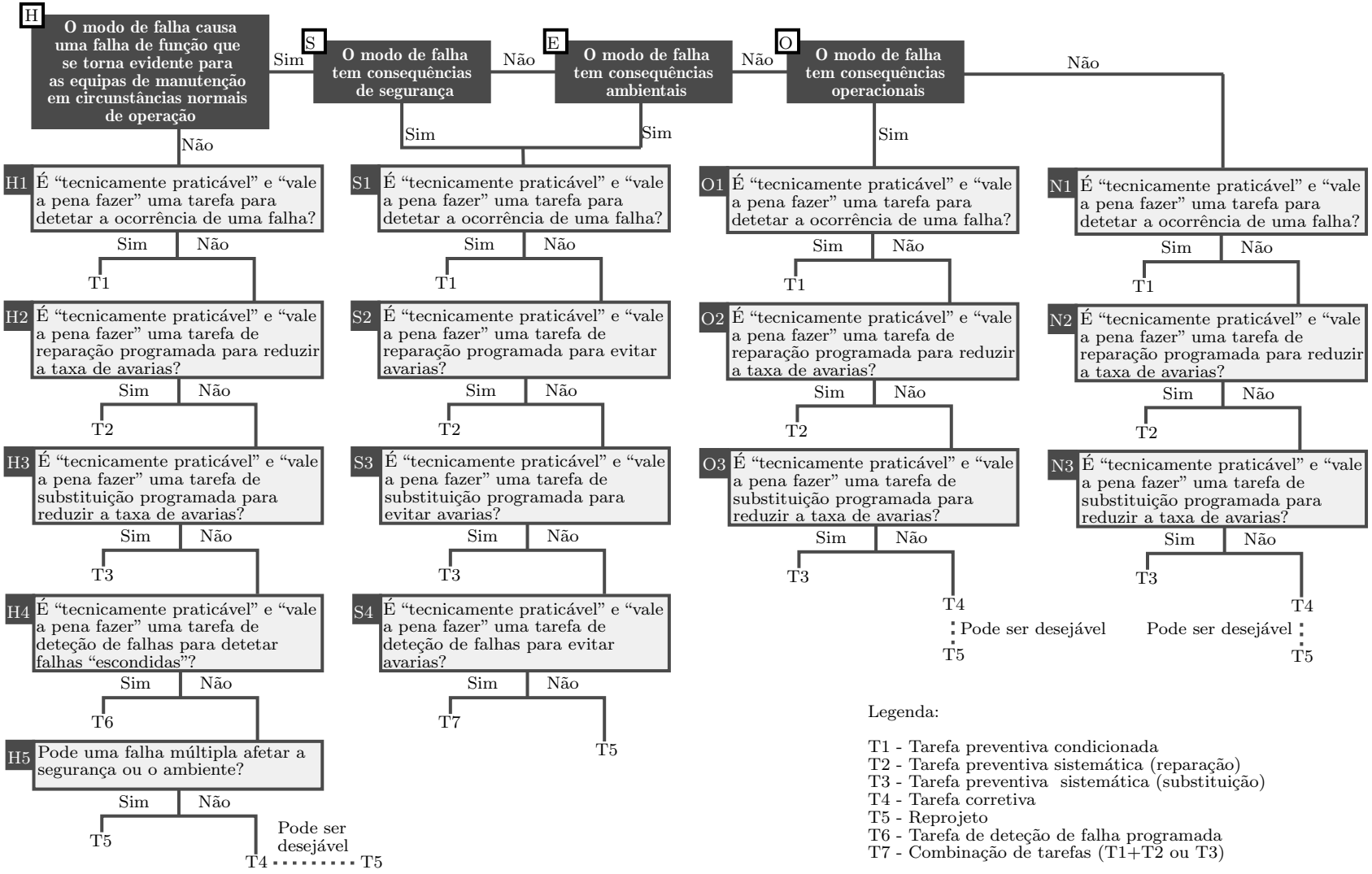


Figura 4.8: Diagrama de decisão RCM (Adaptado de [25]).

Tabela 4.7: Condições que as técnicas devem possuir para "valerem a pena fazerem-se" e serem "tecnicamente praticáveis" no processo de seleção do diagrama de decisão RCM (Adaptado de [25]).

Técnica	"vale a pena fazer"	"é tecnicamente praticável"
Preventiva Condicionada	1. Se reduz a probabilidade de falhas múltiplas para o valor mais baixo possível, considerado aceitável, no caso de modos de falha "escondidos". Nos equipamentos de proteção, estas técnicas devem possibilitar diminuir a sua indisponibilidade. Nos equipamentos protegidos devem diminuir a sua taxa de avarias; ou 2. Se der um alerta de falha com tempo suficiente, para se evitar as consequências, no caso de modos de falha evidentes com consequências de segurança ou ambientais; ou	1. Se é possível identificar claramente uma potencial falha; 2. Se o intervalo P-F é consistente, ou seja, não apresenta variações constantemente, não se corre o risco de detetar a falha potencial depois de esta se tornar numa falha funcional; 3. Se é praticável monitorizar o componente em intervalos menores que o intervalo P-F; 4. Se o intervalo entre a descoberta da potencial falha e a ocorrência da falha funcional for suficientemente longo para que uma ação seja tomada para reduzir ou eliminar as consequências do modo de falha.
Preventiva Sistemática (reparação)	3. Se durante um período de tempo, apresenta um custo inferior ao custo resultante das consequências operacionais e de reparação da falha, no caso de modos falha evidentes com consequências operacionais; ou	1. Se é possível identificar uma idade em que o componente apresenta um rápido aumento da probabilidade de falha; 2. Se permite o restabelecimento das capacidades iniciais do componente.
Preventiva Sistemática (substituição)	4. Se durante um período de tempo, apresenta um custo inferior ao custo de reparação da falha, no caso de modos de falha evidentes com consequências não operacionais.	1. Se é possível identificar uma idade em que o componente verifica um rápido aumento da probabilidade de falha.

Técnica	"vale a pena fazer"	"é tecnicamente praticável"
Deteção de falhas	1. Se reduz a probabilidade de falhas múltiplas para o valor o mais baixo possível, considerado aceitável, no caso de modos de falha "escondidos".	1. Se é possível aceder ao equipamento de proteção e não haver necessidade de o desmontar para realizar as inspeções; 2. Se não aumenta o risco de falhas múltiplas aquando da sua realização; 3. Se é exequível no intervalo requerido. Caso os intervalos sejam muito curtos, a execução das técnicas de deteção de falhas pode assumir custos elevados de mão-de-obra e de interrupções de serviço. Se os intervalos forem muito longos, na ordem das centenas de anos, por exemplo, as técnicas de deteção de falhas são desnecessárias.

4.5 Conclusões

A metodologia RCM é uma metodologia estruturada que pode ser divida em sete etapas. Nas primeiras cinco etapas está compreendido o funcionamento do equipamento no contexto operacional, e determinam-se as causas de falhas predominantes. Esta análise permitirá também avaliar a criticidade do equipamento e identificar a sua importância no sistema em que se encontra. Estas primeiras cinco etapas da metodologia RCM corresponde à análise FMEA/FMECA. A diferença entre o FMEA e o FMECA está na criticidade. Assim, a metodologia FMECA tem em atenção tudo o que foi descrito para a metodologia FMEA mais a análise de criticidade. As duas últimas etapas da metodologia RCM permitem selecionar a ação de manutenção mais apropriada para cada modo de falha de um equipamento. Esta seleção é realizada com base num diagrama de decisão - diagrama de decisão RCM.

Capítulo 5

Monitorização da Condição

5.1 Introdução

A monitorização da condição de um equipamento desempenha um papel fundamental na manutenção baseada na condição, que é considerada a estratégia mais eficiente para manutenção em todos os setores. A monitorização da condição tem um grande potencial para aumentar a fiabilidade da operação, tempo de operação da máquina, redução de danos consequentes e melhoria da eficiência operacional a um custo operacional mais baixo. Como a indústria depende cada vez mais das máquinas, é importante que estas trabalhem eficientemente. Deste modo, para além das máquinas se terem tornado mais avançadas tecnicamente, a monitorização da condição de máquinas tornou-se uma forma cada vez mais vital de obter um tempo de atividade ideal [62].

A monitorização da condição é o processo de monitorizar um parâmetro das condições da máquina de forma a identificar uma mudança anormal, que é indicativa de uma falha em desenvolvimento, e prevê a condição futura das máquinas durante a operação [63]. Assim, a monitorização da condição para além de permitir detetar e diagnosticar falhas nas máquinas, também permite realizar previsões sobre o tempo de funcionamento de uma determinada máquina, tendo em conta a segurança, fiabilidade e economia [62].

A monitorização da condição e o diagnóstico de máquinas realiza-se através do controlo/análise de certos parâmetros, tais como: ruído, vibração, óleo e temperatura [64].

Existem dois métodos principais utilizados para monitorizar a condição [62]:

- verificação de condição: neste método, uma medição de verificação é realizada com a máquina em funcionamento, utilizando algum indicador adequado, que é então usado como uma medida da condição da máquina naquele preciso momento. Este método requer medições precisas, quantificáveis e um limite conhecido. O uso de monitorização da condição permite que a manutenção seja programada ou outras ações sejam realizadas de forma a prevenir falhas e evitar as suas consequências;

- monitorização de tendências: é a medição e interpretação contínua ou regular dos dados. Envolve a seleção de uma indicação adequada e mensurável de deterioração da máquina ou componente e o estudo da tendência nesta medição com o tempo de execução, de forma a indicar quando a deterioração excede uma taxa crítica. Essa

indicação permite obter um tempo de espera para desligar a máquina normalmente antes de atingir um estado crítico de operação.

5.2 Cronologia

A história da monitorização da condição pode ser dividida em três gerações. Durante a primeira geração, que ocorreu durante as décadas de 1930 e 1940, a grande maioria das máquinas era bastante simples e as suas reparações também eram simples. Para além disso, não havia muita preocupação relativamente ao tempo de inatividade e ao custo da mão de obra. Durante a segunda geração, que decorreu durante as décadas de 1950 a 1970, a monitorização da condição tornou-se numa prioridade para todas as indústrias devido ao elevado custo de manutenção e ao elevado tempo de inatividade associado ao aumento da complexidade das máquinas em vários setores da indústria. Durante a terceira geração, iniciada a partir da década de 1980 até aos dias de hoje, a disponibilidade e a fiabilidade das máquinas tornaram-se pontos fulcrais para todas as organizações, devido à utilização de máquinas maiores e mais complexas [62; 63].

Assim, tal como previamente observado, apenas na segunda geração é que a monitorização da condição se tornou importante na indústria. Apesar de as técnicas de monitorização da condição só se começarem a utilizar em larga escala nessa altura, as tentativas de aperfeiçoar o processo de deteção da degradação da máquina começou ligeiramente mais cedo, ver figura 5.1 [61].

A análise de vibração é a primeira tecnologia a monitorizar a saúde da máquina, de forma a fornecer uma aviso prévio de falha. Em 1938 foi publicado o primeiro artigo de pesquisa sobre monitorização de ativos industriais através da vibração. Em 1946 utilizou-se pela primeira vez a análise de óleo na indústria ferroviária dos Estados Unidos, ao analisar o lubrificante para motores a *diesel*. A técnica começou a expandir-se para outras indústrias no final dos anos 1950, quando equipamentos portáteis foram desenvolvidos para analisar amostras de óleo no local. A termografia infravermelha foi inicialmente desenvolvida para uso militar no final da década de 1950. As câmaras de imagem térmica da atualidade baseiam-se nessa tecnologia, que foi aberta para uso civil na década de 1990. Em 1970 surgiu a análise de emissão acústica [61].

Na década de 1980, antes da adoção generalizada de computadores, todas estas técnicas exigiam não apenas que a recolha de dados fosse manual, mas também eram necessários especialistas qualificados para analisar e interpretar esses dados. Os sistemas manuais de monitorização de condição ainda dominam. Muitas indústrias ainda não concluíram a mudança de sistemas *off-line* para *on-line* [61]. O desenvolvimento recente da tecnologia dos computadores e transdutores, juntamente com os avanços nas técnicas de processamento de sinais, inteligência artificial e *Internet of Things*, tornou possível implementar técnicas avançadas de monitorização da condição de uma forma eficaz [62].

Atualmente, existe a capacidade de aplicar análises automatizadas e especializadas em tempo real a uma grande quantidade de dados que são recolhidos de uma forma contínua por sensores sem fio. Assim, estas técnicas de monitorização podem ser utilizadas para recolha de dados de integridade de ativos não apenas um vez por mês ou a cada seis semanas, mas várias vezes por segundo, todos os dias. O *software* associado ao equipamento de monitorização pode processar esses dados em tempo real de forma a detetar falhas de

uma forma automática e indicar a onde elas estão a ocorrer: rolamentos, engrenagens, acoplamentos, entre outros. [61].

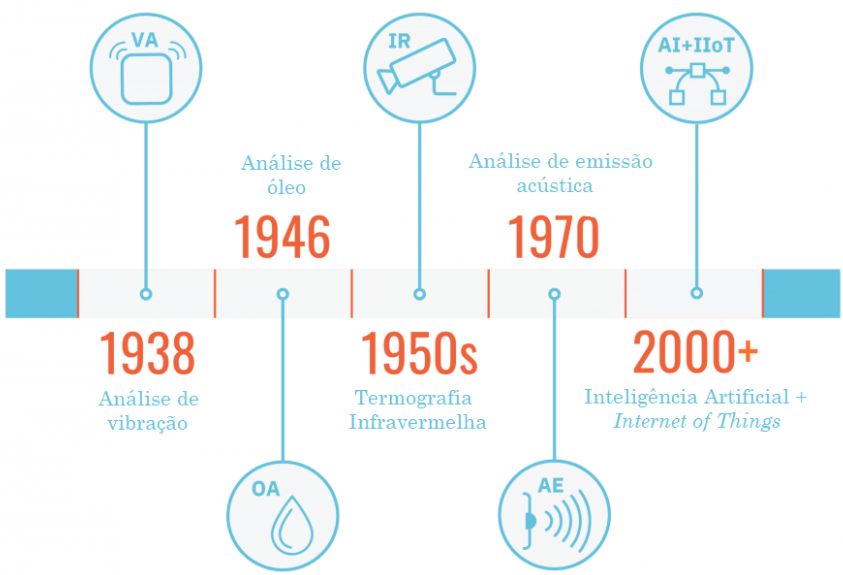


Figura 5.1: Cronologia das técnicas mais utilizadas para monitorizar o estado dos equipamentos industriais. (Adaptado de [61]).

A análise baseada na inteligência artificial tem vantagens relativamente à experiência humana [61]:

- sistemas de aprendizagem da máquina podem processar rapidamente imensas quantidades de dados;
- sistemas de aprendizagem estão constantemente refinando o seu conhecimento com base em novos dados;
- conclusões são sempre baseadas em fatos e nunca na intuição.

As empresas do século XXI precisam de monitorizar de uma forma digital as condições com base em inteligência artificial e *Internet of Things* [61].

5.3 Escolha das técnicas de monitorização da condição

Como se viu cada processo industrial está sujeito a tipos específicos de falha de equipamento, sendo que cada um dos modos de falha do equipamento possui uma impressão digital diferente em termos de vibração, ruído, temperatura e óleo. Muitos modos de falha são precedidos por várias avarias potenciais, assim pode ser necessário mais do que uma técnica de monitorização da condição [26].

De seguida serão apresentadas algumas informações que apoiam a escolha das técnicas de monitorização da condição. A termografia infravermelha e a análise de emissão acústica são utilizadas quando se precisa de monitorizar máquinas onde podem ocorrer fugas de ar

ou vapor de água. A termografia infravermelha é eficaz para problemas relacionados com arrefecimento e fluxo de ar. A termografia infravermelha não é a técnica mais adequada para máquinas rotativas, não deteta geralmente um problema antes que o dano já tenha ocorrido, contudo apresenta alguma utilidade na monitorização dos rolamentos e engrenagens. A análise de vibração funciona bem em equipamentos rotativos, mas não quando gira muito lentamente (menos de 5 rpm). Deste modo, a análise de vibração é utilizada quer nos rolamentos, engrenagens, mas também nos veios. A análise de óleo, assim como a análise de emissão acústica, funciona bem em equipamentos rotativos, mas tem algumas limitações, nomeante nem todos os ativos possuem óleo que pode ser analisado. A análise de óleo é utilizada, normalmente, para monitorizar equipamentos como os rolamentos e engrenagens. Nem a análise de óleo nem a análise de vibração podem detectar problemas elétricos [61].

Na tabela 5.1 apresenta-se o que cada técnica de monitorização consegue satisfazer (marca de seleção azul) e o que não consegue (sem marca de seleção), de notar que:

- VA: análise de vibração;
- OA: análise de óleo;
- IR: termografia infravermelha;
- AE: análise acústica.

Tabela 5.1: O que cada técnica de monitorização da condição consegue ou não satisfazer (Adaptado de [61]).

	VA	OA	IR	AE
Ativos remotos ou inacessíveis				
Atmosferas explosivas ou outras condições adversas				
Ambientes com ruído e vibração		✓	✓	
Fugas			✓	✓
Falhas mecânicas	✓	✓	✓	✓
Falhas elétricas			✓	✓
Corrente contínua (DC)	✓	✓	✓	✓
Máquinas com movimento de rotação	✓	✓		✓
Máquinas que giram muito lentamente		✓		✓

5.4 Implementação de um sistema de monitorização da condição

O processo de implementação de um sistema de monitorização da condições será descrito nesta secção, tendo em conta a norma ISO 17359:2018(E) [64].

A figura 5.2 retrata um procedimento genérico da implementação de um sistema de monitorização da condição.

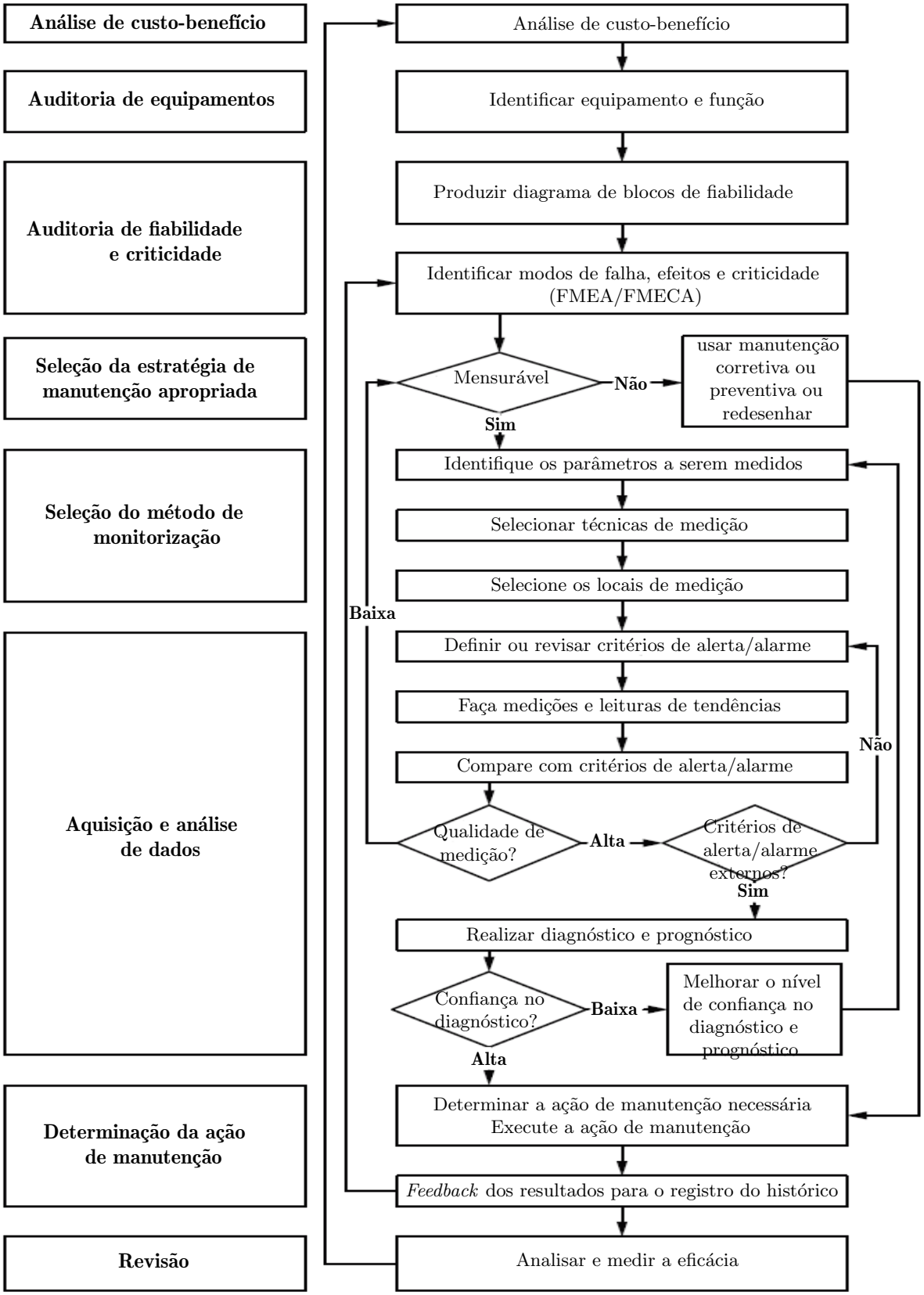


Figura 5.2: Fluxograma do procedimento de monitorização da condição (Adaptado de [64]).

De seguida, explicar-se-á de uma forma sucinta cada uma das fases do processo retratado na imagem 5.2.

5.4.1 Análise de custo-benefício

Esta análise inicial ajuda a estabelecer os indicadores chave de desempenho, de forma a avaliar a eficácia de qualquer sistema de monitorização da condição. Os itens a considerar são os seguintes:

- custo do ciclo de vida;
- custo de produção perdida;
- dano consequente;
- garantia e seguro.

5.4.2 Auditoria de equipamentos

5.4.2.1 Identificação do equipamento

Nesta fase são identificados todos os equipamentos e fontes de alimentação associadas, assim como os sistemas de controle e de vigilância existentes.

5.4.2.2 Identificação da função do equipamento

Deve identificar-se as funções do sistema, máquina ou equipamento e estabelecer as condições operacionais.

5.4.3 Auditoria de fiabilidade e criticidade

5.4.3.1 Diagrama de blocos de fiabilidade

Os diagramas de blocos de fiabilidade servem para evidenciar como as diferentes partes do sistema interagem uma com as outras, o que torna mais fácil a identificação dos caminhos críticos e a compreensão do sistema.

A construção destes diagramas não é obrigatória, sendo possível implementar um sistema de monitorização da condição sem o auxílio dos diagramas.

5.4.3.2 Criticidade do equipamento

Deve realizar-se uma avaliação de criticidade de todas as máquinas, de forma a identificar quais são as máquinas mais críticas e, por isso, devem ser monitorizadas. A identificação das máquinas mais críticas deve ter em conta os seguintes fatores:

- custo de manutenção ou peças de reposição;
- custo do sistema de monitorização;
- segurança e impacto ambiental;
- custo do ciclo de vida;
- custo de reposição da máquina;
- taxas de falha e tempo médio para reparação.

5.4.3.3 Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade

Deve ser realizada uma análise FMEA/FMECA para identificar quais os parâmetros que devem ser medidos para modos de falha específicos.

A informação necessária para realizar a análise FMEA/FMECA está descrita no capítulo 4.3.

5.4.4 Seleção da estratégia de manutenção apropriada

Existem duas possibilidades, conforme o modo de falha apresente ou não um sintoma mensurável. No caso do modo de falha não ser mensurável, deve optar-se por manutenção corretiva, manutenção preventiva ou redesenhar.

5.4.5 Método de monitorização

5.4.5.1 Técnica de medição

Depois de selecionado o parâmetro a medir, existem várias técnicas de medição que podem ser aplicadas. Podem ser realizadas medições simples de valores gerais ou valores médios ao longo do tempo.

Os sistemas de monitorização da condição podem utilizar equipamentos de medição permanentemente instalados ou portáteis. Para além disso, ainda podem envolver diferentes métodos, por exemplo amostras de fluidos, para análise local ou remota.

5.4.5.2 Viabilidade da monitorização

Deve ser considerada a viabilidade da aquisição de um dado sistema de monitorização. Para tal, devem considerar-se os seguintes fatores:

- facilidade de acesso;
- complexidade do sistema de aquisição de dados exigido;
- nível de processamento de dados exigido;

- requisitos de segurança;
- custo;
- existência de sistemas de controlo ou vigilância que já estão a medir parâmetros de interesse.

5.4.5.3 Intervalo de monitorização

Deve ser considerado o intervalo entre as medições e se é necessário uma monitorização contínua ou periódica. O intervalo de monitorização depende principalmente do tipo de falha, da sua taxa de progressão e, deste modo, a taxa de alteração dos parâmetros relevantes.

Para além disso, o sistema de monitorização é influenciado pelas condições operacionais, custo e criticidade.

5.4.5.4 Locais de medição

Os locais de medição são selecionados de forma a aumentar a possibilidade de deteção de falhas. Os fatores seguintes têm influência na seleção dos locais de medição:

- segurança;
- seleção do sensor;
- acessibilidade;
- meio ambiente;
- atenuação ou perda de sinal;
- custos.

5.4.5.5 Critérios iniciais de alerta/alarme

Os critérios iniciais de alerta/alarme devem ser definidos para fornecer a indicação mais rápida possível da ocorrência de uma falha. Os alarmes podem ser valores únicos ou múltiplos níveis. Os critérios de alerta/alarme devem ser otimizados ao longo do tempo como um processo iterativo.

5.4.5.6 Dados da linha de base

Os dados da linha de base são dados ou conjuntos de dados medidos/observados quando a operação do equipamento é considerada aceitável e estável. As medições subsequentes podem ser comparadas com esses valores de forma a detetar alterações. Para máquinas que apresentem diferentes estados operacionais, pode ser necessário estabelecer linhas de base para cada um desses estados.

5.4.6 Aquisição e análise de dados

5.4.6.1 Medição e tendências

O procedimento geral para a aquisição de dados consiste em efetuar medições e compará-las com tendências históricas, dados de linha de base ou dados representativos para as mesmas máquinas. A gestão do processo de recolha de dados é geralmente realizado *on-line*, contudo também pode ser realizada *off-line*. As medições são agendadas para serem realizadas com uma periodicidade inicial muito mais frequente que o modo de falha esperado.

5.4.6.2 Qualidade das medições

Vários fatores podem afetar a qualidade das medições. Posteriormente, são descritos alguns desses fatores:

- montagem deficiente do transdutor;
- falha do transdutor;
- falha nos cabos.

Se forem detetadas medições de baixa qualidade, pode ser necessário repetir as medições ou corrigir a falha do sistema de medição.

5.4.6.3 Comparação de medidas com critérios de alerta/alarme

Quando os valores medidos cumprem os critérios de alerta/alarme, apenas se registam os valores e é continuada a sua monitorização. Caso os valores medidos não respeitem os critérios de alerta/alarme, deve iniciar-se o processo de diagnóstico. Existem duas situações em que nenhuma anomalia é detetada, contudo o diagnóstico e o prognóstico são realizados:

- requisito para uma decisão de avaliação da integridade da máquina;
- sintomas que podem estar fora do programa de monitorização são observados por um operador.

5.4.6.4 Diagnóstico e prognóstico

Como se relatou anteriormente, o processo de diagnóstico é normalmente desencadeado pela deteção de anomalias.

A possibilidade de realizar o diagnóstico depende do tipo de máquina, configuração e condições de operação. Uma falha pode ter sido indicada por uma alteração em um ou mais dos parâmetros medido ou derivados dos valores da linha de base.

O processo de monitorização de condições pode mostrar a progressão esperada de falhas existentes e futuras, e indicar o tempo estimado até à ocorrência da falha.

Se não se confiar no diagnóstico e/ou prognóstico, poderá ser necessária uma verificação adicional. Se a confiança for alta, pode ser possível iniciar a manutenção ou ação corretiva imediatamente.

5.4.6.5 Melhorar a confiança no diagnóstico e/ou prognóstico

Para melhorar a confiança no diagnóstico/prognóstico pode ser necessário executar uma ou mais das seguintes ações:

- refazer a(s) medição(ões) para confirmar a(s) medição(ões) e as condições de alarme;
- comparar as medições com tendências históricas passadas;
- reduzir o intervalo entre as sucessivas medições pretendidas;
- fazer medições adicionais nos mesmos locais e/ou em outros locais;
- usar um processo de diagnóstico ou técnica de medição mais sofisticada;
- usar técnicas alternativas para correlação;
- modificar as condições operacionais ou a configuração da máquina para auxiliar no diagnóstico;
- revisar sintomas e regras.

5.4.7 Determinação da ação de manutenção

As ações que são tomadas dependem do nível de confiança no diagnóstico/prognóstico e da criticidade da máquina. As decisões habituais são as seguintes:

- nenhuma ação, continuar a monitorização de rotina;
- reduzir o intervalo de tempo para a próxima medição;
- alterar a carga, velocidade ou rendimento da máquina;
- desligar a máquina;
- inspecionar a máquina ou antecipar a manutenção planeada;
- realizar manutenção corretiva.

Depois das ações de manutenção serem realizadas, recomenda-se que as atividades de manutenção e as alterações na máquina sejam registadas. Deste modo consegue-se elaborar um histórico, que pode auxiliar nos diagnósticos e prognósticos futuros, sendo também útil na revisão do processo de monitorização.

Quando se realizam ações de manutenção, é útil inspecionar os componentes para confirmar se o diagnóstico ou prognóstico inicial estava correto.

5.4.8 Revisão

O procedimento de monitorização de condição deve incluir um processo de revisão para permitir que certas reavaliações sejam feitas. Por um lado, as técnicas que não estavam disponíveis, ou eram consideras caras, complicadas ou inviáveis no momento de implementação do sistema de monitorização, podem já ser viáveis no momento da revisão. Por outro lado, a eficácia das técnicas atuais em execução deve ser avaliada e qualquer técnica considerada desnecessária deve ser removida.

Os critérios de alerta/alarme também podem precisar de serem revistos, uma vez que podem ter sido realizadas alterações na máquina ou no ciclo de trabalho.

Os valores medidos e as linhas de base também podem ser alterados devido ao trabalho de manutenção, incluindo alteração de componente, ajuste ou alteração de serviço. Em certos casos, a linha de base pode precisar ser restabelecida após essas alterações. Deve-se observar que as alterações nos valores medidos também podem ser devidas a alterações normais ou controladas nas condições de operação e não necessariamente indicam uma condição de falha.

5.5 Monitorização da vibração

5.5.1 Introdução

A monitorização e consequente análise de vibrações é um método que permite a deteção antecipada de avarias, sendo uma das técnicas de monitorização da condição mais amplamente utilizadas na indústria [62; 65; 66]. Este método identifica apenas 60% a 70% das falhas que ocorrem numa máquina [67].

A deteção e diagnóstico de falhas nas caixas redutoras utiliza a monitorização da vibração. Segundo as condições normais de operação, os elementos mecânicos na caixa redutora geram sinais de vibração com frequências específicas de acordo com a frequência de rotação do componente. Se um dos componentes apresentar uma falha, os sinais de vibração serão diferentes dos apresentados numa situação sem falha. A presença da falha manifesta-se na frequência de rotação do componente e nos seus harmónicos [68].

5.5.2 Métodos de monitorização

A monitorização da vibração pode ser realizada *on-line* ou *off-line*. Seguidamente, explicitam-se as grandes diferenças entre estes dois tipos de monitorização.

5.5.2.1 Monitorização *on-line*

Esta técnica de monitorização exige equipamentos de medida permanentemente instalados, realizando-se uma monitorização contínua ou periódica. A sua utilização é recomendada quando a máquina ou o equipamento alvo de estudo apresenta avarias repentinas e/ou quando o equipamento/máquina apresenta uma elevada importância para o funcionamento do sistema, pretendendo-se evitar ao máximo a ocorrência de falha [69].

5.5.2.2 Monitorização *off-line*

Esta técnica de monitorização consiste na realização de medições locais através de equipamento portátil. Utiliza-se esta técnica quando a máquina ou o equipamento alvo de estudo apresenta avarias não frequentes e/ou quando os resultados da avaria não são completamente inaceitáveis e de elevado custo [69].

De notar que a frequência de monitorização deve ser adaptada à situação em estudo, tendo em conta a frequência de avarias, severidade dos efeitos e grau de aviso obtido pela técnica de monitorização [70].

5.5.3 Técnicas de análise de vibração

Grande parte das técnicas de processamento de sinal depende da transformada de Fourier (FT) para representar sinais em domínios de frequência ou tempo-frequência. Os métodos de frequência fornecem informações sobre frequência, amplitude e fase dos sinais. Além de todas essas características, os métodos de tempo-frequência fornecem uma visão sobre como as características mencionadas mudam com o tempo. De seguida observam-se os métodos convencionais de processamento de sinais [71]:

- Transformada de Fourier (FT) [72];
- Transformada de Fourier de tempo curto (STFT) [73];
- Distribuição Wigner-Ville (WVD) [74];
- Transformada Wavelet (WT) [75];
- Decomposição de Modo Empírico (EMD) [76];
- Máquina de vetor de suporte (SVM) [77].

Existem várias técnicas de análise de vibração. De seguida, apresentam-se as mais utilizadas e/ou mais importantes para o caso em estudo.

5.5.3.1 Análise no Domínio do Tempo

A análise no domínio do tempo é uma das análises mais simples e barata, sendo o sinal de vibração apresentado num gráfico da amplitude em função do tempo, ver figura 5.3 [68].

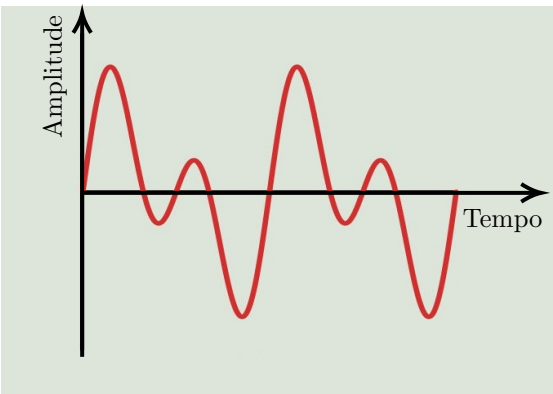


Figura 5.3: Sinal de vibração no domínio do tempo (Adaptado de [78]).

Os sistemas mecânicos podem ser classificados como determinísticos ou aleatórios, consoante as suas propriedades poderem ou não ser previstas ao longo do tempo, respetivamente. Exemplos das propriedades em questão são: deslocamento, velocidade ou aceleração. As caixas redutoras com uma falha localizada são classificadas de sistemas aleatórios, logo apresentam propriedades que não podem ser previstas com precisão. Contudo podem

ser estimadas através de certos parâmetros, parâmetros esses que podem ser usados para prever a progressão de falhas [68].

Os parâmetros estatísticos que se utilizam para detetarem falhas mecânicas com base na forma da onda no domínio do tempo são os seguintes [79]:

- valor RMS;
- valor de pico;
- curtose;
- fator de crista.

5.5.3.2 Análise no Domínio da Frequência

As vibrações de uma máquina não são periódicas, com apenas uma frequência característica. São fenómenos vibratórios complexos com diferentes componentes, uma frequência para cada componente da máquina, conforme se observa na figura 5.4 [68].

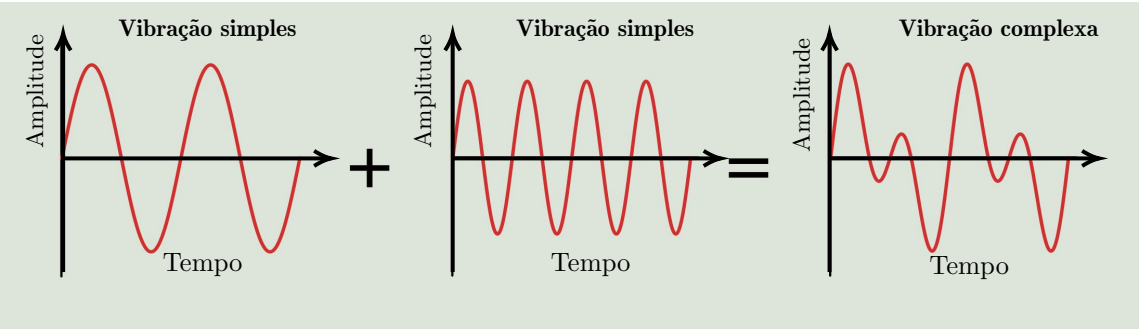


Figura 5.4: Vibração característica de cada componente da máquina no domínio do tempo (Adaptado de [78]).

A representação no domínio do tempo torna-se, por vezes, confusa. Deste modo, opta-se por passar do domínio do tempo para o domínio da frequência, ver figura 5.5.

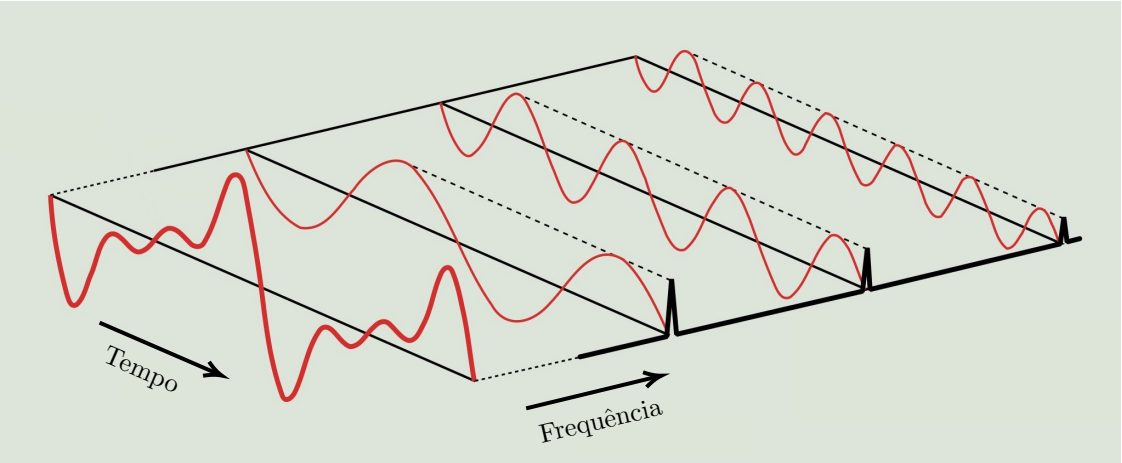


Figura 5.5: Sinal vibratório no domínio do tempo vs domínio da frequência (Adaptado de [80]).

Assim, no domínio de frequência, o sinal de vibração é apresentado num gráfico da amplitude em função da frequência, ver figura 5.6. Nesta análise cada componente aparece bem descriminado, sendo o sinal no domínio da frequência designado de espectro de frequência [68]. Esta técnica de análise é a mais utilizada para monitorizar as vibrações nas caixas redutoras [79].

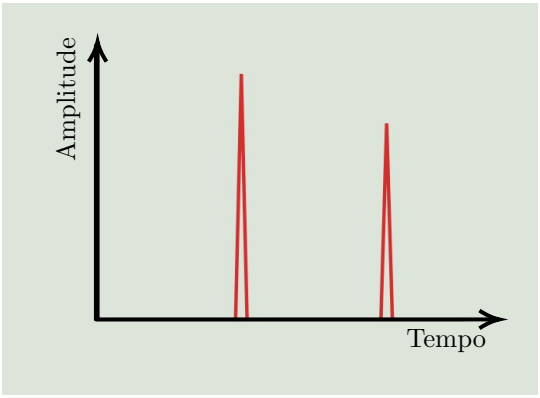


Figura 5.6: Sinal de vibração no domínio da frequência (Adaptado de [80]).

Existem vários métodos que permitem passar do domínio do tempo para o domínio da frequência, sendo o mais utilizado a rápida transformada de Fourier (FFT) [68].

Nas máquinas cuja velocidade de rotação é conhecida e constante, as frequências de vibração para cada componente da máquina podem ser estimadas. Assim, se ocorrer uma alteração no nível de vibração dentro de uma dada faixa de frequência pode ser relacionada a um componente específico [68; 79]. Este método fornece algumas capacidades de diagnóstico, uma vez que a análise dos níveis de vibração relativa em diferentes bandas de frequência pode fornecer uma indicação da natureza da falha [79].

5.5.3.3 Análise pelo Nível Global de Vibrações

Esta técnica consiste em realizar uma medição por transdutor, sendo estas medições realizadas em pontos escolhidos previamente. Depois o sinal total obtido dos transdutores é amplificado, sendo sujeito a uma média temporal [69].

A monitorização do nível global de vibração, como o nome indica, trata o problema de uma forma global, ou seja, não tem em consideração a complexidade dos sinais de vibração, tratando as vibrações como quantidades simples [69].

Os dois métodos de monitorização apresentados na secção 5.5.2 podem ser utilizados com esta técnica de análise [81].

Uma das desvantagens desta técnica é que é necessário realizar o processamento adicional ao sinal para se identificar uma avaria [69].

Para realizar esta análise recorre-se à norma ISO 10816-3, que estabelece os níveis de severidade, de forma a conseguir realizar uma avaliação qualitativa da vibração [82]. A norma divide as condições de trabalho em 4 níveis, conforme se verifica na figura 5.7.

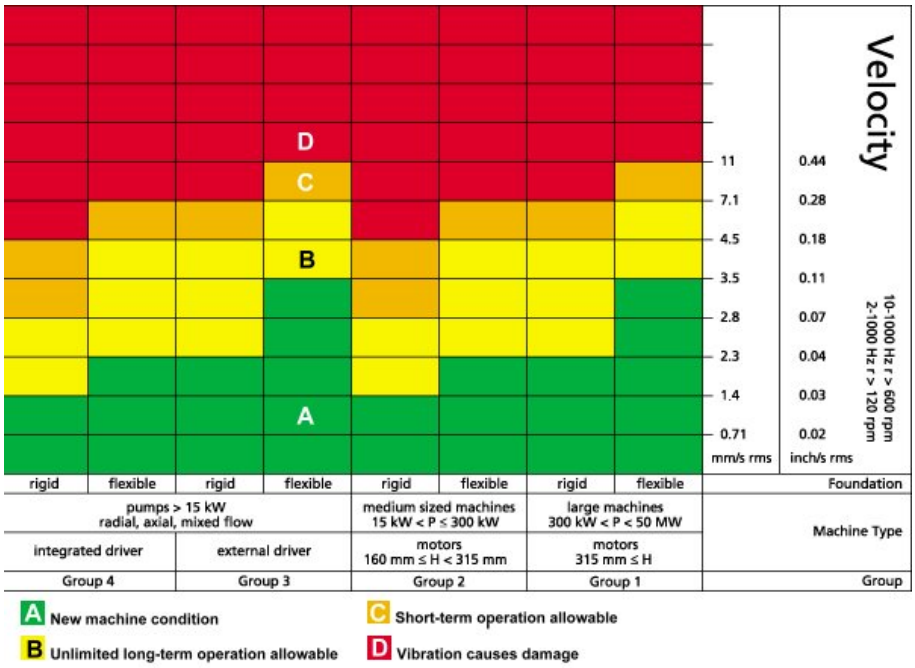


Figura 5.7: Norma ISO 10816-3 [82].

5.5.3.4 Demodulação

A demodulação é uma técnica utilizada nos casos onde o espectro de frequências se torna difícil de analisar. Esses casos acontecem quando existe a combinação de mais de uma fonte de excitação juntamente com os ruídos transmitidos através do suporte e das fundações das máquinas [69].

5.5.4 Fontes de vibração da caixa redutora

Os componentes da caixa redutora que apresentam movimento de rotação são os principais responsáveis pelo surgimento de vibração. Esses componentes são os seguintes [79]:

- engrenagens;
- rolamentos;
- veios.

Assim, para cada um dos elementos rotativos serão apresentados os processos que estão na origem da vibração de cada um desses elementos.

5.5.4.1 Vibrações das Engrenagens

Numa caixa redutora a principal fonte de vibração é o engrenamento entre duas rodas dentadas. Quando se realiza a análise de vibrações em engrenagens, mesmo que o espectro de vibrações seja muito complexo, este pode ser decomposto nos seguintes aspetos [83; 84]:

- harmónicos de frequência de desmultiplicação do dente: representam o desvio do perfil médio do dente do perfil ideal do dente (engrenamento ideal);
- componentes fantasmas: são semelhantes aos componentes de desmultiplicação do dente, mas não correspondem ao número de dentes que a engrenagem tem;
- bandas laterais: componentes originadas normalmente na modulação do sinal de desmultiplicação do dente e apresentam-se como pequenas alterações provocadas por avarias locais;
- pequenos harmónicos à velocidade de rotação do rotor: resultam de impulsos que se repetem uma vez por cada revolução;
- componentes de intermodulação: consistem na soma e na diferença de frequências de outros componentes.

5.5.4.1.1 Harmónicos de frequência de desmultiplicação do dente

Os desvios a partir do perfil ideal do dente podem ser causados por [83; 85]:

- variação da carga;
- desgaste localizado.

Para uma situação de carga ocorre a deflexão do dente, ver figura 5.8. Essa deflexão varia cada vez que a carga é partilhada entre um número diferente de dentes durante cada ciclo de engrenagem [86].

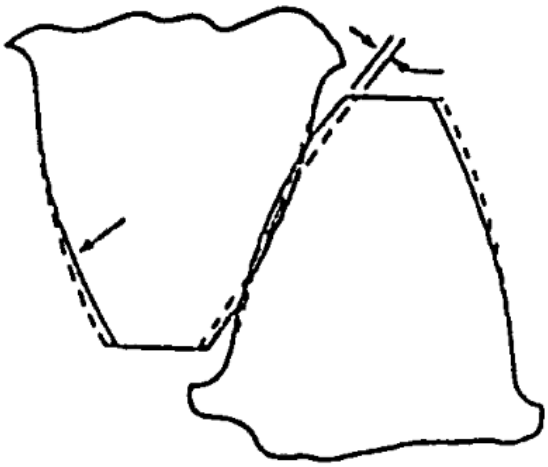


Figura 5.8: Deflexão dos dentes de uma engrenagem por ação da carga (Adaptado de [85]).

O facto da deformação dos dentes das rodas dentadas depender da carga, faz com que seja necessário realizar as medições das vibrações sempre com a mesma carga, de forma a conseguir comparar, posteriormente, os resultados obtidos. Existe um valor mínimo para a carga, de forma a garantir que os dentes estão em contacto permanente. Se o valor da carga for inferior a esse valor mínimo, a engrenagem avaria com maior facilidade e é adicionada uma fonte de variação aleatória [83].

No entanto, se a carga se mantiver constante e ocorrer uma mudança na frequência de desmultiplicação do dente e nos seus harmónicos, a causa mais provável será o desgaste, ou seja, o uso excessivo, ver figura 5.9. [85].

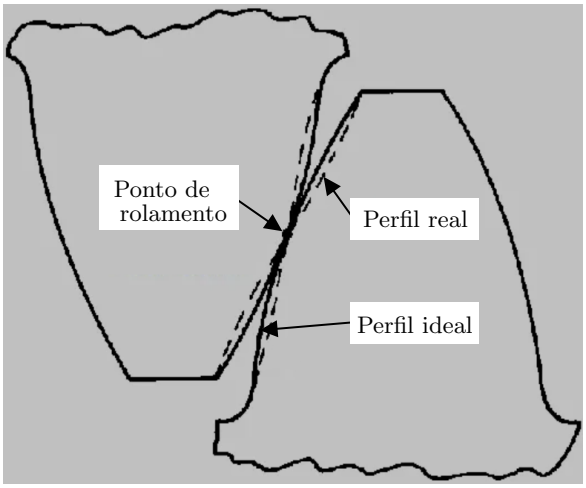


Figura 5.9: Desgaste típico no perfil do dente (Adaptado de [85]).

Pelo menos os três primeiros harmónicos da engrenagem devem ser monitorizados de forma a detetar este tipo de defeito, tal como se verifica na figura 5.10 [83; 85].

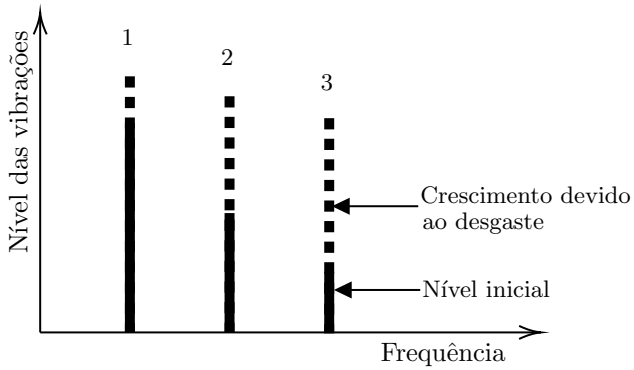


Figura 5.10: Alteração no nível das vibrações dos três primeiros harmónicos da engrenagem devido ao desgaste (Adaptado de [85]).

5.5.4.1.2 Componentes fantasmas

Os componentes fantasmas resultam de erros de maquinagem. Aparentemente apresentam uma frequência de engrenamento, mas com um número de dentes diferentes dos que a engrenagem possuí. Normalmente, referem-se aos números de dentes da engrenagem indexadora da fresa onde foi feita a maquinagem. Assim, os componentes fantasmas têm origem em erros na engrenagem indexadora, ver figura 5.11 [83].

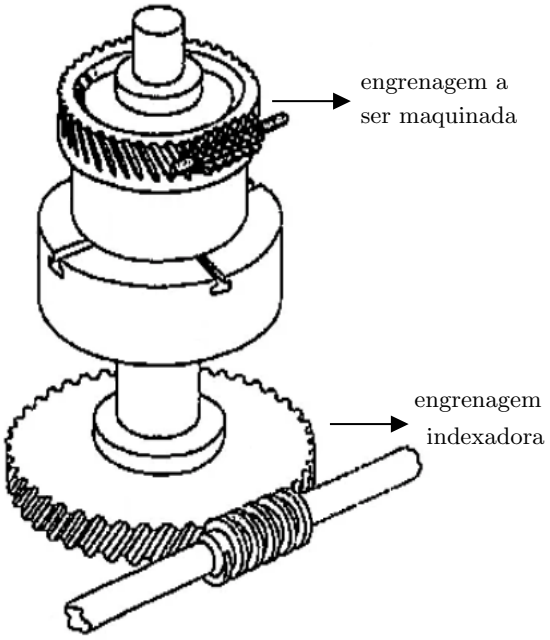


Figura 5.11: Criação de componentes fantasmas (Adaptado de [85]).

Como os componentes fantasmas representam um erro geométrico, não devem ser muito influenciados pela carga. Assim, de forma a verificar se se trata de um componente fantasma é através do seus comportamento em função da carga [85].

5.5.4.1.3 Bandas laterais

As bandas laterais têm origem na modulação da vibração de desmultiplicação do dente. Existem dois tipos de modulação: modulação em amplitude e em frequência. Tal como previamente observado, existe uma dependência da deflexão dos dentes com a carga. Assim, qualquer variação da carga provocará uma variação em amplitude (modulação em amplitude). Esta variação da carga pode ser causada por desalinhamentos. Por sua vez, as variações na carga dos dentes irão provocar alterações na velocidade angular, originando modulações em frequência [83].

A presença de bandas laterais não significa avaria. Em engrenagens com condições perfeitas, é habitual detetarem-se bandas laterais. Contudo, o crescimento ou o surgimento de novas bandas laterais, é que constitui o indicador de existência de problema [85].

5.5.4.1.4 Pequenos harmónicos à velocidade de rotação do rotor

Os pequenos harmónicos à velocidade de rotação do rotor são designados de impulsos aditivos. Estes impulsos aditivos são detetados quando a modulação em amplitude e frequência são assimétricas. Os harmónicos com frequência inferior a metade da frequência de desmultiplicação do dente estão mais relacionados com os efeitos aditivos, enquanto que os que têm frequência próxima ou superior à frequência de desmultiplicação do dente são principalmente gerados como bandas laterais [70].

5.5.4.1.5 Componentes de intermodulação

Estes componentes devem-se à soma e subtração de frequências geradas por intermodulação de outros componentes mais básicos. Estes componentes não têm grande importância, uma vez que só se alteram quando as componentes mais importantes se alterarem [83].

5.5.4.2 Vibrações do Veio

As vibrações dos veios podem ser originadas a partir de determinadas situações. De seguida, caracterizam-se as vibrações nos veios para cada uma dessas situações.

5.5.4.2.1 Desequilíbrio

O desequilíbrio acontece quando o eixo de rotação do veio e o centro de massa do conjunto veio/engrenagem não coincidem. O desequilíbrio leva ao surgimento de um componente de vibração na frequência de rotação do veio, sendo que a amplitude do sinal varia consoante a velocidade de rotação do veio [79].

5.5.4.2.2 Desalinhamento

Duas situações ilustram o fenómeno de desalinhamento: desalinhamento de um acoplamento entre dois veios e desalinhamento de rolamentos. No caso do desalinhamento de um acoplamento entre dois veios, surgem vibrações na frequência de rotação do veio, acompanhadas de outras frequências iguais ao dobro e triplo da velocidade de rotação do veios (harmónicos). Por sua vez, os rolamentos desalinhados também produzem vibrações com características semelhantes aos acoplamentos desalinhados, contudo tendem a excitar os harmónicos mais altos da frequência de rotação do veio [79].

5.5.4.2.3 Veio em flexão

Um veio em flexão pode ser considerado um caso de desalinhamento, apresentando vibrações na frequência de rotação do veio e dos seus harmónicos inferiores [79].

5.5.4.2.4 Fendas no veio

Um veio com fenda originará vibrações na frequência de rotação do veio e seus harmónicos. Com o aumento da profundidade da fenda até metade do raio do veio, a amplitude de vibração aumenta e não ocorrem grandes alterações na forma de onda, logo a amplitude na frequência de rotação do veio e seus harmónico tendem a aumentar na mesma proporção. A profundidade da fenda vai continuar a aumentar e quando passar da metade do raio do veio, a forma de onda tende a aproximar-se de uma onda sinusoidal. Assim, os harmónicos mais altos da frequência de rotação do veio tornam-se menos significativos na presença de fendas grandes [87].

5.5.4.3 Vibrações do Rolamento

As vibrações dos rolamentos apresentam uma amplitude muito menor comparativamente à das vibrações das engrenagens ou dos veios e são mais complexas [79].

Os defeitos que ocorrem nos rolamentos produzem vibrações cujas frequências não são múltiplas inteiras da velocidade de rotação do veio [69].

Existem quatro frequências devido aos defeitos nos rolamentos, estando estas frequências associadas aos componentes dos rolamentos, ver figura 5.12 [69].

As quatro frequências são as seguintes [69]:

- frequência da pista interna;
- frequência da pista externa;
- frequência dos elementos rolantes;
- frequência da gaiola.

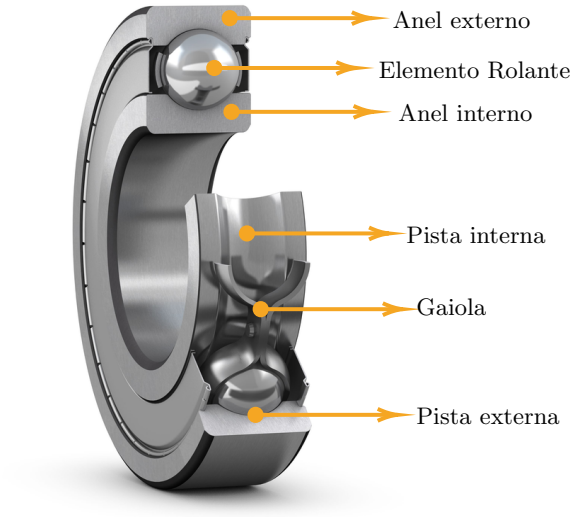


Figura 5.12: Componentes do rolamento (Adaptado de [88]).

5.5.5 Transdutor

Para monitorizar as vibrações utilizam-se transdutores de vibração mecânica, ou seja, sensores [66].

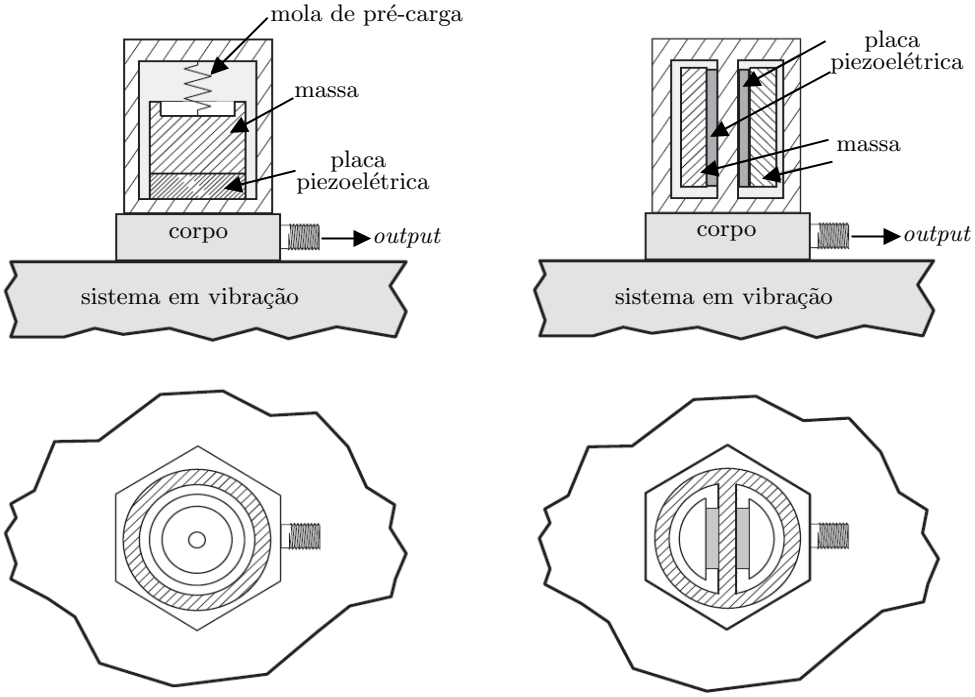
Os transdutores transformam valores de variáveis físicas (energia mecânica) em sinais elétricos (energia elétrica) equivalentes. Existem três tipos de transdutores disponíveis: tradutores de deslocamento, velocidade e aceleração. São vários os fatores que se devem considerar para a escolha de um transdutor, sendo os principais os seguintes: massa, dimensão, sensibilidade e aplicação [89].

Os transdutores são colocados em diversos pontos da máquina escolhidos estrategicamente, sendo medidas e registadas as vibrações em cada um desses pontos, nas três direções do espaço: vertical, horizontal e axial [66].

5.5.5.1 Acelerómetro piezoelétrico

O transdutor mais utilizado para realizar medições de vibrações é o acelerómetro piezoelétrico [66]. É um equipamento que mede a aceleração de um sistema em vibração e é constituído por uma placa de material piezoelétrico que origina uma carga elétrica quando submetido a uma tensão de tração, de compressão ou de corte [89].

Existem essencialmente duas configurações possíveis para este tipo de acelerómetro: o acelerómetro de compressão e o acelerómetro de corte, conforme se verifica na figura 5.13. A diferença entre os dois está na forma como a placa de material piezoelétrico é deformada [89].



(a) compressão (b) corte

Figura 5.13: Configuração de acelerómetros piezoeléctricos (Adaptado de [89]).

Este transdutor é o mais utilizado porque apresenta as seguintes características [70; 89]:

- construção robusta;
- massa reduzida;
- larga escala de variação de frequência;
- limites de frequência dinâmicos;
- pequena dimensão.

Os transdutores apresentados juntamente com os cabos associados podem originar atenuações/distorções do sinal, logo devem estabelecer-se adequadamente as localizações dos tradutores e utilizar proteções contra ambientes agressivos, para se conseguir bons resultados [81].

Assim, juntamente com os acelerómetros piezoelétricos é necessário utilizar os amplificadores de carga de forma a reduzir a perda de sensibilidade devida à capacitância no cabo que estabelece a ligação do acelerómetro ao instrumento de medição [89].

5.5.6 Considerações finais sobre a monitorização da vibração nas Caixas Redutoras

A análise de vibração tem sido amplamente utilizada na indústria como uma das técnicas de monitorização da condição, para determinar a condição geral de uma máquina.

Mesmo em boas condições, as máquinas geram vibrações durante a operação. Muitas dessas vibrações estão diretamente ligadas a eventos periódicos na operação da máquina, como eixos rotativos, engrenagens, entre outros.

A monitorização da vibração permite determinar a condição de cada componente, e determinar a tendência dessas medições permitindo disparar um alarme na presença de potenciais problemas. Diferentes tipos de falhas, como desequilíbrios, falhas de rolamento, ressonância, entre outras, geram vibrações com características diferentes. Cada falha na máquina desenvolve-se de uma forma diferente, portanto cada falha tem características de vibração exclusivas que podem ser detetadas através de comparação com as análises de vibração da máquina ao trabalhar em condições operacionais saudáveis. A monitorização da vibração pode ser realizada *on-line* ou *off-line*.

Nas caixas redutoras os componentes responsáveis pelo surgimento de vibração são os que apresentam movimento de rotação: engrenagens, rolamentos e veios.

A vibração de uma máquina pode ser representada no domínio do tempo ou no domínio da frequência. Quando a vibração é representada no domínio do tempo é apresentada em termos de fase e amplitude, que podem ser medidas como deslocamento, velocidade ou aceleração. Por sua vez, quando a vibração é representada no domínio de frequência pode ser apresentada através das suas frequências dominantes e harmónicos. Esta técnica de análise é a mais utilizada para monitorizar as vibrações nas caixas redutoras.

Para monitorizar as vibrações utilizam-se transdutores de vibração mecânica. Existem três tipos de transdutores disponíveis: tradutores de deslocamento, velocidade e aceleração. O transdutor mais utilizado para realizar medições de vibrações é o acelerómetro piezoelétrico.

5.6 Monitorização do óleo

5.6.1 Introdução

Os óleos lubrificantes são utilizados para reduzir o atrito e o desgaste nos corpos que estão em contacto. O lubrificante separa as superfícies em contacto através da formação de uma película de óleo lubrificante [90; 91].

Apesar da análise de vibração e a termografia serem uma boa ajuda na deteção de falhas graves em máquinas rotativas, estes métodos requerem equipamentos sofisticados de aquisição de dados e procedimentos computacionais difíceis de implementar. Para além disso, verifica-se uma reduzida alteração na vibração/temperatura durante o desenvolvimento inicial de uma falha [92].

Os problemas de operação das máquinas são frequentemente refletidos na qualidade do óleo lubrificante. A análise de lubrificantes pode permitir identificar os problemas mecânicos antes que estes afetem o funcionamento das máquinas, evitando assim gastos económicos e até mesmo a paragem da máquina. Assim, facilmente se entende que é necessário, e importante realizar uma correta monitorização do óleo [93]. A monitorização do óleo é realizada para cumprir três principais objectivos [94]:

- minimizar a contaminação dos óleos lubrificantes por partículas ou outros contaminantes, que se não forem observados, podem provocar a falha da máquina;
- minimizar a degradação das propriedades físicas do óleo, que se não forem observados, podem provocar a falha da máquina;
- garantir que todas as partículas de desgaste contidas no óleo lubrificante, que resultam de danos nos componentes são detetadas e analisadas, conseguindo assim identificar a fonte das mesmas e intervir, se for necessário.

Tendo em conta o que foi dito, percebe-se que a monitorização do óleo divide-se em duas categorias: análise das partículas e análise das propriedades físicas do óleo.

O estudo será centrado na análise das partículas presentes no óleo. Existem muitas fontes potenciais dessas partículas:

- durante a produção do óleo lubrificante, as matérias-primas e os equipamentos de fabricação podem introduzir partículas [95];
- máquina e/ou reservatórios podem conter sujidade, areia, lascas de tinta, resíduos químicos e água [96];
- as partículas podem entrar através de aberturas existentes nas máquinas e/ou vedações desgastadas [97; 98]. A fadiga e o desgaste das peças/componentes envelhecidos ou imperfeitamente equilibradas podem gerar partículas de desgaste. [97–99]. As superfícies dos rolamentos podem partir as partículas em pedaços de menor dimensão [100];
- pode ocorrer contaminação quando os componentes são substituídos ou quando o equipamento sofre manutenção [96].

Desta forma, as partículas de desgaste são a prioridade deste estudo, uma vez que são as que indicam a origem do problema, permitindo identificar o componente da máquina que apresenta problemas.

5.6.2 Tipos de óleo lubrificante

5.6.2.1 Óleos minerais

A maior parte dos lubrificantes têm origem no petróleo, que é uma mistura de hidrocarbonetos de origem natural (mistura de gás, de alcatrão e de parafina). Tem origem na decomposição de resíduos orgânicos e encontra-se geralmente entre camadas rochosas a uma determinada profundidade, mas também pode aparecer à superfície [101; 102].

Estes óleos são preparados a partir de ramas petrolíferas, sendo que a maior parte dos óleos provem diretamente da parte mais viscosa das ramas por destilação [103]. Cerca de 85% dos óleos são de base parafínica, intermédia e nafténica. As propriedades físicas dos óleos dependem das ramas petrolíferas de origem [104]:

- **Base parafínica:** alto índice de viscosidade, elevado ponto de congelação, baixo peso específico;
- **Base nafténica:** baixo índice de viscosidade, baixo ponto de congelação, alto peso específico.

Contudo, durante a destilação e nos processos de acabamento de lubrificantes as diferenças podem ser reduzidas ou eliminadas [103].

Os óleo minerais são económicos, contudo, como têm origem de fontes não renováveis de energia, não são ecologicamente viáveis [105].

5.6.2.2 Óleos sintéticos

Existe outro processo para obtenção de óleos lubrificantes. Os óleos sintéticos são alternativas para os óleos à base de petróleo e são obtidos por síntese de hidrocarbonetos leves e inclusão de elementos orgânicos não petrolíferos [103; 106].

5.6.3 Viscosidade dos lubrificantes

A propriedade mais importante de um lubrificante líquido é a sua viscosidade [101]. A viscosidade consiste na resistência oposta por um fluido a todo o deslizamento interno das suas moléculas umas sobre as outras [103].

5.6.3.0.1 Viscosidade dinâmica:

A viscosidade dinâmica é representada pela letra μ e a unidade no sistema SI é Pa s [107].

5.6.3.0.2 Viscosidade cinemática:

A viscosidade cinemática é representada pela letra υ e a unidade no sistema SI é m^2/s [107]. A relação entre a viscosidade dinâmica e cinemática é dada pela seguinte expressão [103]:

$$\frac{\mu}{\upsilon} = massa\ especfica\ (\rho) \tag{5.1}$$

5.6.4 Classificação dos Óleos Lubrificantes

Existem várias normas que estabelecem a classificação dos óleos [103; 108].

As especificações SAE (Society of Automotive Engineers) fornecem um intervalo da viscosidade do óleo a uma determinada temperatura, para além de características de bombagem a baixas temperaturas. Não avaliam a qualidade do óleo, dividindo-o em óleos motores e óleos para diferenciais [108].

Atualmente, a classificação ISO (International Standars Organization) é a mais utilizada, uma vez que é aplicável a todos os tipos de óleos industriais, ver tabela 5.2 [103].

Tabela 5.2: Classificação ISO para lubrificantes industrias [103].

Graus de viscosidade	Ponto médio de viscosidade cSt ($mm^2\,s^{-1}$) a 40 °C	Ponto médio de viscosidade cSt ($mm^2\,s^{-1}$) a 40 °C	
		Min	Max
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	9.00	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	90.0	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

Para além desta classificação, importa saber que os óleos industriais também podem ser classificados tendo em conta os aditivos. Para a aplicação em estudo os óleos utilizados são de extrema pressão, possuindo quantidades significativas de fósforo [109].

5.6.5 Lubrificação das caixas redutoras

Nas caixas redutoras a lubrificação pode ocorrer de duas maneiras [110]:

- lubrificação por salpico;
- lubrificação de circulação forçada.

5.6.5.1 Lubrificação por salpico

A lubrificação por salpico é a maneira mais fácil de garantir uma lubrificação contínua, sendo o método de lubrificação mais comum [111]. O seu funcionamento é simples, por cada ciclo de engrenamento, uma roda dentada mergulha no óleo e transporta-o para a zona de engrenamento [112].

Após ocorrer a lubrificação das engrenagens, o óleo é redirecionado para os rolamentos que exigem lubrificação, ver figura 5.14, ou segue diretamente para a base da caixa redutora pelas paredes da carcaça [113].

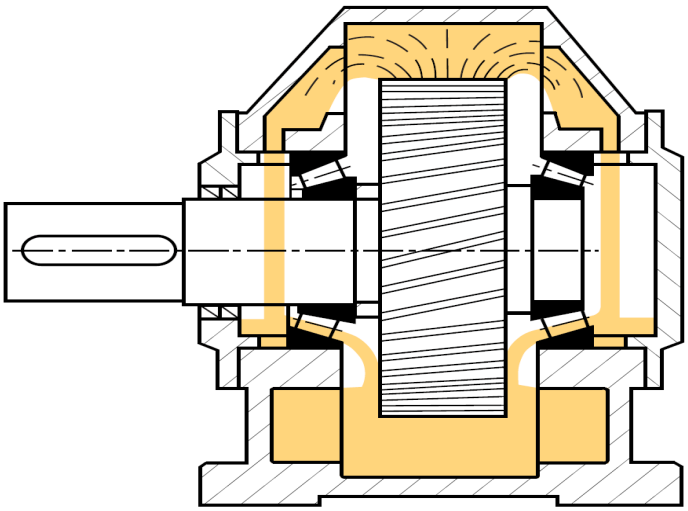
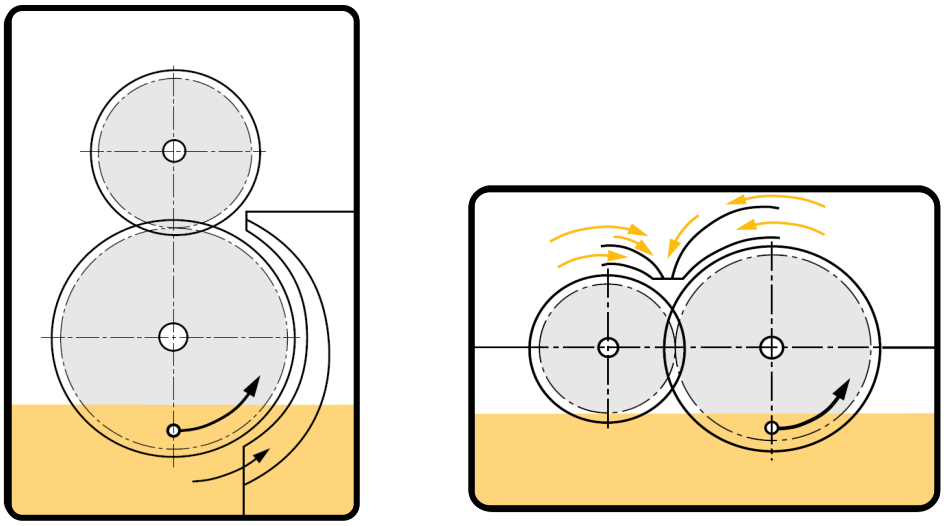


Figura 5.14: Lubrificação por salpico: lubrificação de rolamentos por meio de reservatórios intermediários [113].

A lubrificação por salpicos sem quaisquer alterações no projeto é possível até uma velocidade periférica de aproximadamente 20 m/s. Para velocidades periféricas superiores são necessárias guias de óleo, ver figura 5.15 [112].

Este tipo de lubrificação é importante manter um determinado nível de óleo, para evitar danos, e garantir uma operação estável. Se o nível do óleo estiver muito baixo, poderá originar uma lubrificação insuficiente, dissipação inadequada de calor e aumento do desgaste. Por sua vez, se o nível do óleo estiver muito alto, verifica-se uma aceleração do envelhecimento do óleo, diminuindo a sua vida útil [113].



(a) disposição horizontal (b) disposição vertical

Figura 5.15: Exemplos de placas guia de óleo (Adaptado de [113]).

5.6.5.2 Lubrificação de circulação forçada

Utiliza-se a lubrificação de circulação forçada em vez da lubrificação por salpicos nas seguintes situações [113]:

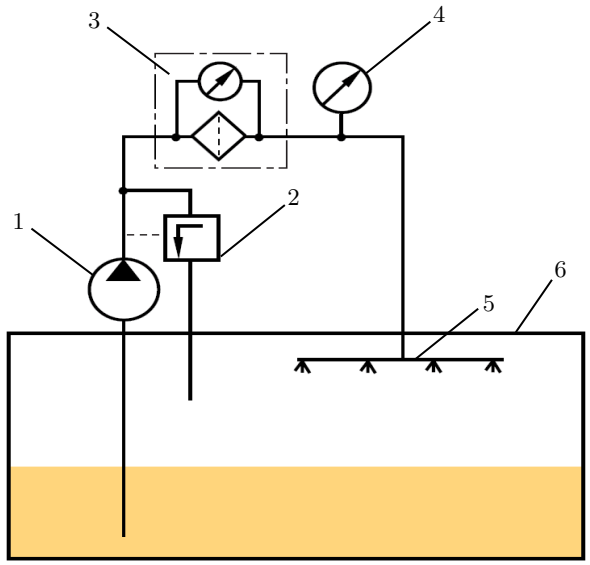
- velocidades periféricas elevadas;
- chumaceiras de deslizamento.

O óleo lubrificante é injetado nos flancos dos dentes, na zona inicial ou final do engrenamento. Assim, este tipo de lubrificação também é designado por lubrificação por injeção. Quando o óleo é injetado na fase inicial de engrenamento é mais vantajoso para o processo de lubrificação, enquanto que o óleo injetado na fase final de engrenamento intensifica o efeito de arrefecimento [112].

Tendo em conta o tipo de circulação do óleo, estabelecem-se dois tipos de lubrificação por injeção [113]:

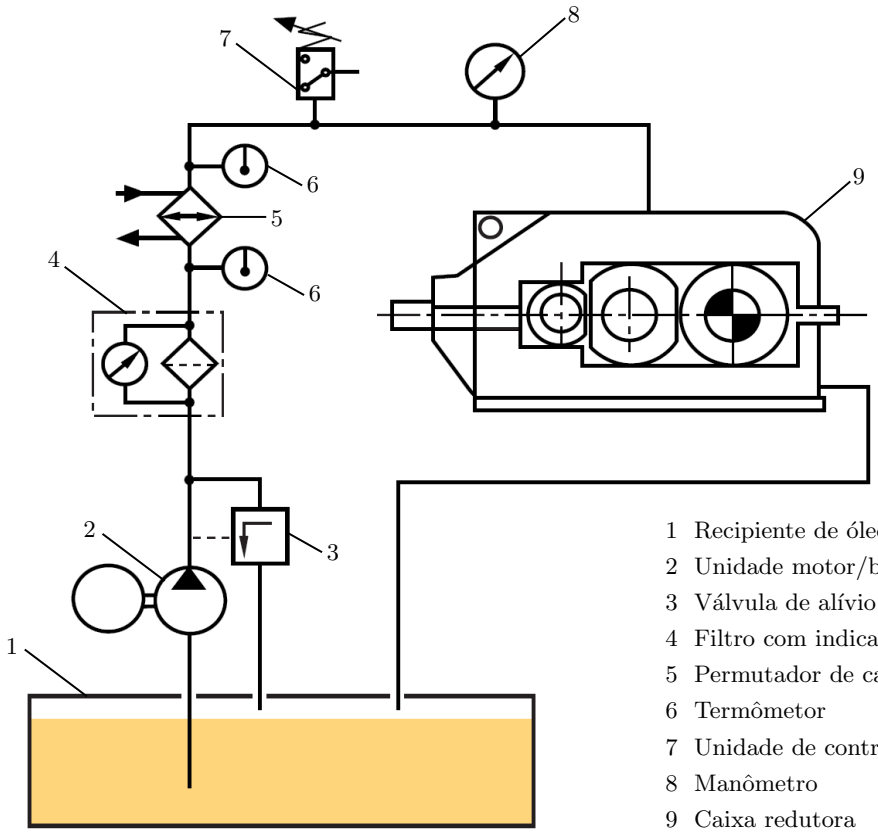
- cárter seco;
- cárter húmido.

Na lubrificação por cárter húmido, figura 5.16, o reservatório de óleo lubrificante é a carcaça da caixa redutora, sendo o óleo levado diretamente para os pontos onde é injetado nas rodas dentadas. Por outro lado, no cárter seco, o óleo depois de ser injetado é recolhido, saindo da caixa redutora, e é armazenado num reservatório isolado, onde será, posteriormente, conduzido para os pontos de injeção, como se verifica na figura 5.17. A lubrificação por cárter seco é utilizada se o volume de óleo lubrificante for muito grande para ser acomodado na caixa redutora [113].



1 Bomba
2 Válvula de alívio de pressão
3 Filtro com indicador de diferença de pressão
4 Manômetro
5 Pulverizador
6 Caixa redutora

Figura 5.16: Desenho esquemático de um sistema de lubrificação por cárter húmido (Adaptado de [113]).



1 Recipiente de óleo
2 Unidade motor/bomba
3 Válvula de alívio de pressão
4 Filtro com indicador de diferença de pressão
5 Permutador de calor
6 Termômetor
7 Unidade de controlo de pressão
8 Manômetro
9 Caixa redutora

Figura 5.17: Desenho esquemático de um sistema de lubrificação por cárter seco (Adaptado de [113]).

5.6.6 Posição de monitorização

A monitorização dos óleos pode ser realizada em três posições, ver figura 5.18 [114]:

- *on-line*;
- *in-line*;
- *off-line*.

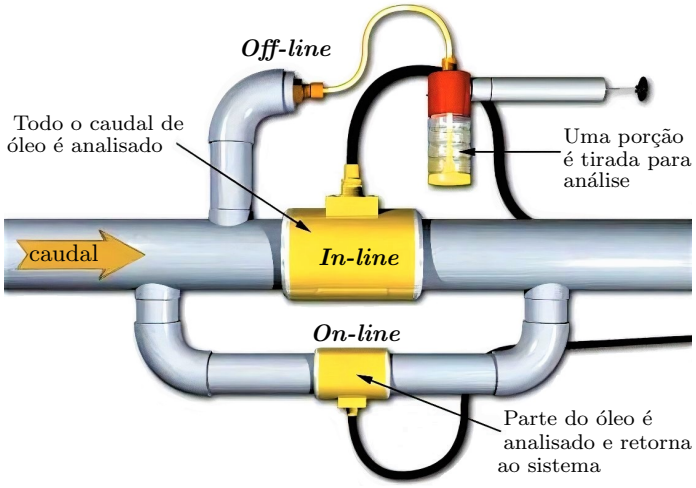


Figura 5.18: Posições de monitorização de análise de óleo (Adaptado de [115]).

Posteriormente, explicar-se-ão as grandes diferenças entre as três posições de monitorização.

5.6.6.1 Monitorização *on-line* e *in-line*

Quando se realiza uma monitorização *on-line* ou *in-line*, os equipamentos de monitorização do óleo estão instalados perto da máquina, ou na própria máquina. Uma grande vantagem deste método é o fornecimento de informações em tempo real sobre o estado da máquina [116].

Na monitorização *on-line* apenas uma parte do óleo lubrificante é analisada, sendo posterioridade retornada ao sistema, na monitorização *in-line* todo o óleo lubrificante é analisado [114].

5.6.6.2 Monitorização *off-line*

Na monitorização *off-line* é necessário que uma amostra de óleo lubrificante seja retirada do sistema de lubrificação da máquina, e depois essa amostra é analisada em laboratório. Apesar destes métodos fornecerem informações detalhadas sobre o estado do óleo lubrificante, os procedimentos de teste são demorados, e, normalmente, requerem analistas qualificados e equipamentos caros [116].

5.6.7 Análise de desgaste

Numa máquina em funcionamento, a falha é inevitável se a manutenção não for realizada em tempo útil [117]. Portanto, uma maneira eficaz de ter alta fiabilidade e baixo custo é realizar manutenção baseada na condição por meio da detecção *off-line* ou *on-line/in-line*. Para identificar a condição de integridade da máquina, o mecanismo de falha deve ser conhecido. Entre os modos de falha, a falha de desgaste é o tipo mais comum e inevitável. No estado inicial deste processo de desgaste, a superfície de fricção torna-se mais macia e a rugosidade diminui pelo processo de rodagem. Gradualmente a superfície fica mais áspera devido à geração de detritos, o que aumentará a vibração mecânica. A superfície de fricção também é aquecida pela energia liberada pela deformação. Estes dois efeitos fazem com que o desgaste por fricção se torne progressivamente mais severo e, finalmente, causa danos aos componentes e falha do sistema [118]. Foi descoberto há cerca de um século que os detritos de desgaste estão fortemente relacionados à condição de atrito [119].

Em comparação com os outros dois indicadores visíveis, temperatura e vibração, usar detritos de desgaste como um indicador de integridade da máquina tem algumas vantagens distintas, como forte relação com o perfil da superfície de desgaste, longa persistência de informações e forte capacidade anti-interferência. Como tal, o uso de detritos de desgaste para investigar as condições de saúde das máquinas atraiu muita atenção desde 1950 [120]. Muitos métodos de detecção foram desenvolvidos nas últimas décadas, tornando as informações de detritos um indicador importante para o estado de saúde mecânica [121].

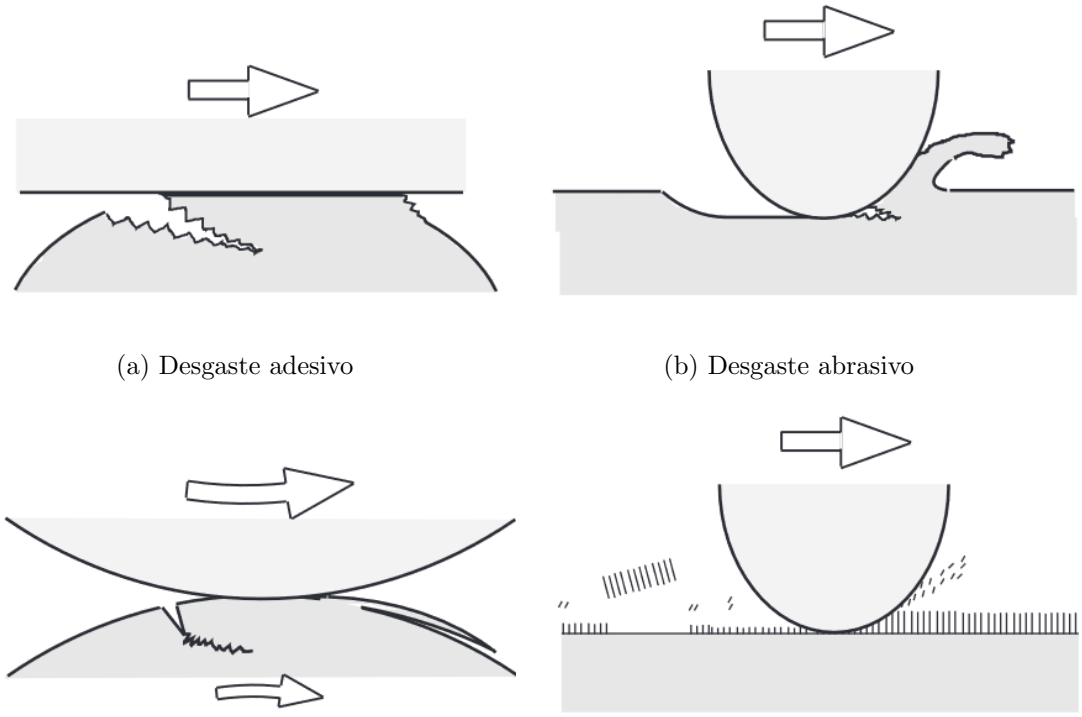
A monitorização de partículas *on-line/in-line* tem sido aplicada para aumentar a fiabilidade do sistema, e reduzir o custo de manutenção em vários equipamentos [118]:

- motores de aviões comerciais e militares [122; 123];
- caixas redutoras de helicópteros [124];
- turbinas eólicas [124].

Tendo em conta a taxa de contaminação por partículas sólidas, o material e a sua dimensão, é possível identificar a presença de um mau funcionamento da máquina e identificar a origem do problema [125]. A maioria das máquinas e mecanismos que operam com óleo podem ser monitorizados com sucesso pela análise dos detritos de desgaste [126]. Assim, as partículas são a forma mais prejudicial de contaminação do lubrificante [97; 98; 100]. Analisar a natureza das partículas permite identificar a origem, sendo importante para identificar qual o componente da máquina que apresenta problemas [69].

5.6.7.1 Mecanismos de desgaste

Num par de fricção, o mecanismo de desgaste depende da carga, velocidade de deslizamento, dureza e rugosidade da superfície de desgaste, lubrificação, entre outros fatores. Por sua vez, as caraterísticas dos detritos e o tipo de desgaste são duas manifestações externas do mecanismo de desgaste [127]. O mecanismo de desgaste pode ser classificado em quatro tipos, conforme se verifica na figura 5.19: desgaste adesivo, desgaste abrasivo, desgaste por fadiga e desgaste corrosivo [128].



(a) Desgaste adesivo

(b) Desgaste abrasivo

(c) Desgaste por fadiga

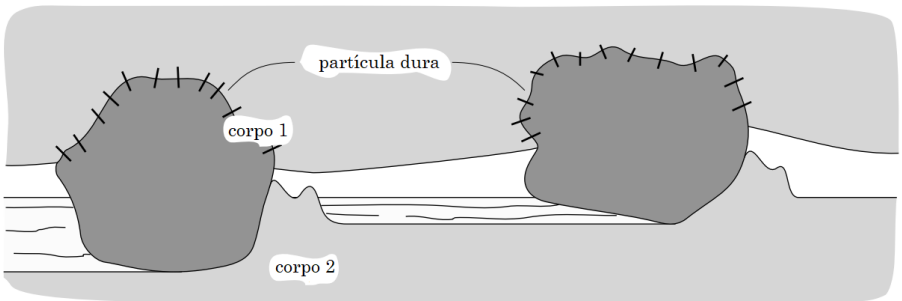
(d) Desgaste corrosivo

Figura 5.19: Representação esquemática dos mecanismo de desgaste [129].

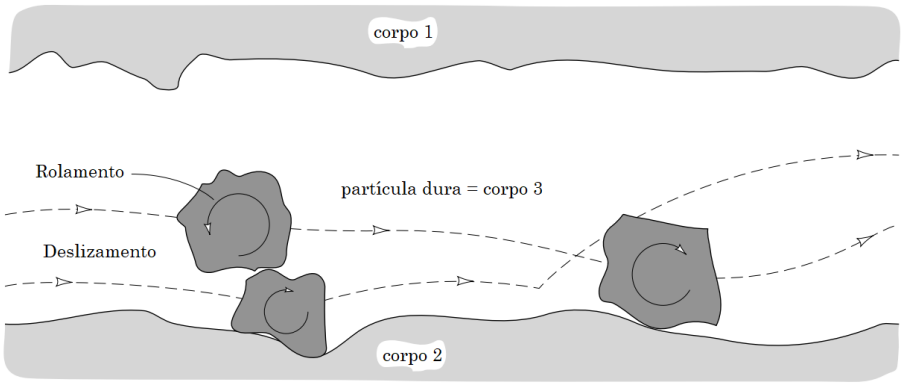
5.6.7.1.1 Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo ocorre quando um objeto sólido é pressionado contra partículas de um material que apresenta uma dureza igual ou superior. O desgaste abrasivo pode ser causado por materiais dúcteis, se partículas duras estiverem presentes [105].

O desgaste abrasivo ocorre entre 2 corpos quando uma superfície dura e rugosa, ou uma superfície macia contendo partículas duras, desliza sobre uma superfície de menor dureza, produzindo nela diversas ranhuras, ver figura 5.20a. O desgaste abrasivo ocorre entre 3 corpos quando as partículas duras são livres para rolar e deslizar entre as 2 superfícies, ver figura 5.20b. A taxa de desgaste no caso de 3 corpos é geralmente menor [105].



(a) Desgaste abrasivo de 2 corpos.



(b) Desgaste abrasivo de 3 corpos.

Figura 5.20: Representação esquemática do desgaste abrasivo de 2 e 3 corpos (Adaptado de [105]).

A equação de Archard é utilizada para descrever as taxas de desgaste, ver equação 5.2 [130; 131].

$$W = K\frac{PV}{H} \tag{5.2}$$

onde W ($\mathrm{m^3\,s^{-1}}$) é a taxa de desgaste, K é o coeficiente de desgaste, P (N) é a carga no par de fricção, V ($\mathrm{m\,s^{-1}}$) é a velocidade de deslizamento e H ($\mathrm{N\,m^{-2}}$) é a dureza da superfície de desgaste.

Em uma condição de desgaste estável, o valor de K é constante. O valor típico pertence ao intervalo de 0,005-0,05 no desgaste de dois corpos e tende a ser inferior a 0,0005 no desgaste de três corpos [127]. No entanto, um teste de desgaste completo indicou que a taxa de desgaste é variável: os estágios inicial e final são altos e o estágio intermediário é estável e baixo, conforme se verifica na figura 5.21 [118].

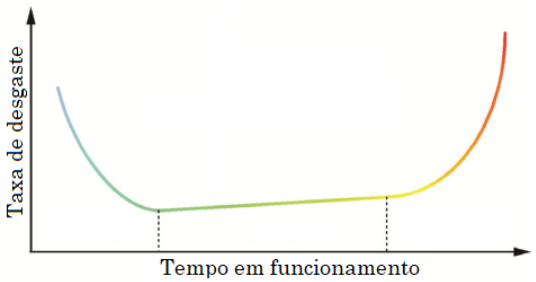


Figura 5.21: Variação da taxa de desgaste (Adaptado de [118]).

5.6.7.1.2 Desgaste adesivo

O desgaste adesivo deve-se ao contacto entre a rugosidade dos materiais, envolvendo elevadas pressões e causando microsoldaduras localizadas nos pontos de contacto entre as superfícies. As microsoldaduras soltam-se com o contínuo movimento das superfícies, provocando a fratura numa superfície e, o fragmento fica encrustado na outra [69].

Na taxa de desgaste adesivo também se pode utilizar a equação de Archard, mas o coeficiente de desgaste é 5×10^{-7} a 5×10^{-3}. Apesar da taxa de desgaste não ser muito alta, o componente pode quebrar repentinamente devido ao aumento do atrito causado pela adesão. Assim, o desgaste adesivo é um presságio de falha do componente [118].

5.6.7.1.3 Desgaste por fadiga

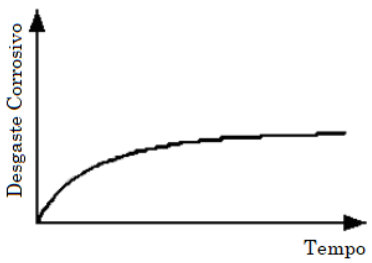
Para existir desgaste por fadiga é necessário que existam tensões cíclicas. Apesar do desgaste de fadiga poder ocorrer sobre condições de desgaste por deslizamento, costuma ocorrer nas situações de rolamento, onde as tensões são altas e o deslizamento é pequeno [69]. Estudos de fadiga de rolamento indicaram que o início da fadiga está associado a 10% a 40% da vida útil [132].

O desgaste por fadiga geralmente ocorre em superfícies de contato periódicas, como por exemplo, rolamentos e engrenagens [118]. Nas engrenagens as superfícies de fricção não são suficientemente lisas e limpas, as rugosidades aumentam as tensões locais e causam cavidades superficiais [133]. Essas cavidades têm cerca de 5 a 25 µm de profundidade e existem na maior parte da área de contacto. Deste modo, um grande número de partícula são geradas. Por sua vez, as superfícies de fricção num rolamento são bastantes lisas, sendo que o filme de óleo lubrificante poderia separar as superfícies em movimento. Nos rolamentos, geralmente, o desgaste de fadiga resulta nos dados provocados à superfície por detritos presentes no lubrificante [118].

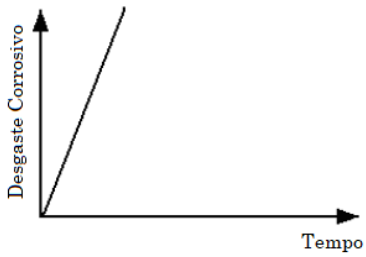
5.6.7.1.4 Desgaste corrosivo

Desgaste corrosivo é definido como a degradação de materiais, estando a corrosão envolvida. Ocorre devido à interação do ambiente com a superfície de deslizamento, onde produtos da reação de corrosão se formam na superfície, e podem ser removidos por outros mecanismos de desgaste. O desgaste corrosivo pode ser dividido em duas fases: ataque corrosivo da superfície e desgaste do filme dos produtos da reação de corrosão [69].

Na primeira fase ocorre o ataque corrosivo da superfície, sendo que a velocidade da reação de corrosão diminui com o tempo, conforme se verifica na figura 5.22a. Tal acontece, uma vez que se forma um filme na superfície que a protege. Por vezes, a reação química continua coma velocidade inicial, como se verifica na figura 5.22b, uma vez que o filme que se forma é poroso, frágil ou perdeu fragmentos, não sendo um filme protetor [69].



(a) Formação de filme protetor na superfície



(b) Sem formação de filme protetor na superfície

Figura 5.22: Desgaste corrosivo em função do tempo [69].

A segunda etapa do processo de desgaste corrosivo consiste no desgaste do filme dos produtos da reação. Isto acontece como resultado do deslizamento ocorrido neste lugar. Após o deslizamento a superfície fica exposta, continuando o ataque corrosivo a acontecer [69].

5.6.7.2 Danos microscópicos

Partículas contaminantes microscópicas são invisíveis ao olho humano, mas são capazes de danificar componentes mecânicos. Estima-se que 82% do desgaste de uma máquina é induzido por partículas [95; 96]

Os efeitos das partículas dependem do seu tamanho em relação às larguras das folgas (folgas dinâmicas) entre as superfícies de contacto das engrenagens, rolamentos e válvulas [100; 134], ver tabela 5.3.

Tabela 5.3: Danos provocados pelas partículas, tendo em conta o tamanho das partículas em relação às folgas entre as superfícies de contacto [96].

Tamanho da partícula	Efeitos no equipamento
Partículas >Folga	As partículas não cabem nas folgas. As partículas podem bloquear orifícios, dificultar o movimento de peças móveis e obstruir as válvulas.
Partículas = Folga	As partículas encaixam-se nas folgas, riscando as superfícies, causando desgaste abrasivo e fadiga superficial. As partículas são quebradas em fragmentos e sofrem encruamento.
Partículas < Folga	Partículas passam pelas folgas. As partículas causam desgaste erosivo e formam depósitos de lodo que podem bloquear as folgas.
Partículas de todos os tamanhos	Ruído, vibração, perda de fiabilidade, avarias, redução dos intervalos de manutenção e da vida útil do equipamento e redução da vida útil do lubrificante.

5.6.7.3 Danos macroscópicos

Com o tempo, os danos microscópicos acumulam-se e tornam-se macroscópicos, podendo afetar o desempenho, provocar avarias e, até a própria destruição da máquina [135]. As partículas microscópicas podem arranhar ou rasgar as superfícies, ocorrendo a remoção do metal, que corresponde ao desgaste abrasivo, ver figura 5.23. Este tipo de desgaste pode ocorrer dentro de contactos deslizantes, como dentes de engrenagens e alguns tipos de rolamentos [95; 97–99].

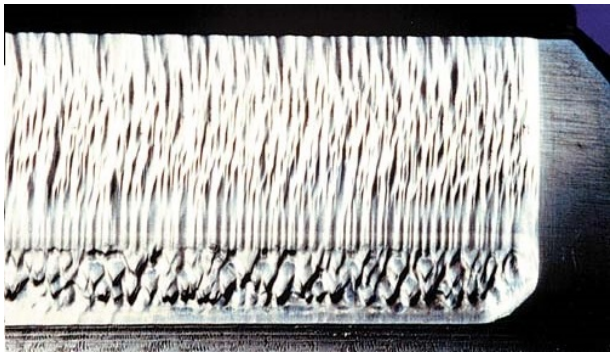


Figura 5.23: Dente de engrenagem com desgaste abrasivo causado por partículas duras presentes no lubrificante [96].

Na figura 5.24 o dano macroscópico do equipamento mecânico foi iniciado por uma única partícula microscópica. Essa partícula, dentro do contacto, amassou e deformou a superfície do metal numa escala microscópica. Com a continuação da operação da máquina, tensões e pressões dentro do rolamento causaram o crescimento da amolgadela microscópica e a ocorrência de corrosão e fragmentação [98; 99; 136].

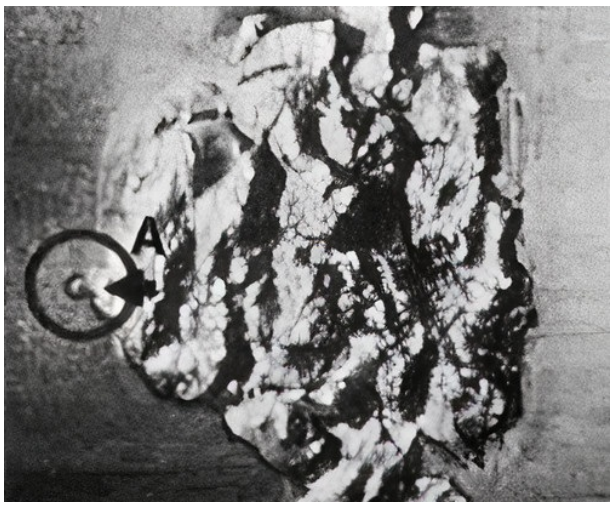


Figura 5.24: Micrografia de uma pista de rolamento onde uma única partícula amassou a superfície (A), iniciando corrosão e fragmentação [96].

Na figura 5.25 observa-se mais uma falha provocada por partículas. Neste caso, o dano microscópico originou fendas que se desenvolveram e penetraram na superfície do metal [95; 97–99].

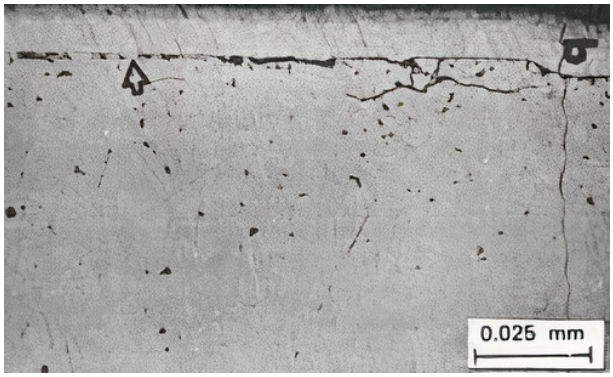


Figura 5.25: Micrografia da secção transversal de um rolamento. Danos na superfície do rolamento (b) iniciaram fendas que se propagaram através do metal. [96].

5.6.7.3.1 Geração de partículas

Tal como se observou, o estudo das dimensões das partículas permite identificar os diferentes níveis de desgaste dos componentes. De uma forma genérica, podem classificar-se os seguintes níveis de desgaste em função das dimensões das partículas [69]:

- desgaste normal: a maioria das partículas apresenta uma dimensão entre 0.1 e 1.0 mícrons. As partículas maiores não ultrapassam os 10 mícrons;
- desgaste acentuado: a maioria das partículas apresenta uma dimensão entre 1 e 10 mícrons. As partículas maiores não ultrapassam os 100 mícrons;
- desgaste avançado: começa a aumentar a concentração das partículas na faixa de 100 mícrons;
- desgaste catastrófico: a maioria das partículas apresenta uma dimensão entre 100 e 1000 mícrons.

A figura 5.26 estabelece a relação entre a geração de partículas e o processo de desgaste [129].

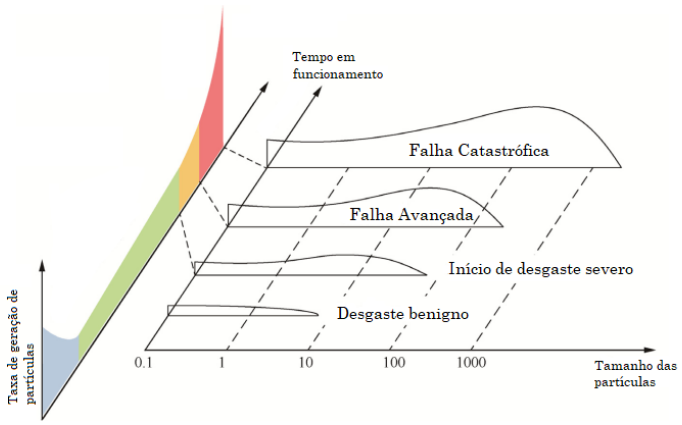


Figura 5.26: Relação entre a geração de partículas e o processo de desgaste (Adaptado de [129]).

5.6.8 Métodos de análise de desgaste

Existem diferentes métodos que podem ser utilizados para monitorizar e analisar o desgaste, uns métodos mais simples, como a espectroscopia elementar, e outros mais complexos, como a ferrografia analítica. Deste modo, é importante conhecer todos os métodos, de forma a identificar qual o melhor para situações específicas [125].

Seguidamente, são apresentados os diferentes métodos de análise de desgaste.

5.6.8.1 Espectroscopia elementar

A espectroscopia elementar, às vezes referida como análise elementar, mede a concentração de 15 a 25 elementos atómicos, metais de desgaste (por exemplo: ferro, cobre, chumbo e estanho), contaminantes (por exemplo: silício, sódio e potássio) e elementos aditivos de óleo (por exemplo: fósforo, zinco e cálcio) [125].

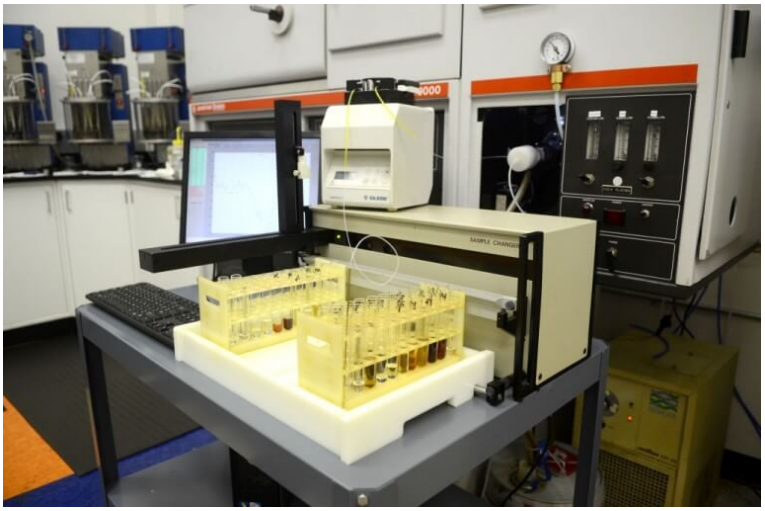


Figura 5.27: Equipamento utilizado para realizar a espectroscopia elementar [137].

Este método não consegue detetar partículas de desgaste com tamanho superior a 3 ou 8 mícrons, dependendo do instrumento utilizado, sendo apenas confiável para partículas inferiores a 1 mícron. No caso dos rolamentos e engrenagens, quando se tem um problemas de desgaste, as partículas chegam a alcançar dimensões acima de 10 mícrons, logo esta técnica não pode ser utilizada isoladamente para monitorizar e detetar partículas de desgaste nas caixas redutoras [109].

5.6.8.2 Densidade ferrosa

Este método de análise já permite detetar a presença de grandes partículas de ferro ou aço numa amostra de óleo. Por grandes partículas entende-se partículas com dimensão superior a 5 mícrons. Este método é utilizado em caixas de engrenagens de grande dimensão e em outros componentes que produzem partículas ferrosas, sendo limitado a partículas magnéticas. As partículas não ferrosas e as partículas ferrosas oxidadas não apresentam

propriedades magnéticas, logo não serão identificadas por este método de análise, mas são indicativas da ocorrência de desgaste [125].

5.6.8.2.1 Ferrografia de leitura direta

Existem vários equipamento que realizam esta análise, sendo que o método mais conhecido que realiza a análise de densidade ferrosa é a ferrografia de leitura direta. Com este método é possível saber a quantidade de partículas em duas faixas de tamanho [125]:

- maiores que 5 mícrons (DRL);
- menores que 5 mícrons (DRS).

Nesta técnica, uma amostra de óleo flui através de um tubo de vidro inclinado através de um forte campo magnético com duas pequenas aberturas onde as partículas magnéticas são acumuladas e medidas por bloqueio de luz, ver figura 5.28. A primeira abertura captura partículas grandes, maiores do que 5 mícrons, e a segunda abertura captura partículas pequenas, menores do que 5 mícrons. Sublinha-se que existe alguma mistura de partículas, sendo que algumas partículas pequenas são capturadas na primeira abertura. Para além disso, contaminantes e partículas não ferrosas podem ser capturadas nas aberturas [138].

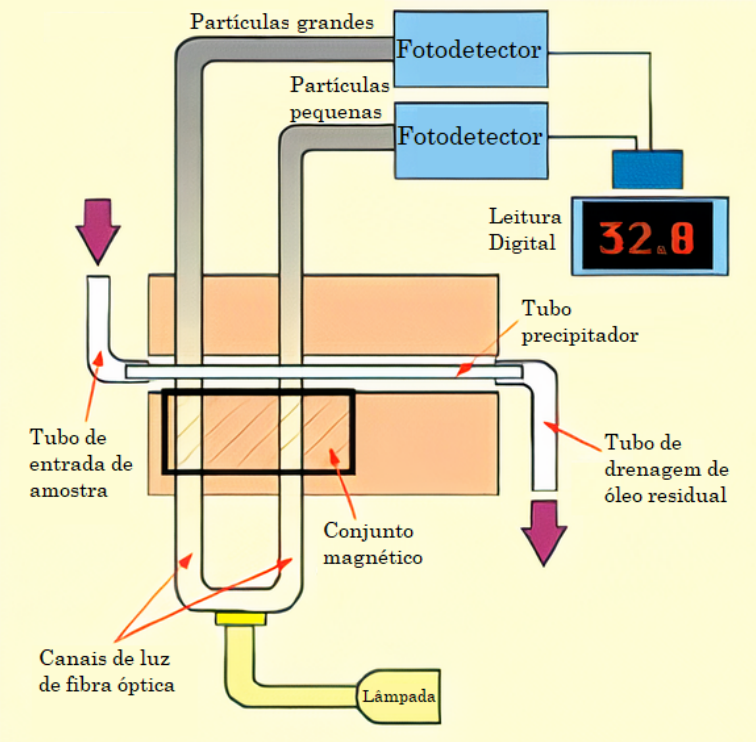


Figura 5.28: Representação esquemática do processo de funcionamento da ferrografia de leitura direta [138].

A medição das partículas é expressa como concentração de partículas de desgaste (WPC), que é um número sem unidade [138]. Tendo em conta que DRL retrata a con-

centração de partículas grandes e DRS a concentração de partículas pequenas, o valor de WPC pode ser obtido através da equação 5.3 [125].

$$\text{WPC} = \frac{\text{DRL} + \text{DRS}}{\text{Volume}} \tag{5.3}$$

Como a ferrografia de leitura direta é relativamente barata e rápida, é uma boa ferramenta de triagem para a ferrografia analítica [138].

Com este método é possível concluir se existe ou não um processo de desgaste ativo. Além disso, observando a proporção de partículas grandes e partículas pequenas, a gravidade de um problema de desgaste ativo também pode ser avaliada e traçar a tendência ao longo do tempo [125]. Quando o rácio de DRL para DRS aumenta, é uma indicação de uma maior geração de partículas grandes, o que indica um potencial desgaste catastrófico [138].

A ferrografia de leitura direta é usada na análise de rotina de óleo para sistemas com grandes quantidades de metais ferrosos, como por exemplo caixas de engrenagens [138]. No entanto, apresenta como desvantagem o facto de o teste ser limitado a partículas magnéticas, e não indicar problemas com componentes não ferrosos. Para além disso, as partículas ferrosas oxidadas também podem não ser magnéticas, embora ainda sejam indicativas de desgaste em andamento [125].

Antes que a ferrografia analítica seja realizada nesses sistemas, certos limites devem ser estabelecidos. A tabela 5.4 expressa os valores totais normais de WPC por equipamento antes de ir para a ferrografia analítica [138].

Tabela 5.4: Limites aceitáveis para WPC (DRL + DRS) [138].

Equipamento	WPC (DRL + DRS)
Bombas de vácuo	1-5
Bombas de alimentação da caldeira	1-100
Compressores de Gás Turbinas Ventiladores	1-20
Rolamentos lisos	1-20
Rolamentos de Rolo	5-100
Motores Transmissões	10-150
Caixas redutoras extrusoras	100-600
Caixas redutoras de guincho	1000-50000

É importante determinar a tendência da relação DRL e DRS. Normalmente, à medida que a proporção aumenta, a gravidade do desgaste aumenta. Uma proporção superior a 5:1 exige investigação adicional com a realização da ferrografia analítica. No entanto, alguns laboratórios estão interessados apenas no valor geral do DRL, ver tabela 5.5 [138].

Tabela 5.5: Limites aceitáveis para WPC (DRL) [138].

Equipamento	WPC (DRL)
Turbinas a gás e vapor	15
Compressores centrífugos	15
Compressores alternativos	50
Caixas redutoras	100
Motores elétricos	50
Bombas	50
Hidráulica	30
Rolamentos Babbitt	30

5.6.8.3 Contagem de partículas

A contagem de partículas consiste em monitorizar o número de partículas de um tamanho específico por volume de óleo lubrificante. A contagem de partículas, à semelhança da ferrografia de leitura direta, deteta o início do desgaste severo, devido ao rápido aumento no tamanho e número de partículas. A grande diferença entre estes dois métodos, é que a contagem de partículas deteta todas as partículas, enquanto que a ferrografia de leitura direta apenas as partículas ferrosas [69].

A contagem de partículas pode ser realizada por diferentes técnicas, sendo que a aplicação específica e o tipo de partículas determinam qual a técnica a utilizar. As técnicas principais são as seguintes: bloqueio de luz, bloqueio de poros e indutivo. [109].

5.6.8.3.1 Bloqueio de luz

Esta técnica consiste na passagem de uma amostra de óleo através de um pequeno orifício que possuí uma fonte de luz laser de um lado e, do outro lado, um sensor ótico. As partículas que interrompem o feixe de luz são contabilizadas, sendo o seu tamanho determinado tendo em conta o grau de bloqueio da luz, ver figura 5.29.

Este método não é eficaz na presença de água ou ar no óleo, uma vez que as bolhas de ar e água serão contadas como partículas [109]. Assim, estes contadores não podem ser utilizados com fluidos que contenham mais de 300 ppm de água [138].

Os contadores de partículas de bloqueio de luz são bastante utilizados devido à sua capacidade de contar partículas em uma ampla gama de tamanhos [139].

Os laboratórios de análise de óleo relatam o número real de partículas por mililitro ou por 100 ml por faixa de tamanho. Os intervalos de tamanho típico das contagens de partículas dos contadores de Bloqueio de luz são os seguintes [138]:

- $>$ 4 µm;
- $>$ 6 µm;

- $>$ 10 µm;
- $>$ 14 µm;
- $>$ 21 µm;
- $>$ 38 µm;
- $>$ 70 µm;
- $>$ 100 µm.

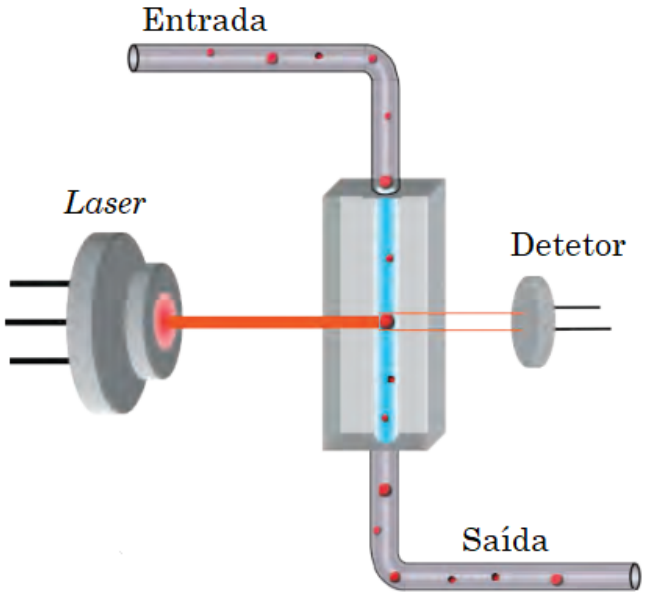


Figura 5.29: Representação esquemática do processo de funcionamento do contador de partículas por bloqueio de luz (Adaptado de [140]).

É importante observar que as partículas podem ser de desgaste, contaminantes ou uma combinação de ambos. Partículas maiores são, provavelmente, causadas por desgaste; portanto, a tendência de partículas maiores que 14 µm pode indicar a gravidade do desgaste, resultando em uma investigação mais aprofundada com ferrografia analítica [138].

5.6.8.3.2 Bloqueio de poros

Este método consiste na passagem da amostra de óleo através de um filtro de malha. Sempre que um filtro é obstruído, o fluxo de óleo diminui, ver figura 5.30. Através da queda da quantidade de fluxo, a contagem de partículas pode ser extrapolada, ver figura 5.31. Nesta técnica, as bolhas de ar e água não interferem na contagem de partículas, uma vez que não restringem o fluxo do fluido de óleo lubrificante [109].

Os contadores de bloqueio de poros, apresentam uma sensibilidade de faixa de tamanho mais estreita comparativamente com os de bloqueio de luz; no entanto, são também utilizados devido à sua capacidade para distinguir as partículas duras de outras impurezas

no óleo [139]. Assim, o bloqueio de poros pode ser utilizado para fluidos escuros, como óleos de engrenagens e motores, e contaminados com água [138].

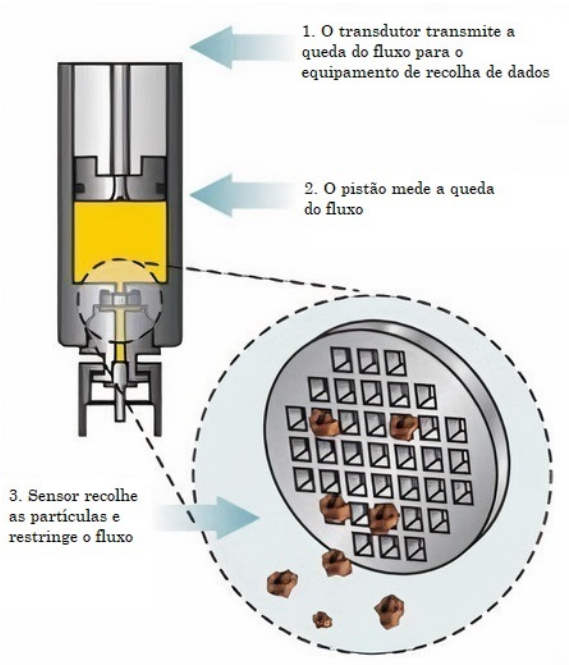


Figura 5.30: Representação esquemática do processo de funcionamento do contador de partículas por bloqueio de poros (Adaptado de [141]).

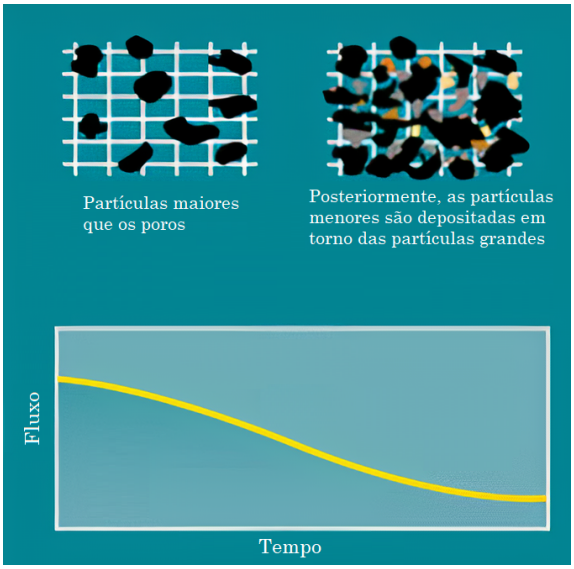


Figura 5.31: Diminuição do caudal de óleo com a obstrução do filtro (Adaptado de [141]).

5.6.8.3.3 Indutivo

Nestes contadores as partículas metálicas criam uma perturbação no campo eletromagnético do contador de partículas, sendo esta perturbação medida e a elevação do pico é

proporcional ao tamanho da partícula, ver figura 5.32 [142].

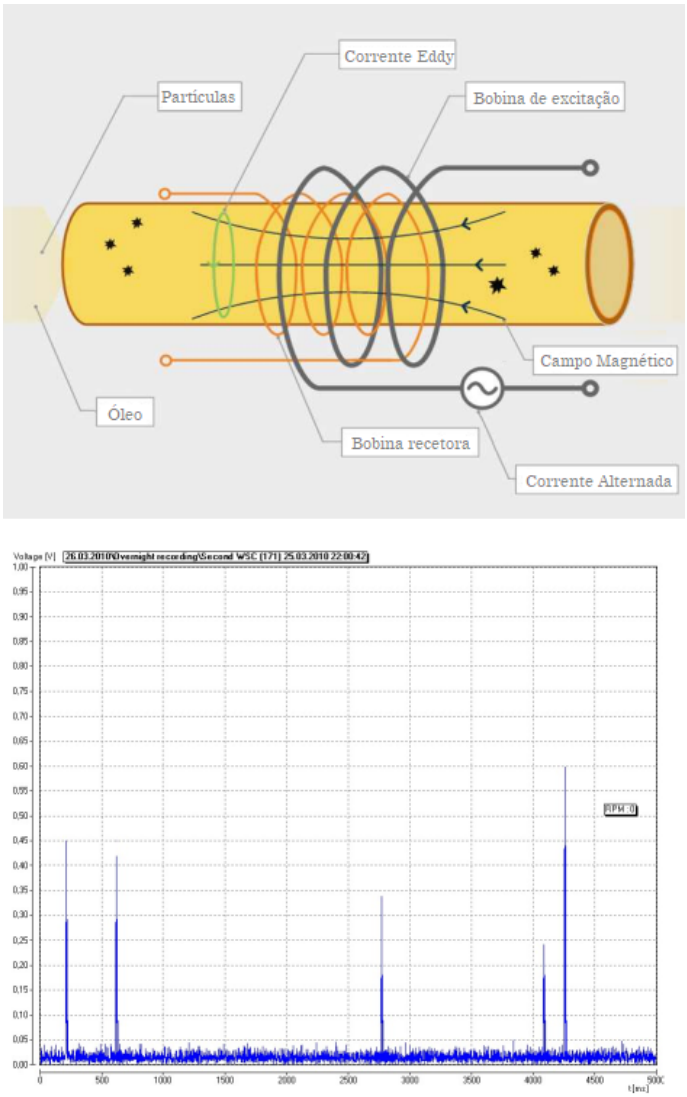


Figura 5.32: Representação esquemática do processo de funcionamento do contador de partículas indutivo (Adaptado de [142]).

Contadores de partículas com este tipo de funcionamento não detetam bolhas de ar como partículas [142].

Para simplificar a limpeza de um fluido, o código de limpeza ISO 4406 é utilizado [138]. A norma ISO 4406 reporta três códigos que caracterizam, respetivamente, o número de partículas maiores do que 4, 6 de 14 mícrons por mililitro de fluido. Na tabela 5.6 observa-se os vários códigos da norma ISO 4406 [125].

Por exemplo, se o código for 16/14/12, tendo em conta a tabela 5.6, concluiu-se que o óleo apresenta:

- entre 320 e 640 partículas/ml (diâmetro da partícula $\geq 4\,\mu m$);
- entre 80 e 160 partículas/ml (diâmetro da partícula $\geq 6\,\mu m$);

- entre 20 e 40 partículas/ml (diâmetro da partícula $\geq 14\,\mu m$).

Salienta-se que um código de limpeza típico para um óleo novo é aproximadamente 21/19/16. Este código pode variar devido ao tipo de recipiente, práticas de fabricação e condições de armazenamento [96].

Tabela 5.6: Classificação ISO 4406 [69].

Código	Número de partículas por ml	
	mais do que	até e incluindo
24	80000	160000
23	40000	80000
22	20000	40000
21	10000	20000
20	5000	10000
19	2500	5000
18	1300	2500
17	640	1300
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

5.6.8.4 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X

A espectrometria de Fluorescência de Raios-X é muito semelhante ao método espectroscopia elementar. Contudo, em vez de medir concentrações elementares usando a emissão atómica na faixa visível e ultravioleta, este método trabalha na região dos raios-X do espectro. Pelo facto de os raios-X terem uma maior energia do que a radiação eletromagnética visível e ultravioleta, permitem detetar partículas maiores do que o método de espectroscopia elementar [125].

Devido ao desenvolvimento de instrumentos que conseguem realizar esta técnica de uma forma *on-line*/*in-line* e devido ao desenvolvimento de fontes e detetores de raios-X de baixo custo, a espectrometria de Fluorescência de Raios-X tornou-se um dos métodos cada vez mais importantes na análise de desgaste [125].

Uma grande desvantagem deste método é que podem não ser contabilizadas partículas muito pequenas que emitem radiação abaixo do limite de detecção do instrumento [143].

5.6.8.5 Ferrografia analítica

Como se viu anteriormente, a espectroscopia elementar não consegue detetar partículas de desgaste com tamanho superior a 3 ou 8 mícrons, dependendo do instrumento utilizado, e apesar da contagem de partículas e a ferrografia de leitura direta conseguirem detetar partículas maiores, não conseguem qualificar a sua composição ou origem. A ferrografia analítica é capaz de identificar partículas de desgaste, a sua composição e origem, analisando-as visualmente através de um microscópio [125]. Assim, esta técnica permite determinar o seguinte [138]:

- tamanho das partículas e concentração relativa;
- partículas ferrosas e não ferrosas;
- mecanismo de desgaste indicando a sua causa raiz;
- fonte de desgaste do componente;
- identificação de contaminantes.

Esta técnica tem sido utilizada desde 1970 e pode ser dividida em dois momentos [126]:

- deposição das partículas num campo magnético (permite obter o ferrograma), ver figura 5.33;
- processar a informação obtida na fase anterior (analisar o ferrograma).

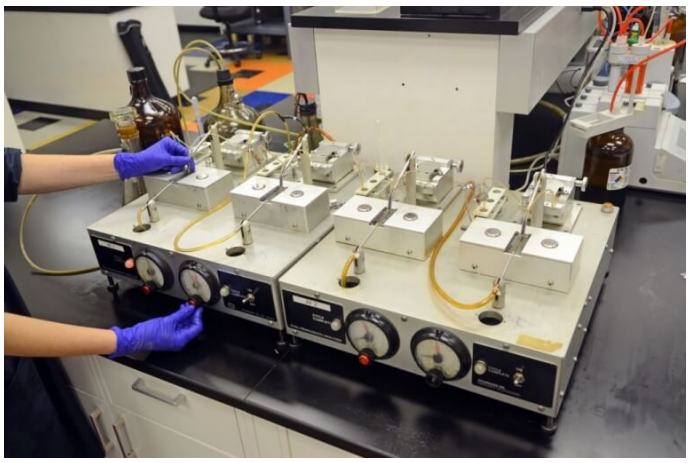


Figura 5.33: Equipamento utilizado para a obtenção do ferrograma [144].

A primeira etapa consiste em passar uma amostra de óleo ao longo de uma lâmina de vidro sobre um forte campo magnético, ver figura 5.34. As partículas ferrosas são atraídas para o íman e depositadas na lâmina em tamanho decrescente à medida que o óleo lubrificante passa [109]. Algumas partículas não ferrosas não ficam depositadas, sendo que algumas ficam depositadas aleatoriamente devido à gravidade ou pelo contato com as partículas ferrosas depositadas, ver figura 5.35 [145]. O resultado é uma lâmina microscópica com as partículas separadas por tamanho e composição, designada de ferrograma [109].

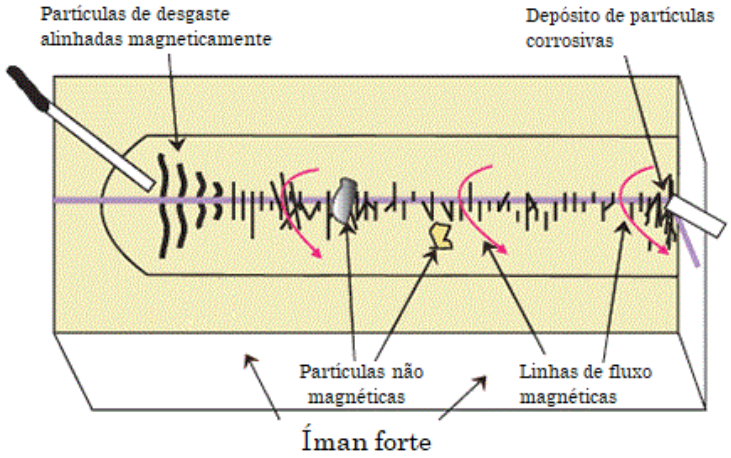


Figura 5.34: Representação esquemática do processo de funcionamento da ferrografia analítica (Adaptado de [138]).

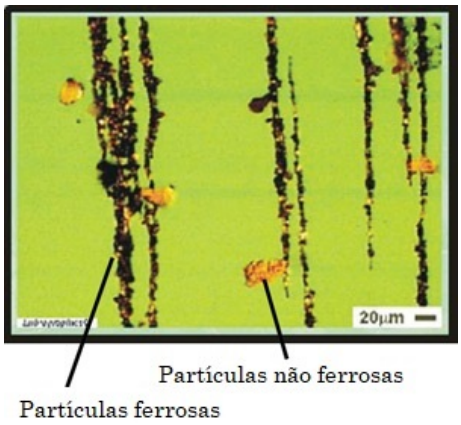


Figura 5.35: Deposição das partículas ferrosas e não ferrosas no ferrograma (Adaptado de [145]).

O exame microscópico dos ferrogramas revela informações sobre o estado do equipamento. A observação da concentração, tamanho, forma, composição e condição das partículas indica de que forma e onde foram geradas. As partículas são categorizadas com base nessas características, e podem tirar-se conclusões sobre a taxa de desgaste e a saúde da máquina [109].

Este método tem algumas limitações [125]:

- método qualitativo;
- depende do conhecimento do analista;
- método dispendioso;
- exige muito tempo para realizar o método;
- requer conhecimento detalhado: química analítica e conhecimento de falhas de máquinas.

Tendo em conta as limitações apresentadas anteriormente, a aplicação deste método torna-se impossível para análise de óleo frequentes. Contudo, pode ser utilizado quando há suspeitas de problemas de desgaste com base no resultado de outros testes, pois permite retirar mais conclusões comparativamente com os outros métodos de análise [125].

5.6.8.6 LaserNet Fines

A Lockheed Martin (empresa fabricante de produtos aeroespaciais), em cooperação com o Naval Research Laboratory (laboratório de pesquisa da Marinha dos Estados Unidos), desenvolveu a técnica LaserNet Fines em 1998, mas esta só recentemente começou a ser usado por laboratórios comerciais de análise de óleo [138]. LaserNet Fines é, assim, a técnica mais recente e promissora para análise de desgaste [125].

Esta técnica só deteta partículas maiores que 4 mícrons [126; 138]. De facto, para além de classificar a forma das partículas, também fornece uma contagem de partículas, usando técnicas de imagem a laser e *software* de processamento de imagem avançado [146].

A amostra de óleo é retirada por meio de uma célula de visualização patenteada que é retroiluminada com um díodo de laser pulsado. Como o pulso de luz dura apenas microssegundos, o movimento das partículas à medida que fluem pela célula de teste é congelado no tempo. A luz laser é transmitida através do fluido e uma imagem em silhueta das partículas gravada em uma matriz de câmara digital de um dispositivo de carga acoplada (CCD), ver imagem 5.36. Cada imagem resultante é analisada quanto à forma e estrutura das partículas, com vários milhares de imagens usadas para determinar as características das partículas suspensas e obter boas estatísticas de contagem. As concentrações são medidas para tamanhos de partículas de 4 µm a 100 µm [146].

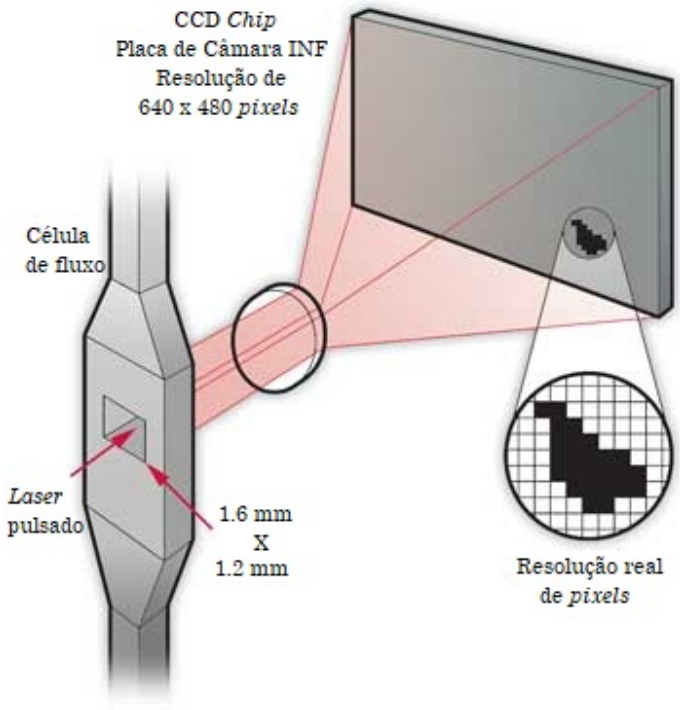
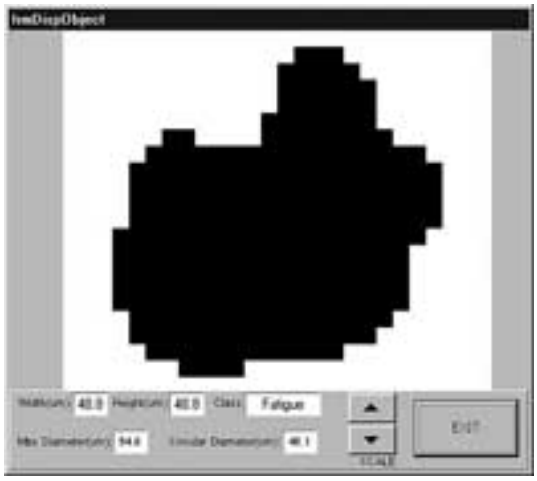


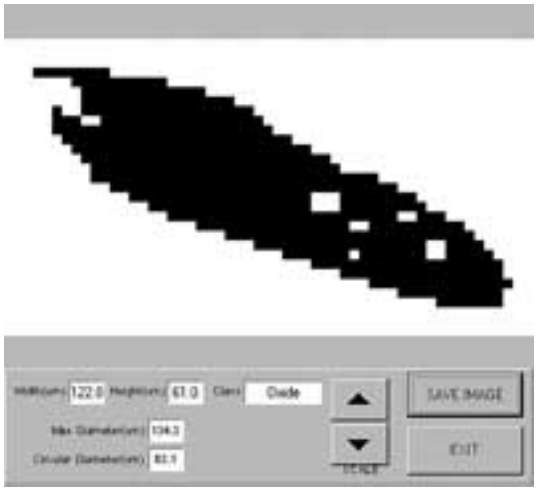
Figura 5.36: Representação esquemática do processo de funcionamento do LaserNet Fines (Adaptado de [146]).

Esta técnica também classifica as partículas em uma categoria de desgaste ou de contaminante, sendo a classificação obtida com uma rede neural artificial desenvolvida especificamente para este sistema LaserNet Fines. Uma extensa biblioteca de partículas, identificada por especialistas usando técnicas convencionais, foi usada para treinar a rede neural artificial [146].

Na figura 5.37 pode-se ver algumas categorias de classificação das partículas.



(a) Desgaste por fadiga



(b) Partíulas não ferrosas

Figura 5.37: Classificação das partículas utilizando LaserNet Fines [146].

Apesar deste método ser muito semelhante à ferrografia analítica, porque tenta categorizar as partículas com base na sua morfologia, não fica limitado às capacidades do analista, uma vez que utiliza um *software* de processamento de imagem para realizar a categorização das partículas [125].

As partículas podem ser visualizadas seletivamente com o recurso ao *software* para visualizar os tipos de partículas selecionados. Na figura 5.38 foram filtradas, para se visualizar, apenas as partículas que foram classificadas como partículas de fadiga [146].

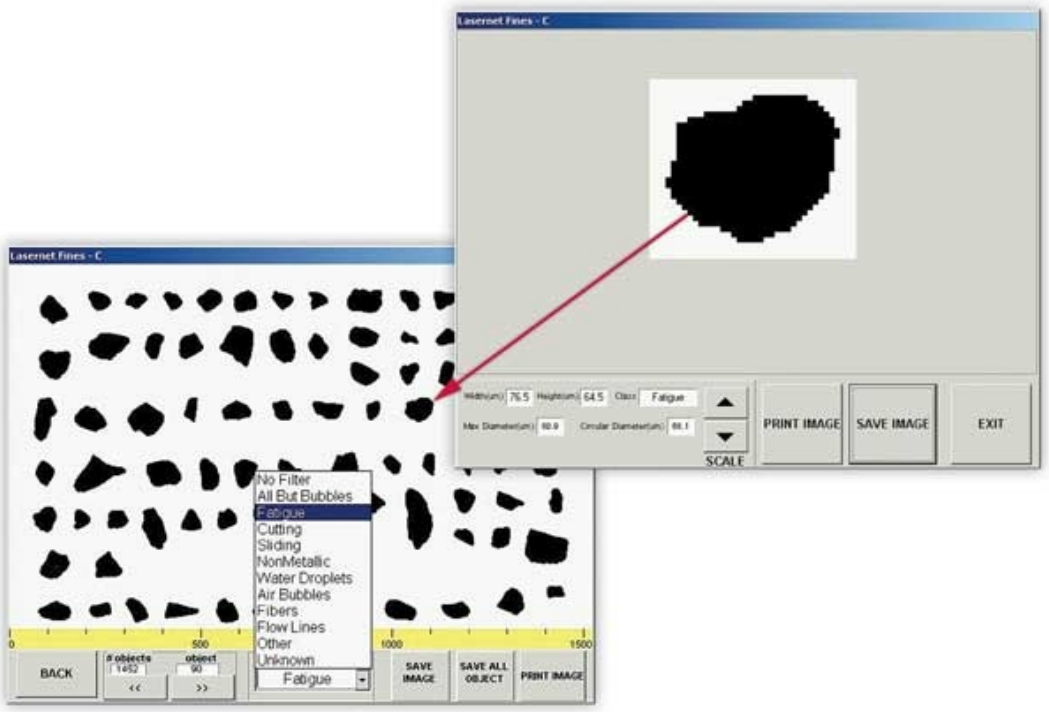


Figura 5.38: Partículas de fadiga detetadas com recurso ao LaserNet Fines (Adaptado de [146]).

5.6.9 Considerações finais sobre a monitorização de óleo nas Caixas Redutoras

O óleo de lubrificação tem sido amplamente utilizado em máquinas elétricas e mecânicas para reduzir o atrito entre as superfícies móveis. O óleo lubrificante é uma fonte importante de informações para a indicação precoce de falhas da máquina. A monitorização dos óleos pode ser realizada em três posições: *on-line*, *in-line* e *off-line*.

Os óleos lubrificantes podem ser minerais ou sintéticos, sendo que a propriedade mais importante de um lubrificante líquido é a sua viscosidade.

Nas caixas redutoras a lubrificação pode ocorrer por salpico ou por circulação forçada. A lubrificação por circulação forçada também é designada por lubrificação por injeção. Na lubrificação por injeção a caixa redutora pode apresentar cárter seco ou húmido.

As técnicas de análise de óleo lubrificante incluem análises de propriedades físicas do fluido, mas também incluem análises de detritos de desgaste e contaminação de fluidos, nomeadamente humidade, partículas metálicas e ar. As análises de propriedade físicas e contaminação do fluido são usadas para analisar a condição do óleo de forma a determinar se o próprio óleo se deteriorou de tal modo que não é mais adequado para cumprir a sua função primária de reduzir o atrito e prevenir o desgaste. A análise de detritos de desgaste é uma técnica que tem sido usada para monitorizar a condição operacional de uma máquina, uma vez que as peças/sistemas lubrificados contaminam o lubrificante com os materiais provenientes do seu desgaste, porque por muito correta que seja a lubrificação da máquina, mais tarde ou mais cedo, um componente começará a mostrar sinais de desgaste. Analisar a natureza das partículas permite identificar a origem, sendo importante para identificar

qual o componente da máquina que apresenta problemas. Existem quatro mecanismos de desgaste: desgaste adesivo, desgaste abrasivo, desgaste por fadiga e desgaste corrosivo.

Os danos provocados pelas partículas dependem do tamanho das partículas em relação às folgas entre as superfícies de contacto, sendo que o estudo das dimensões das partículas permite identificar os diferentes níveis de desgaste dos componentes.

Existem vários métodos que podem ser utilizados para monitorizar e analisar o desgaste: espectroscopia elementar, densidade ferrosa (ferrografia de leitura direta), contagem de partículas, espectrometria de fluorescência de Raios-X, ferrografia analítica e LaserNet Fines.

5.7 Conclusões

A monitorização da condição permite aumentar a fiabilidade da operação, tempo de operação da máquina, redução de danos consequentes e melhoria da eficiência operacional a um custo operacional mais baixo. A monitorização da condição desempenha um papel fundamental na manutenção baseada na condição.

Este tipo de monitorização consegue detetar e diagnosticar falhas nas máquinas, e prevê a condição futura das máquinas durante a operação.

A monitorização da condição realiza-se através da análise de determinados parâmetros, tais como: temperatura, ruído, vibração e óleo. Assim, existem quatro técnicas principais de monitorização da condição: termografia infravermelha, análise acústica, análise de vibração e análise de óleo.

Capítulo 6

Caso de estudo

6.1 Introdução

O fornecimento de energia mecânica à maioria dos sistemas de produção, é realizado, geralmente, sob a forma de um binário motor e de um movimento de rotação (velocidade angular), isto é a potência. A potência é o produto do binário motor e da velocidade angular. O acionamento dos sistemas de produção pode ser realizado por intermédio de diferentes tipos de máquinas motrizes (motores elétricos, de combustão interna, turbomáquinas), sendo, frequentemente, necessário intercalar entre a máquina motriz e o sistema de produção uma transmissão mecânica. A transmissão mecânica é responsável por modificar as características dinâmicas da energia motriz disponibilizada, para obter as forças e os movimentos necessários à efetivação das operações requeridas nos diferentes processos de transformação dos produtos [147].

No capítulo 3 verificou-se que o processo produtivo do pneu é constituído por várias etapas. A etapa onde este estudo é realizado é na misturação, logo o sistema de produção em análise é o misturador. Como se viu, anteriormente, o misturador pode ter um ou dois andares de misturação, sendo que cada andar de misturação é acionado por um motor, sendo necessário intercalar uma transmissão mecânica pelos motivos apresentados no início deste capítulo. A transmissão mecânica é realizada graças à caixa redutora, sendo este o equipamento alvo do estudo realizado.

De seguida, descrever-se-á o equipamento em estudo e a sua respetiva importância no processo produtivo.

6.2 Descrição do problema

6.2.1 Descrição da caixa redutora

A Continental Mabor possuí 12 linhas de misturação, e o estudo irá-se centrar na linha número 12. Esta linha de misturação possui um misturador *Tandem*, logo dois andares de misturação, e, consequentemente, duas caixas redutoras, ver figura 6.1.

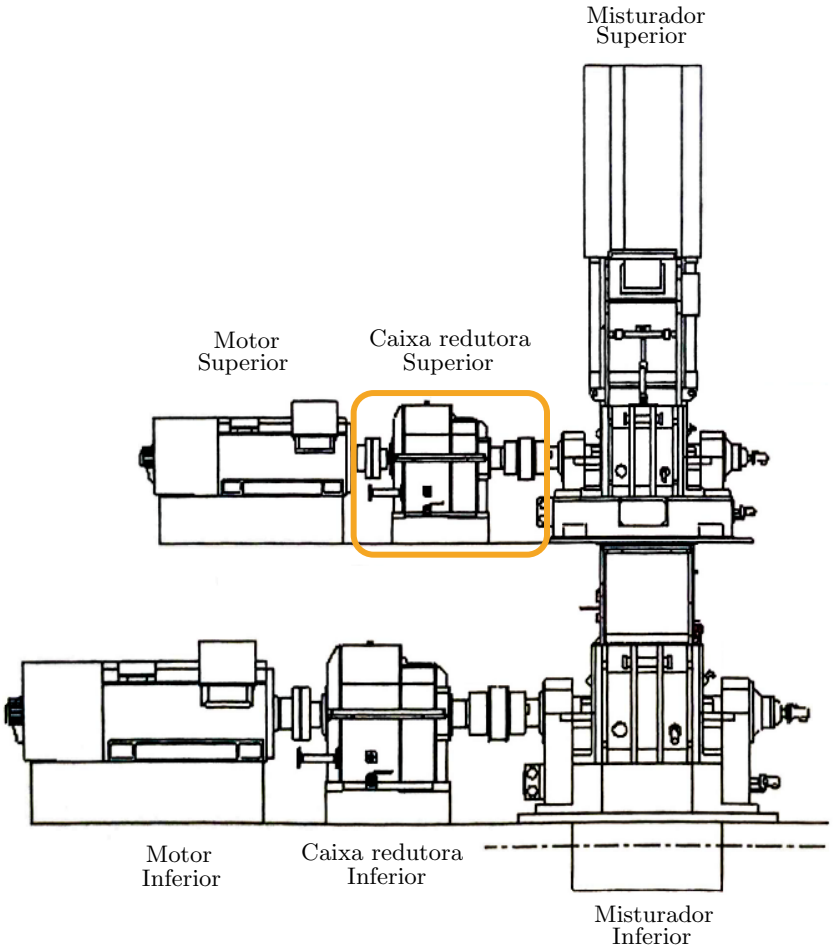


Figura 6.1: Representação esquemática do misturador *Tandem* e os respetivos sistemas de ativação (Adaptado de [148]).

A caixa redutora em estudo é a do andar superior, que está delineada pela cor laranja na figura 6.1. Na imagem 6.2 é possível observar uma fotografia da caixa redutora em análise. Salienta-se que a análise realizada neste capítulo será semelhante para a caixa redutora do andar inferior.

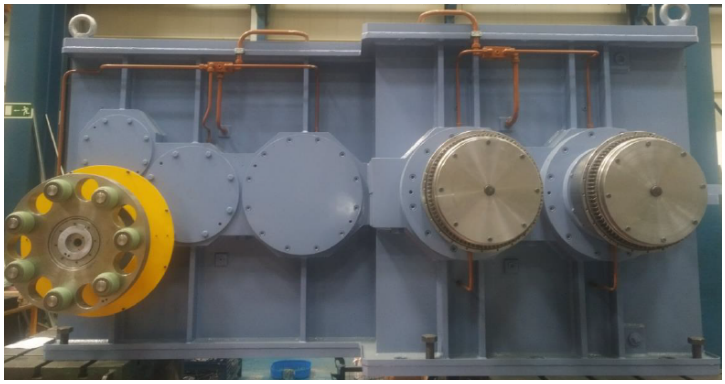


Figura 6.2: Caixa redutora do andar superior da linha de misturação número 12.

A caixa redutora é necessária no sistema produtivo para provocar uma diminuição da

velocidade e consequente aumento do binário, tendo em consideração uma determinada potência de entrada proveniente do motor. O acionamento da caixa redutora é realizado por intermédio de um motor elétrico, cuja potência é 3032 kW.

De seguida, é caracterizada a caixa redutora relativamente aos seus componentes constituintes. A tabela 6.1 apresenta os diferentes componentes da caixa redutora e os respetivos códigos que permitem identificar os componentes nas figuras 6.3 e 6.4.

Tabela 6.1: Caracterização genérica dos componentes da caixa redutora.

COMPONENTE	TIPO DE COMPONENTE	CÓDIGO	MATERIAL	QUANTIDADE
1 Rolamento	1 rolamento de rolos esféricos	1.1	-	8
	2 rolamento de rolos cilíndricos	1.2	-	2
	3 rolamento de esferas de 4 pontos de contacto	1.3	-	1
2 Engrenagem	engrenagem de dentado helicoidal	2	F-158	4
3 Veio	1 veio de saída	3.1	42CrMo4	2
	2 veio pinhão	3.2	F-158	2
	3 veio pinhão de entrada	3.3	F-158	1
4 Vedante	vedante de lábio	4	-	2
5 Carcaça	-	5	S275JR	2
6 Chaveta	chaveta paralela	6	F-125-T	5
7 Parafusos partição	parafuso de cabeça hexagonal	7	C	14
8 Válvula de drenagem	-	8	-	1

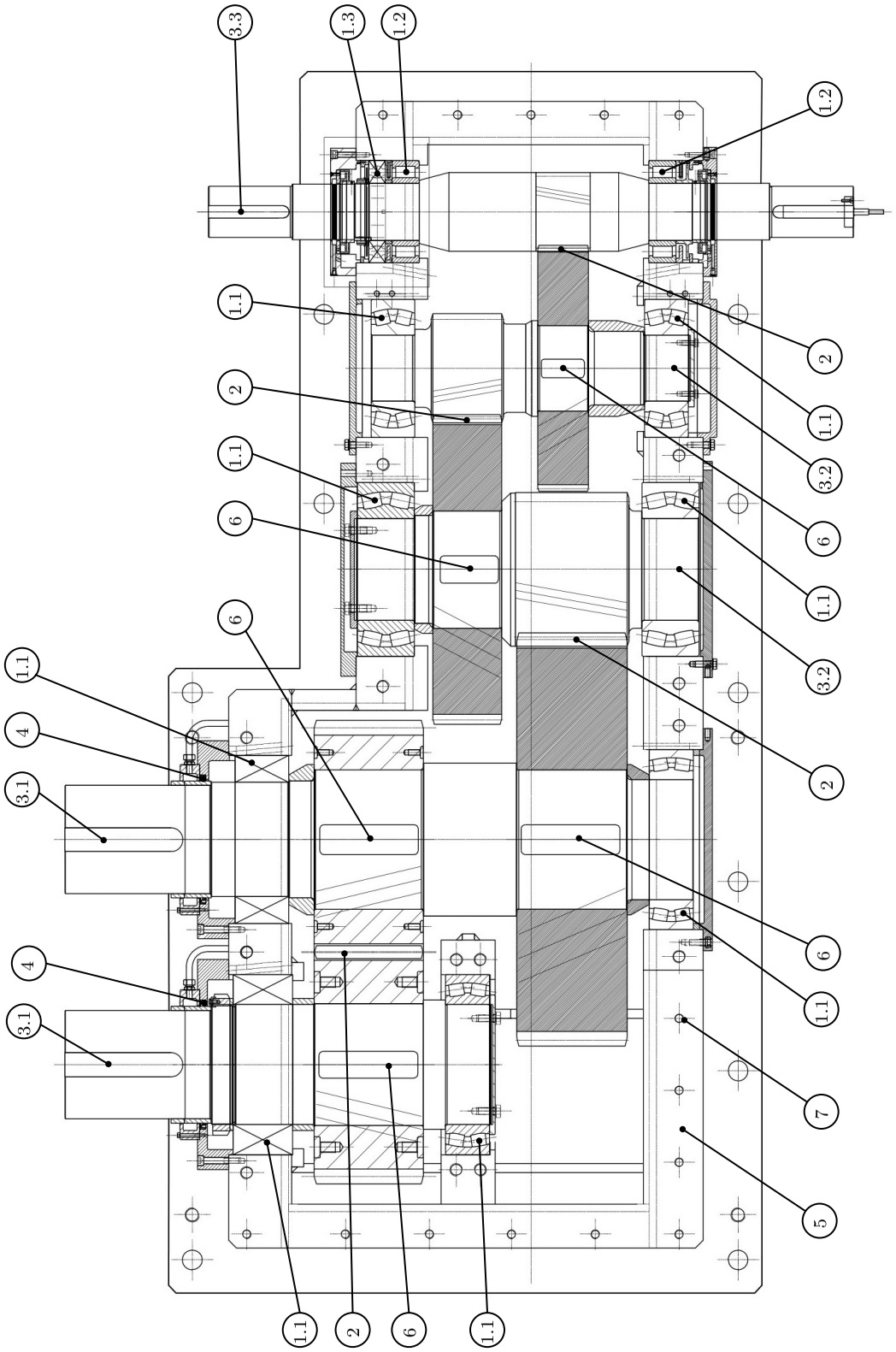


Figura 6.3: Vista do corte da caixa redutora superior pelo plano de partição (Adaptado de [149]).

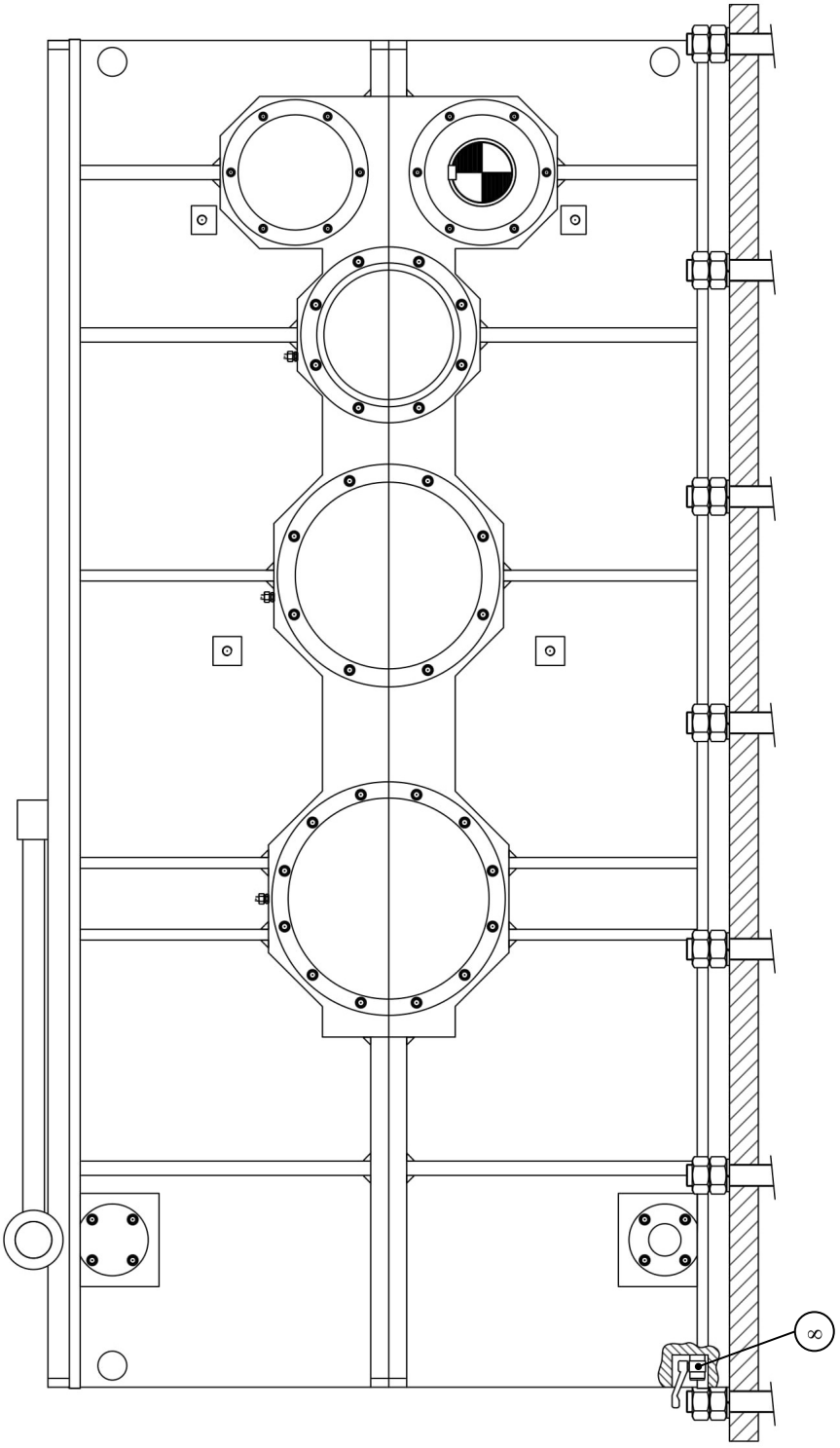


Figura 6.4: Vista frontal da caixa redutora superior (Adaptado de [149]).

Tendo em conta a tabela 6.1 e as figuras 6.3 e 6.4, pode concluir-se que a caixa em análise é constituída por um total de 4 engrenagens de eixos paralelos de dentado helicoidal, 2 vedantes de lábio e 5 veios, sendo 2 veios de saída, 2 veios intermédios (veio pinhão) e 1 veio de entrada. Salienta-se que as rodas dentadas de pequenos números de dentes são talhadas diretamente no veio (veio pinhão), enquanto que as restantes rodas dentadas são ligadas, em rotação, aos veios através da interposição de chavetas paralelas, existindo um total de 5 chavetas. O posicionamento axial de algumas rodas dentadas é assegurado com o recurso a casquilhos espaçadores montados nos veios. Para além disso, possui 11 rolamentos, sendo 8 rolamentos de rolos esféricos, 2 rolamentos de rolos cilíndricos e 1 rolamento de esferas de 4 pontos de contacto, os rolamentos estão alojados e posicionados axialmente em furos existentes. Cada um dos veios é apoiado em dois rolamentos de rolos esféricos, à exceção do eixo de entrada, que é apoiado em dois rolamentos de rolos cilíndricos e um 1 rolamento de esferas de 4 pontos de contacto. No eixo de entrada colocaram-se três rolamentos, uma vez que os rolamentos de rolos cilíndricos não dão posicionamento. O rolamento de esferas de 4 pontos de contacto dá um alinhamento muito particular, porque sendo de 4 pontos de contacto tem que estar perfeitamente alinhado em relação à estrutura da máquina e obriga que todos os componentes fiquem alinhados com o rolamento. É um componente com uma rigidez muito elevada, devido a folgas internas pequenas.

A estrutura exterior da caixa redutora é em aço e pode dividir-se em duas carcaças, a superior e a inferior, cuja ligação entre ambas é realizada com parafusos de cabeça hexagonal (existem 14 parafusos). Por último, a caixa redutora ainda possui uma válvula que permite a drenagem do óleo que fica no fundo da caixa.

Os respetivos acoplamentos (acoplamento caixa redutora/misturador e acoplamento caixa redutora/motor) serão também tidos em conta na análise realizada, uma vez que os acoplamentos fazem parte da transmissão mecânica, sendo considerados componentes da mesma. Uma vez que existem dois veios de saída, existem dois acoplamentos entre a caixa redutora e o misturador. Esses acoplamentos são acoplamentos limitadores de binário, que através do ajustamento da pressão hidráulica conseguem ajustar o binário de saída para o valor pretendido. Por sua vez, o acoplamento entre a caixa redutora e o motor é um acoplamento de engrenagem com elevada taxa de transferência de binário, que compensa o desalinhamento angular, radial e axial.

Nesta caixa redutora como se necessita de grandes razões de transmissão (i= 30.96), recorre-se a três andares de redução, de modo a que a razão de transmissão total seja obtida através do produto das razões dos diferentes andares. Para melhor se identificar o número de andares de redução, é apresentado de seguida o diagrama de transmissão de potência, ver figura 6.5.

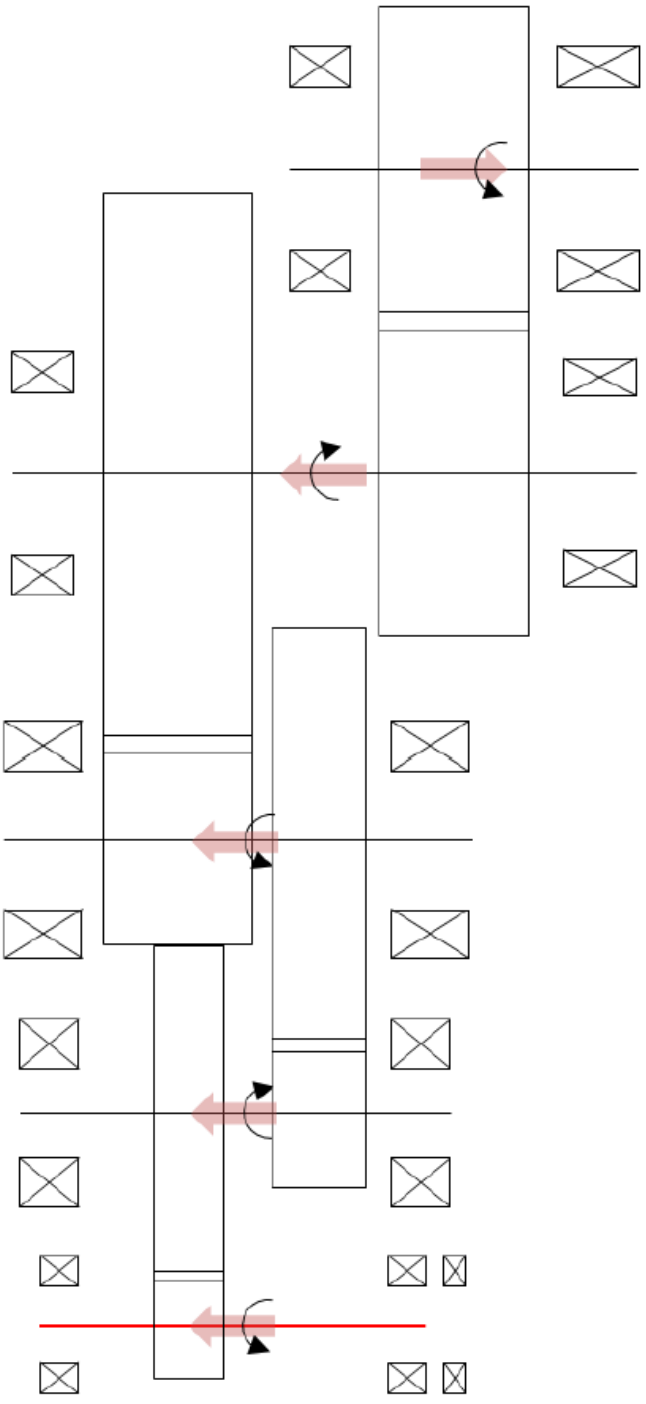


Figura 6.5: Diagrama de transmissão de potência da caixa redutora (Adaptado de [149]).

Para realizar uma correta lubrificação da caixa redutora são necessários 1300 litros de óleo lubrificante, um caudal de óleo de 180 l/min e a viscosidade do óleo deve ser ISO VG-320. Relativamente à natureza do óleo lubrificante, a caixa está adaptada para trabalhar com óleos sintéticos e minerais, sendo que atualmente a Continental utiliza óleos sintéticos para as caixas redutoras. A Continental Mabor utiliza óleos da marca SHELL para as caixas redutoras, tendo em conta a tabela 6.2, o óleo utilizado é OMALA OILS HD 320. Atualmente este óleo é designado por Omala S4 GX 320 [150]. Os dados técnicos deste óleo lubrificante são apresentados no anexo A. Esta caixa redutora apresenta uma lubrificação mista, uma vez que é lubrificada por injeção sendo de cárter húmido, mas também apresenta lubrificação por salpico, conforme se verifica na imagem 6.6.

Uma característica desta caixa redutora que irá afetar a análise realizada, é o facto de não ser *standard*, ou seja, foi projetada e construída tendo em conta os requisitos da Continental. Os requisitos estão, essencialmente, relacionados com o espaço disponível na fábrica para a colocação da caixa redutora. O facto da caixa redutora não ser *standard* significa que caso seja necessário substituir um componente, é necessário falar com o fornecedor para produzir o componente específico. Os rolamentos e os vedantes são os únicos componentes que podem ser adquiridos do catálogo do fornecedor, uma vez que são componentes *standard*.

Tabela 6.2: Lubrificantes utilizados nas caixas redutoras da GUIBE (Adaptado de [149]).

Lubricantes Lubricants	Viscosidad/Viscosity ISO-VG[1] DIN51519 a 40ºC mm^2/s (cSt)	Apox. a 50ºC mm^2/s (cSt)	ºE a 50ºC aprox.	B.P.	CEPSA	ESSO	FUCHS	KLÜBER	MOBIL	REPSOL	SHELL	VERKOL
Aceite Mineral Mineral Oil	VG 680	360	38-45	ENERGOL GR-XP 680	ENGRANAJES HP – 680	SPARTAN EP - 680	RENOLIN CLP – 680	KLUBEROIL GEM 1 – 680 N	MOBILGEAR 636	SUPER TAURO ISO 680	OMALA OIL ISO VG 680	COMPOUND E/6 ISO-680
	VG 460	251	29-33	ENERGOL GR-XP 460	ENGRANAJES HP – 460	SPARTAN EP - 460	RENOLIN CLP – 460	KLUBEROIL GEM 1 – 460 N	MOBILGEAR 634	SUPER TAURO ISO 460	OMALA OIL ISO VG 460	COMPOUND E/5 ISO-460
	VG 320	180	20-23	ENERGOL GR-XP 320	ENGRANAJES HP – 320	SPARTAN EP - 320	RENOLIN CLP – 320	KLUBEROIL GEM 1 – 320 N	MOBILGEAR 632	SUPER TAURO ISO 320	OMALA OIL ISO VG 320	COMPOUND E/4 ISO-320
	VG 220	126	14-18	ENERGOL GR-XP 220	ENGRANAJES HP – 220	SPARTAN EP - 220	RENOLIN CLP – 220	KLUBEROIL GEM 1 – 220 N	MOBILGEAR 630	SUPER TAURO ISO 220	OMALA OIL ISO VG 220	COMPOUND E/3 ISO-220
	VG 150	89	11-13	ENERGOL GR-XP 150	ENGRANAJES HP – 150	SPARTAN EP - 150	RENOLIN CLP – 150	KLUBEROIL GEM 1 – 150 N	MOBILGEAR 629	SUPER TAURO ISO 150	OMALA OIL ISO VG 150	COMPOUND E/2 ISO-150
	VG 100	61	6,5-8	ENERGOL GR-XP 100	ENGRANAJES HP – 100	SPARTAN EP - 100	RENOLIN CLP – 100	KLUBEROIL GEM 1 – 100 N	MOBILGEAR 627	SUPER TAURO ISO 100	OMALA OIL ISO VG 100	COMPOUND E/1 ISO-100
	VG 68	42	4-6	ENERGOL GR-XP 68	ENGRANAJES HP - 68	SPARTAN EP - 68	RENOLIN CLP – 68	KLUBEROIL GEM 1 – 68 N	MOBILGEAR 626	SUPER TAURO ISO 68	OMALA OIL ISO VG 68	COMPOUND E/0 ISO-68
Aceites sintéticos de polialfaolefinas (PAO) Poly-alpha-olefin (PAO) synthetic oils	VG 680	360	38-45	ENERSYNT HTX-680	ENGRANAJES HPX 680	-	RENOLIN UNYSYN CLP - 680	KLUBERSYNT EG 4 - 680	MOBILGEAR SHC 680	SUPER TAURO SINTETICO 680	OMALA OILS HD 680	-
	VG 460	251	29-33	ENERSYNT HTX-460	ENGRANAJES HPX 460	-	RENOLIN UNYSYN CLP – 460	KLUBERSYNT EG 4 - 460	MOBILGEAR SHC 460	SUPER TAURO SINTETICO 460	OMALA OILS HD 460	CORVUS 460 EP
	VG 320	180	20-23	ENERSYNT HTX-320	ENGRANAJES HPX 320	SPARTAN SYNTETIC 320	RENOLIN UNYSYN CLP – 320	KLUBERSYNT EG 4 - 320	MOBILGEAR SHC 320	SUPER TAURO SINTETICO 320	OMALA OILS HD 320	CORVUS 320 EP
	VG 220	126	14-18	ENERSYNT HTX-220	ENGRANAJES HPX 220	SPARTAN SYNTETIC 220	RENOLIN UNYSYN CLP – 220	KLUBERSYNT EG 4 – 220	MOBILGEAR SHC 220	SUPER TAURO SINTETICO 220	OMALA OILS HD 220	CORVUS 220 EP
	VG 150	89	11-13	ENERSYNT HTX-150	ENGRANAJES HPX 150	SPARTAN SYNTETIC 150	RENOLIN UNYSYN CLP – 150	KLUBERSYNT EG 4 - 150	MOBILGEAR SHC 150	SUPER TAURO SINTETICO 150	OMALA OILS HD 150	CORVUS 150 EP
	VG 100	61	6,5-8	-	-	-	RENOLIN UNYSYN CLP – 100	-	-	SUPER TAURO SINTETICO 100	OMALA OILS HD 100	-
	VG 68	42	4-6	-	ENGRANAJES HPX 68	-	RENOLIN UNYSYN CLP - 68	-	MOBIL SHC 626	-	OMALA OILS HD 68	-
Grasa para engranajes Grease for gears	**Clasificación DIN 51502** GP 00E-20			ENERGREASE LS-EP-00	ARGA EP 400	-	RENOLIT EP 00	MICROLUBE GB 00	MOBILUX EP 004	IBERFARM 88	ALVANIA GREASE EP-00	VERKOL EPX-00
Grasa para rodamientos Grease for bearings	**Consistencia NLGI** KP3 K-20			ENERGREASE LS-EP 2	ARGA EP-3	BEACON EP 3	RENOLIT EP 3	CENTOPLEX 3	MOBILUX EP 3	LITICA EP - 3	ALVANIA GREASE RL3	VERKOFARM

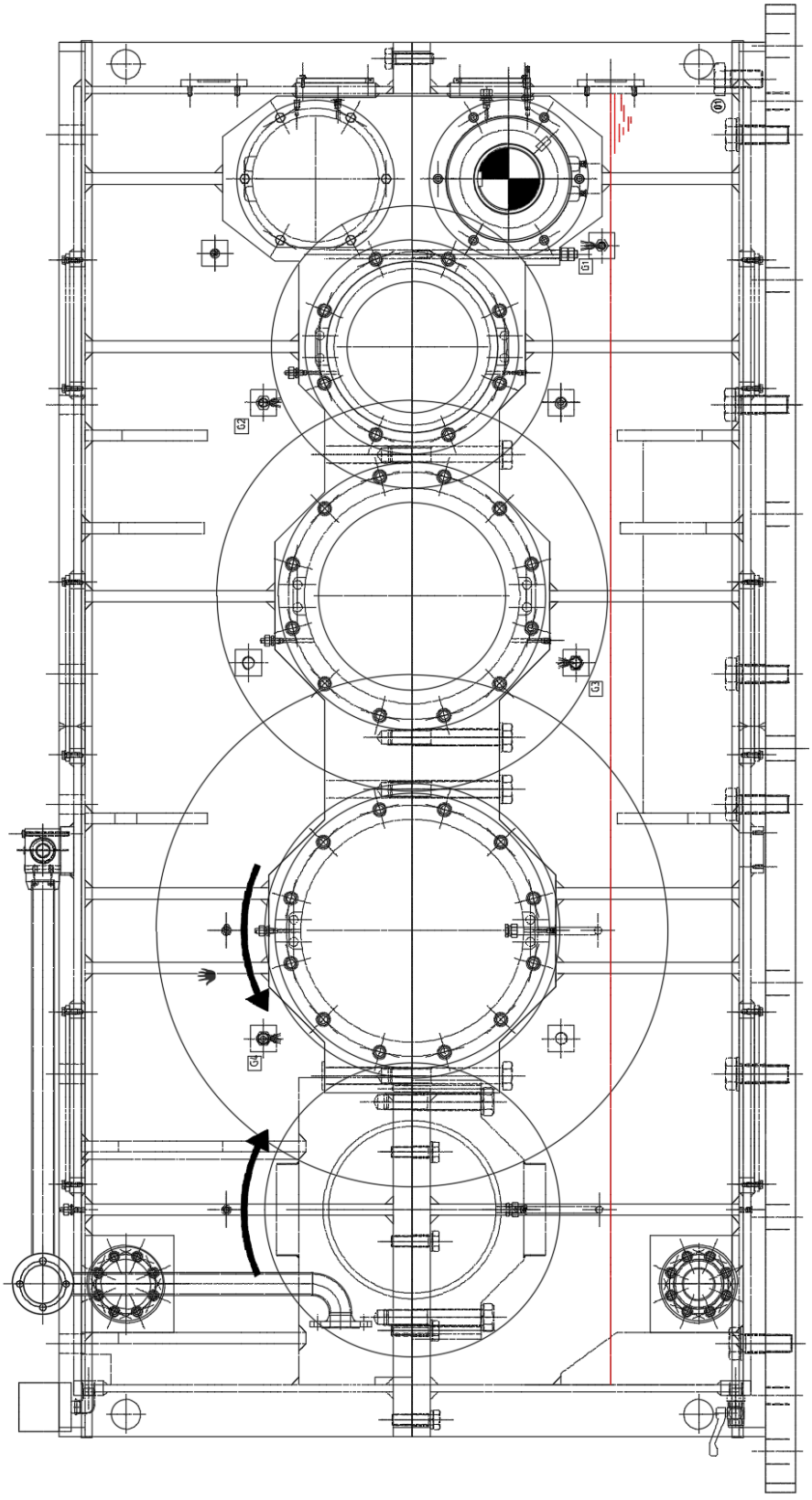


Figura 6.6: Nível de óleo na caixa redutora (Adaptado de [149]).

6.2.2 Descrição do sistema de lubrificação da caixa redutora

O sistema de lubrificação da caixa redutora consiste numa unidade de lubrificação, cujo desenho técnico está apresentado no anexo C. Na figura 6.7 é possível ver uma fotografia da unidade de lubrificação. Esta unidade de lubrificação é constituída por vários equipamentos, que estão devidamente identificados na figura 6.8. Na tabela 6.3 é apresentado a designação dos respetivos equipamentos.



Figura 6.7: Unidade de lubrificação da caixa redutora.

Os componentes 1 e 23 referem-se a mangas elásticas e a sua função é estabelecer a ligação entre a caixa redutora e a unidade de lubrificação. O componente 2 é uma válvula borboleta com fim de curso. Esta válvula é atuada pelos sensores de temperatura PT100 1 e 2, que existem na caixa redutora, na zona dos rolamentos de rolos cilíndricos do veio de entrada, ver figura 6.9. Acima dos 40°C os sensores atuam a válvula 2 e ligam a bomba de recirculação. O componente 3 é o motor que está acoplado a uma bomba, componente número 4, que tem uma válvula de segurança regulada a 16 bar. Assim, a pressão máxima à saída da bomba é 16 bar. Se a pressão com a bomba em funcionamento for superior a 16 bar, a válvula de segurança abre e deixa escapar para o reservatório o óleo necessário para que a pressão baixe até aos 16 bar. Esta válvula de segurança funciona como válvula limitadora de pressão. A grande diferença desta válvula para uma limitadora de pressão, é que enquanto que na limitadora de pressão pode regular-se para a pressão desejada, na válvula de segurança a pressão é definida previamente pela fabricante. O caudal à saída da bomba é 180 l/min. O componente 5 é uma válvula de retenção que impede que haja retorno de óleo. O número 6 é um manómetro e o número 7 representa uma válvula de esfera.

Depois de sair da bomba o óleo passa por uma unidade de filtros de pressão, identificada pelo número 8. Existem dois filtros, mas só um deles é que fica ativo. A ideia é que se o filtro ativo ficar colmatado, faz-se o óleo passar pelo outro filtro, enquanto se consegue proceder à limpeza/substituição do filtro colmatado sem parar o circuito de lubrificação. À saída da unidade de filtros existe mais um manómetro, componente número 25. A função deste manómetro é monitorizar o filtro, verificando se este está ou não a ficar colmatado. Se o filtro começar a ficar colmatado, o óleo não consegue passar através do filtro e verifica-se uma queda de pressão acentuada.

A pressão de circuito é de 2 a 6 bar, sendo definida pela válvula limitadora de pressão número 24. Por exemplo, se esta válvula estiver regulada para 4 bar, significa que se a pressão à saída da unidade de filtros estiver acima de 4 bar, a válvula abre, vai alguma quantidade de óleo para o reservatório, de forma a pressão se manter nos 4 bar, e o restante segue no circuito com uma pressão de 4 bar. No caso prático em estudo a válvula está regulada para 5.2 bar.

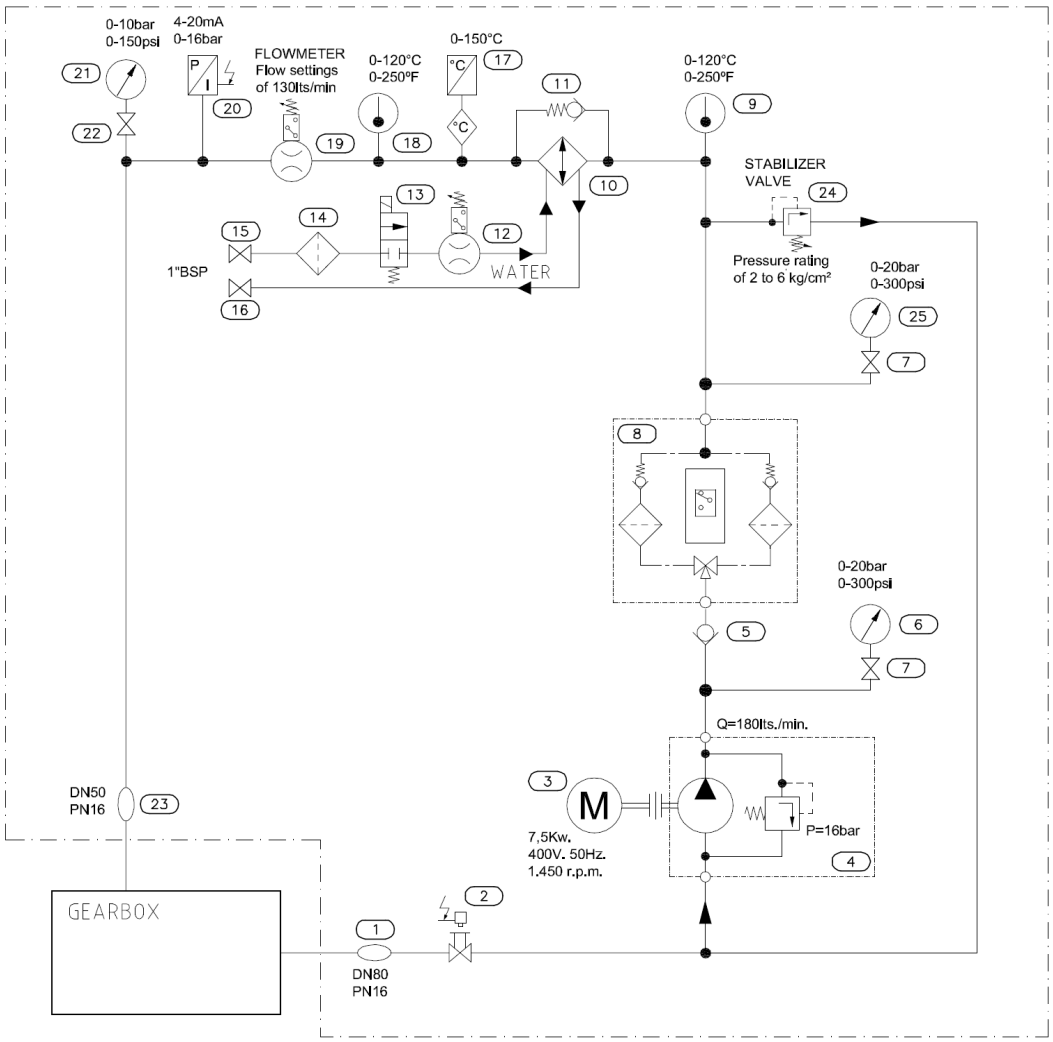
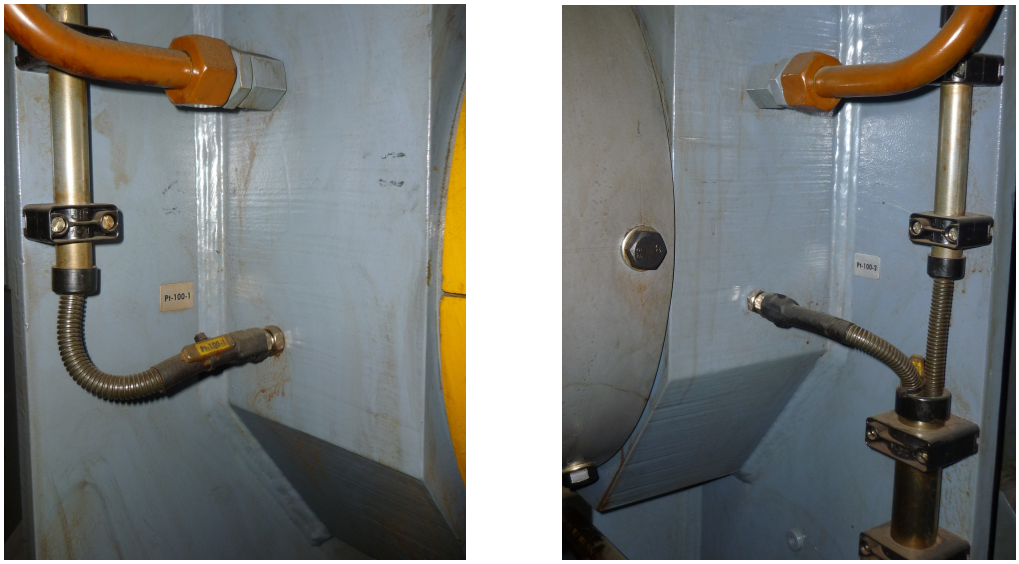


Figura 6.8: Sistema de lubrificação da caixa redutora, com a identificação da posição dos componentes constituintes (Adaptado de [149]).

Tabela 6.3: Equipamentos da unidade de lubrificação da caixa redutora.

Posição	Componente
1	Manga elástica ∅80 PN10/16
2	Válvula borboleta com fim de curso
3	Motor elétrico
4	Bomba (Q=180 l/min)
5	Válvula de retenção
6	Manómetro, 0-20 bar
7	Válvula de esfera
8	Filtro de pressão duplo
9	Termómetro, 0-120°C
10	Permutador de calor água/óleo
11	Válvula de retenção com mola
12	Caudalímetro água
13	Válvula direcional
14	Filtro
15	Válvula de esfera
16	Válvula de esfera
17	Sensor de temperatura, 4-20 mA, 0-150°C
18	Termómetro, 0-120°C
19	Caudalímetro óleo
20	transdutor de pressão, 4-20 mA, 0-16 bar
21	Manómetro, 0-10 bar
22	Válvula de esfera
23	Manga elástica ∅50 PN10/16
24	Válvula limitadora de pressão, pressão de 2 a 6 bar
25	Manómetro, 0-20 bar



(a) Pt-100-1 (b) Pt-100-2

Figura 6.9: Sensores de temperatura que ativam a válvula 2.

O componente número 9 é um termómetro, que mede a temperatura do óleo antes de este passar pelo permutador de calor, componente número 10. O componente número 11 é uma válvula de retenção com mola, cuja função é permitir que o circuito continue a funcionar no caso de ocorrer uma avaria no permutador de calor. Posteriormente, explicar-se-á o circuito de água utilizado para arrefecimento do óleo. Os componentes 15 e 16 são válvulas de esfera e o número 14 é um filtro que tem como função filtrar a água antes de esta entrar no permutador. O componente 13 é uma válvula direcional 2/2 ativada eletricamente e retorno por mola, que só é ativada quando for necessário arrefecer o óleo. O componente 17 é um sensor de temperatura que mede a temperatura do óleo à saída do permutador de calor, e quando atinge 55°C, envia um sinal elétrico que faz atuar a válvula 13. Ao atuar a válvula 13 a água passa pelo permutador e arrefece o óleo, logo a temperatura medida no componente 17 irá ser menor e o transdutor de temperatura deixa de enviar um sinal elétrico, deixando de ativar à válvula 13, logo deixa de passar água no permutador e o óleo deixa de ser arrefecido. Se a temperatura do óleo tornar a aumentar, todo este processo de arrefecimento torna a acontecer.

Os componentes 12 e 19 são caudalímetros, que medem o caudal de água e de óleo, respetivamente. Fornecem um sinal elétrico para saber qual é o caudal de água e de óleo. No caso da água, se a válvula 13 estiver ativada e não houver caudal, pode significar que o filtro está entupido. No caso do óleo, é importante garantir que temos um caudal a regressar à caixa redutora igual ao que saiu (180 l/min), para manter um nível de óleo constante na caixa redutora. Se o caudal detetado no componente 19 for inferior ao que saiu da caixa, significa que a caixa está a esvaziar, e, se continuar, pode não se ter óleo suficiente para garantir a correta lubrificação da caixa redutora.

O componente 20 é um transdutor de pressão, que envia um sinal elétrico para se saber qual é o valor da pressão. O componente 18 é um termómetro que permite verificar se o permutador está a funcionar e o componente 22 é mais uma válvula de esfera à qual se liga o componente 21, um manómetro, para saber qual é a pressão do óleo à entrada da caixa redutora. Os valores da pressão e da temperatura medidos através dos equipamentos 17 e 20, respetivamente, podem ser visualizados pelos funcionários e/ou pessoal da manutenção, num painel que existe próximo da linha de produção, ver figura 6.10.

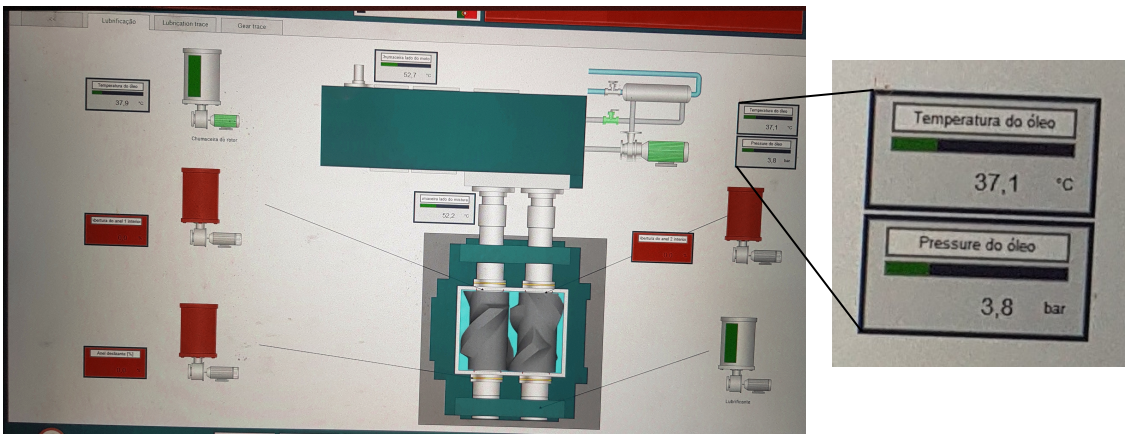


Figura 6.10: Painel onde são apresentados alguns valores medidos através de transdutores, nomeadamente o valor da pressão e da temperatura do óleo à entrada da caixa redutora.

6.3 Análise FMECA

6.3.1 Construção das tabelas

Inicialmente, elaboram-se as tabelas que irão permitir preencher o índice de severidade, ocorrência e deteção das falhas. Posteriormente, será necessário identificar os diferentes componentes das caixas redutoras, as respetivas funções, e estabelecer os diferentes modos de falha, efeitos potenciais da falha, controlos atuais e ações recomendadas, elaborando assim os formulários FMECA para cada um dos componentes.

6.3.1.1 Severidade dos efeitos do modo de falha

A escala de gravidade deve ser gerada de acordo com a indústria e as necessidades da empresa, sendo estabelecidas três tabelas de severidade, para cada um dos departamentos:

- tabela 6.4: Ambiente;
- tabela 6.5: Segurança;
- tabela 6.6: Economia.

As tabelas 6.4, 6.5 e 6.6 vão permitir estabelecer a severidade do efeito de um modo potencial de falha, sendo que é escolhido o maior índice dos três índices de severidade.

Tabela 6.4: Classificação da severidade do efeito do modo de falha em termos ambientais.

Efeito	Critério: Alcance do impacto ambiental	Índice
Consequências muito Graves	O impacto ambiental ultrapassa limites da empresa, atingindo as zonas envolventes	5
Consequências Graves	O impacto ambiental ocorre dentro dos limites da empresa	4
Consequências Moderadas	O impacto ambiental ocorre ao nível da secção	3
Consequências Pequenas	O impacto ambiental ocorre localmente	2
Nenhuma consequência	De acordo com as normas ambientais, sem qualquer impacto ambiental	1

Tabela 6.5: Classificação da severidade do efeito do modo de falha em termos de segurança.

Efeito	Critério: Severidade dos ferimentos	Índice
Consequências muito Graves	Ferimentos muito graves nos funcionários e/ou no pessoal da manutenção que requerem atendimento imediato; morte	5
Consequências Graves	Ferimentos graves nos funcionários e/ou no pessoal da manutenção que requerem tratamento hospitalar; risco de evoluir para morte	4
Consequências Moderadas	Ferimentos de gravidade moderada nos funcionários e/ou no pessoal da manutenção que requerem tratamento hospitalar; sem risco imediato	3
Consequências Pequenas	Ferimentos ligeiros nos funcionários e/ou no pessoal da manutenção que não requerem tratamento hospitalar	2
Nenhuma consequência	A segurança dos funcionários e do pessoal da manutenção não é colocada em risco	1

Tabela 6.6: Classificação da severidade do efeito do modo de falha em termos económicos.

Efeito	Critério: Custos para a empresa	Índice
Consequências muito Graves	Custos para a empresa superiores a 250 000 euros	5
Consequências Graves	Custos para a empresa inferiores a 250 000 euros e superiores a 50 000 euros	4
Consequências Moderadas	Custos para a empresa inferiores a 50 000 euros e superiores a 5 000 euros	3
Consequências Pequenas	Custos para a empresa inferiores a 5 000 euros	2
Nenhuma consequência	Sem custos para a empresa	1

Salienta-se que na tabela 6.6 os custos referem-se à soma dos custos diretos, relacionados com o custo de manutenção e os custos indiretos, o dinheiro que se perde com a paragem da linha de produção.

6.3.1.2 Probabilidade de ocorrência do modo de falha

Para caracterizar a ocorrência do modo de falha, utilizou-se como critério o tempo médio entre falhas - MTBF. O indicador MTBF refere-se ao tempo médio que um dado equipamento permanece no estado de funcionamento. Por outras palavras, é o tempo de funcionamento que decorre, em média, entre avarias consecutivas. É um indicador de fiabilidade, sendo que quanto maior for o valor, mais fiável é o equipamento [151]. Por exemplo, um MTBF de 8 semanas significa que o equipamento/componente tem uma avaria, em média, de 8 em 8 semanas.

A tabela 6.7 irá permitir estabelecer a ocorrência do modo de falha.

Tabela 6.7: Classificação da ocorrência do modo de falha.

Probabilidade de ocorrência	Critério: MTBF	Índice
Muito alta	MTBF inferior a 10 semanas	5
Alta	MTBF superior a 10 semanas e inferior a 150 semanas	4
Moderada	MTBF superior a 150 semanas e inferior a 300 semanas	3
Baixa	MTBF superior a 300 semanas e inferior a 500 semanas	2
Remota	MTBF superior a 500 semanas	1

6.3.1.3 Probabilidade de deteção do modo de falha

A tabela 6.8 irá permitir estabelecer a deteção do modo de falha.

Tabela 6.8: Classificação da detetabilidade do modo de falha.

Probabilidade de deteção	Critério: Probabilidade de deteção pelo controlo do processo	Índice
Incerta	O controlo não consegue detetar a causa/mecanismo e subsequente modo de falha; ou não existe controlo	3
Moderada	Moderada probabilidade de o controlo detetar a potencial causa/mecanismo e subsequente modo de falha	2
Elevada	Elevada probabilidade de o controlo detetar a potencial causa/mecanismo e subsequente modo de falha	1

6.3.1.4 Formulários FMECA

Os formulários FMECA irão ser elaborados para os diferentes componentes da caixa redutora identificados anteriormente:

- rolamentos;
- engrenagens;
- veios;
- vedantes;
- parafusos da partição;
- carcaça;
- chavetas;

- válvula de drenagem.

Para cada componente, foi necessário recorrer à literatura para identificar os modos potenciais de falha, os efeitos, as causas da falha e as ações recomendadas. Na tabela 6.9 apresenta-se para cada componente a literatura utilizada para o feito.

Tabela 6.9: Literatura utilizada para elaboração dos formulários FMECA.

Componente	Referência
rolamentos	[62; 129; 152–171]
engrenagens	[37; 113; 129; 157; 167; 170; 172–183]
veios	[37; 167; 184; 185]
vedantes	[186–190]
parafusos da partição	[191]
carcaça	[191; 192]
chavetas	[192; 193]
válvula de drenagem	[187]

Tendo em conta a informação anterior elaboraram-se os formulários FMECA dos diferentes componentes, segundo a abordagem estrutural, em vez da abordagem funcional. Esta abordagem consiste numa abordagem detalhada, contemplando os modos de falha individualizados, permitindo perceber qual o modo de falha predominante por componente. De seguida, apresenta-se o formulário FMECA a utilizar para os rolamentos, sendo que os formulários dos restantes componentes encontram-se no anexo B.

De notar que segundo as normas americanas (SAE), o cálculo do NPR só se faz no RCM, sendo que no FMECA apenas se calcula a matriz de risco que resulta do produto do índice de ocorrência com o índice severidade. Ou seja, no FMECA tradicional não se avalia a influência do índice de detetabilidade. Conforme se verifica na tabela 6.10 o FMECA realizado não é o tradicional, uma vez que já se contabilizou a detetabilidade e o NPR. Decidiu-se levar o FMECA em direção ao RCM, uma vez que após a realização do FMECA irá ser necessário tomar decisões, e seguir-se-á o quadro de decisão do RCM. Assim, os três índices ficam contemplados na análise FMECA, não sendo necessário tornar a repetir para estabelecer os critérios de decisão do RCM.

Tabela 6.10: FMECA rolamento.

Responsável do Processo: Página 1 de 4
Grupo de Trabalho: Data FMEA (Orig.): 15/04/2020
Líder do Grupo de Trabalho: Elaborado por: Bruno Ribeiro Data FMEA (Rev.): 14/09/2020

COMPONENTE	FUNÇÃO	MODO POTENCIAL DA FALHA	EFEITOS POTENCIAIS DA FALHA	SEV	CLAS	CAUSAS POTENCIAIS DA FALHA	OCO	CONTROLOS ATUAIS	DET	NPR	AÇÕES RECOMENDADAS
1 Rolamento	Suportar/ guiar os elementos rotativos	1 Fadiga subsuperficial	1 Surgimento de microfendas abaixo da superfície da pista. Quando as microfendas se propagam para a superfície produzem lascas, aumentando os níveis de ruído e vibração da máquina			1 Sobrecarga					Evitar sobrecargas
						2 Contaminação por partículas					Melhorar os mecanismos de vedação
						3 Contaminação por água					Melhorar os mecanismos de vedação
						4 Lubrificação deficiente					Aumentar a quantidade e/ou qualidade de lubrificante
						5 Temperatura de trabalho elevada					Refrigeração do lubrificante e do local de posicionamento do rolamento
						6 Oxidação que ocorre durante as paragens					Prevenir a oxidação durante as paragens
		2 Fadiga iniciada na superfície	1 Surgimento de pequenos pontos na superfície das pistas e nos elementos rolantes. Com o desprendimento do material, ocorrerá a formação de lascas			1 Desalinhamento angular do veio					Alinhamento do eixo
						2 Lubrificação inadequada; Os aditivos EP podem se tornar agressivos, especialmente a temperaturas elevadas					Selecionar lubrificante apropriado
						3 Contaminação por partículas					Melhorar os mecanismos de vedação

Página 2 de 4

COMPONENTE	FUNÇÃO	MODO POTENCIAL DA FALHA	EFEITOS POTENCIAIS DA FALHA	SEV	CLAS	CAUSAS POTENCIAIS DA FALHA	OCO	CONTROLOS ATUAIS	DET	NPR	AÇÕES RECOMENDADAS
		3 Desgaste adesivo	1 O calor gerado pelo contato entre os anéis e os elementos rolantes faz com que as duas superfícies se fundam nos pontos de contato, ocorrendo transferência de material de uma superfície para a outra, aumenta o atrito e concentrações de tensões localizadas			1 Lubrificação inadequada					Revisar a seleção do lubrificante
						2 Carga insuficiente em relação à velocidade de rotação					Adicionar pré-carga, aumentando a carga
						3 Elevadas rotações, acelerações elevadas					Ajustar a aceleração para a máxima recomendada
						4 Rolamentos de grande dimensão					Usar rolamentos mais pequenos; Usar rolamentos híbridos (elementos rolantes mais leves)
		4 Desgaste abrasivo	1 Desgaste do rolamento como um todo; Desgaste das gaiolas, visto que a maioria das gaiolas metálicas não são temperadas			1 Lubrificação inadequada					Verificar o lubrificante e o método de lubrificação
						2 Entrada de impurezas e partículas de desgaste					Melhorar os sistemas de vedação; Substituição do lubrificante
		5 Falso brinelamento	1 Formação de depressões rasas na pista			1 Desalinhamento angular do veio					Alinhamento do eixo
						2 Vibração de pequena amplitude					Aplicar pré-carga; Eliminar ou absorver vibrações externas
						3 Lubrificante inadequado; não há formação de um filme lubrificante que previna o desgaste da pista quando o rolamento está fora de serviço					Utilizar lubrificante que contenha aditivos antidesgaste

Página 3 de 4

COMPONENTE	FUNÇÃO	MODO POTENCIAL DA FALHA	EFEITOS POTENCIAIS DA FALHA	SEV	CLAS	CAUSAS POTENCIAIS DA FALHA	OCO	CONTROLOS ATUAIS	DET	NPR	AÇÕES RECOMENDADAS
		6 Corrosão por humidade	1 Oxidação e corrosão das superfície dos anéis e dos elementos rolantes; Ao longo do tempo, o excesso de humidade forma um ácido no lubrificante que deixa a superfície escurecida; Fadiga na superfície			1 Entrada de gás corrosivo ou água					Utilizar rolamentos integralmente vedados; Considerar a vedação externa
						2 Lubrificante inadequado					Verificar o método de lubrificação
						3 Formação de partículas de água por condensação de humidade					Utilizar rolamentos integralmente vedados; Considerar a vedação externa
						4 Alta temperatura e alto teor água livre no lubrificante quando a máquina está parada					Manter o lubrificante livre de água e líquidos agressivos; Considerar a vedação externa
		7 Corrosão por contacto	1 Oxidação e desgaste na superfície de ajuste e na área de contato entre as pistas e os elementos rolantes			1 Vibração de pequena amplitude					Aplicar pré-carga
						2 Lubrificante inadequado					Usar lubrificante apropriado; Aplicar um filme de lubrificante na superfície de contato
		8 Sobrecarga	1 Indentações nas pistas e aumento do nível de vibração do rolamento (ruído); Fadiga iniciada na superfície			1 Carregamento excessivo; Cargas de choque					Reduzir as cargas; Verifique as condições de empenamento de eixos (anel interno) e ovalização da caixa (anel externo)
		9 Indentação por partículas	1 Formação de entalhes nas pistas e nos elementos rolantes; Risco de iniciar fadiga prematura			1 Entrada de impurezas					Melhorar os sistemas de vedação; Substituição do lubrificante
		10 Fadiga Térmica	1 Anel interno parcial ou completamente trincado na direção axial			1 Carga excessiva, cargas de choques					Verificar as condições de carga
						2 Folga de funcionamento errada					Corrigir a folga

COMPONENTE	FUNÇÃO	MODO POTENCIAL DA FALHA	EFEITOS POTENCIAIS DA FALHA	SEV	CLAS	CAUSAS POTENCIAIS DA FALHA	OCO	CONTROLOS ATUAIS	DET	NPR	AÇÕES RECOMENDADAS
		11 Tensão excessiva	1 Fuga de corrente elétrica e aquecimento localizado entre nas zonas entre um anel de rolamento e os elementos rolantes e entre estes e o outro anel			1 Ligação inadequada à linha de terra					Não estabelecer a ligação à linha de terra de máquinas de soldadura em equipamentos com rolamentos
		12 Fuga de corrente	1 Geração de pequenas crateras próximas umas das outras, que com o passar do tempo transformam-se em estrias paralelas aos eixo do rolamento. Podem ter profundidade considerável, produzindo ruído e vibração durante a operação. Eventualmente, o rolamento falha por fadiga do metal			1 Correntes elétricas de baixa intensidade geradas por: inversores de frequência, cabeamento assimétrico, ligações à linha de terra e acionamento da máquina					Isolamento do rolamento, utilizar rolamentos híbridos ou com isolamento cerâmico; Criar um circuito com desvio da corrente elétrica
						2 A Eletricidade estática proveniente do processos de fabricação da borracha					Isolamento do rolamento, utilizar rolamentos híbridos; Criar um circuito com desvio da corrente elétrica
		13 Fratura forçada	1			1 Impacto/sobrecarga					
		14 Fratura por fadiga	1			1 Cargas pesadas que provocam deflexão do eixo					Verificar as condições de carga
						2 Mudanças de amplitude de carga durante a operação que provocam deflexão do eixo					Não alterara a carga durante a operação

6.3.2 Preenchimento dos formulários FMECA

Uma das grandes dificuldades sentida com a realização deste trabalho foi a falta de dados que permitiam conhecer e caracterizar as falhas nas caixas redutoras. A falta de dados deve-se ao facto de na Continental Mabor não existirem muito casos de falha, logo os dados existentes são praticamente nulos, não sendo possível realizar uma avaliação rigorosa. Para além disso, o fornecedor da caixa redutora não tem dados de utilização da mesma, uma vez que se trata de caixas para uma aplicação específica (modelo não *Standard*), logo o registo dos dados fica a cargo da Continental.

O desconhecimento das características das avarias potenciais, nomeadamente da frequência de ocorrência, severidade e deteção do modo de falha, potenciou a procura de metodologias que permitissem obter uma previsão inicial. Com a previsão inicial, vai ser possível preencher as tabelas de análise FMECA, conseguindo assim estabelecer os planos de manutenção e lubrificação. A ideia seria começar a registar dados operacionais da nova linha de misturação, para atualizar/melhorar a previsão realizada inicialmente.

As soluções apresentadas para obter uma estimativa inicial para os parâmetros referidos anteriormente são as seguintes [194]:

- Método *Delphi*;
- Base de dados/valores de referência.

6.3.2.1 Método *Delphi*

O método *Delphi* é um método subjetivo e intuitivo, que se baseia no conhecimento dos peritos. A avaliação realizada é, essencialmente, qualitativa, contudo por vezes também é possível realizar uma avaliação quantitativa. [195].

Este método foi desenvolvido em 1960 por Olaf Helmer e, desde então tem sido usado em diversas áreas [196]. De seguida, enumeram-se algumas áreas de aplicação:

- Engenharia e gestão de construções [197; 198];
- Cuidados de saúde [199–201];
- Agricultura [202];
- Pecuária [201];
- Projetos de investigação [203].

Na figura 6.11 pode observar-se o processo de execução do método de *Delphi*.

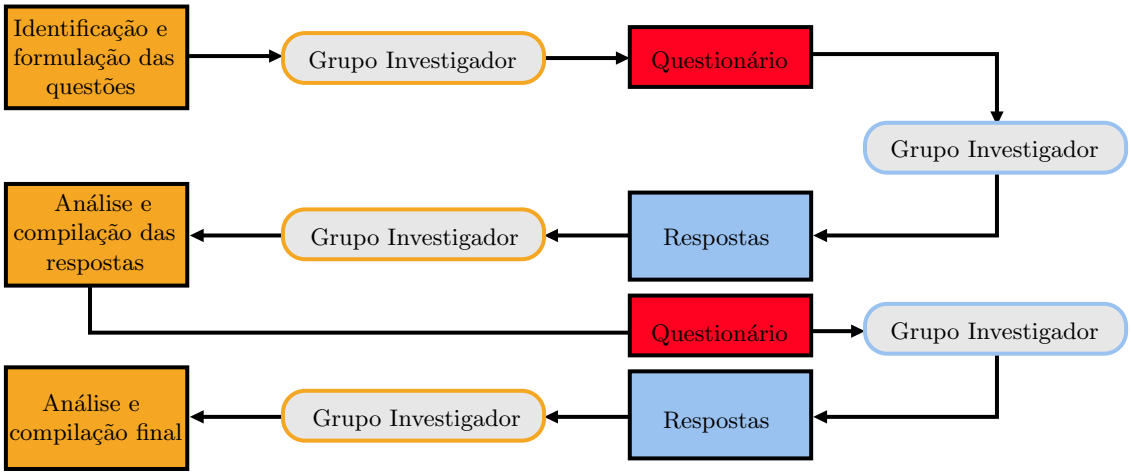


Figura 6.11: Processo de execução do método de *Delphi* (Adaptado de [204]).

O objetivo deste método é obter o consenso entre os peritos através de duas ou três fases de questionários. De forma a verificar se existe o consenso entre os peritos, após cada ronda realiza-se uma avaliação estatística dos resultados do questionário, determinando a média e os quartis dos resultados obtidos [205].

Antes de se aplicar o método é importante que estejam reunidos os seguintes fatores [194; 196]:

- Conjunto de peritos apropriados;
- Objetivo definido;
- Questionários adequados;
- Estrutura de análise;
- Cronograma estabelecido.

6.3.2.2 Base de dados/valores de referência

A segunda alternativa seria recorrer a uma base de dados e/ou utilizar valores de referência. Com os dados de avarias de outras caixas redutoras e/ou com os valores de referência de avaria dos componentes de uma transmissão mecânica, é possível caracterizar a caixa redutora em estudo de uma forma genérica.

Este método apresenta as seguintes dificuldades de ser utilizado [184]:

- A definição de avaria de um equipamento mecânico, neste caso as caixas redutoras, varia consoante a sua aplicação, ou seja, seus modos de funcionamento e de utilização;
- A informação relativa às avarias associadas a uma determinada aplicação, raramente está disponível.

6.3.2.3 Simplificação dos formulários FMECA

Uma vez que não existem dados capazes de realizar a abordagem estrutural, simplificando os formulários obtidos e utilizando o segundo método apresentado anteriormente, principalmente os valores de referência, é possível preencher os respetivos formulários. Utilizando os valores de referência, a margem de erro está situada entre 20% a 25%.

A simplificação dos formulários, consistiu em dois fatores. Por um lado, o formulário FMECA simplificado é elaborado segundo a abordagem funcional, ou seja, o modo de falha do componente corresponde à negação da função do respetivo componente. Esta simplificação não está incorreta, porque, mesmo até me termos de manutenção, o que importa é a deterioração do componente. Com a simplificação efetuada, passa a ter-se um único modo de falha por componente, o que não acontecia com a abordagem estrutural, onde se tinha mais do que um modo de falha por componente. Por outro lado, restringe-se o estudo aos principais componentes das caixas redutoras. Os componentes que são tidos em conta nos formulários FMECA simplificado são os seguintes:

- rolamentos;
- engrenagens;
- veios;
- vedantes;
- carcaças.

De seguida serão apresentados os respetivos formulários simplificados.

6.3.3 Formulários FMECA sem contribuição dos controlos atuais

Na tabela 6.11 é apresentado o formulário FMECA simplificado da caixa redutora sem a contribuição dos controlos atuais. Inicialmente, não se consideraram os controlos atuais, pois pretende avaliar-se a criticidade dos modos de falha na ausência dos mesmos, ou seja, sem qualquer mecanismos de deteção/controlo do modo de falha. Apesar de não se ter em conta os métodos de deteção referentes à condição do equipamento, a inspeção visual tem que ser considerada como método de deteção. Isto acontece, uma vez que este equipamento está inserido numa linha de produção, onde trabalham pessoas, pessoas essas que involuntariamente conseguem detetar os modos de falha visualmente. Ou seja, não é necessária uma ação de manutenção programada para os funcionários e/ou pessoal da manutenção ver o que está a acontecer.

Posteriormente, explicar-se-á como se preencheu o formulário.

Tabela 6.11: FMECA simplificado caixa redutora sem contribuição dos controlos atuais.

Responsável do Processo: Página 1 de 1
Grupo de Trabalho: Data FMEA (Orig.): 15/04/2020
Líder do Grupo de Trabalho: Elaborado por: Bruno Ribeiro Data FMEA (Rev.): 14/09/2020

COMPONENTE	FUNÇÃO	MODO POTENCIAL DA FALHA	EFEITOS POTENCIAIS DA FALHA	S E V	CAUSAS POTENCIAIS DA FALHA	O C O	CONTROLOS ATUAIS	D E T	N P R
1 Rolamento	Suportar/ guiar os elementos rotativos	1 Não suportar/ guiar os elementos rotativos	1 Paragem	4	1 Lubrificação inadequada; Entrada de impurezas; Oxidação que ocorre durante as paragens; Carregamento excessivo; Cargas de choque; Folga de funcionamento errada; Desalinhamento angular do veio	4	-	3	48
2 Engrenagem	Transmitir o movimento de rotação	1 Não transmitir o movimento de rotação	1 Paragem	5	1 Gripagem; Lubrificação inadequada; Entrada de impurezas; Elevada pressão de contacto	4	-	3	60
3 Veio	Transmitir movimento e energia entre as engrenagens	1 Não transmitir movimento e energia entre as engrenagens	1 Paragem	5	1 Falha nos vedantes; Velocidade de rotação elevada; Binário de carga elevado; Elevada temperatura; Concentração de tensões resultantes da operação; Folga de funcionamento errada; Sobrecargas cíclicas	3	-	3	45
4 Vedante	Garantir a união e a estanquidade	1 Não garantir a união e a estanquidade	1 Fuga de óleo	2	1 Funcionamento; Lubrificante inadequado; Ambiente corrosivo; Entrada de impurezas; Elevada rugosidade com a superfície de contacto	4	Inspeção visual	2	16
5 Carcaça	Acomodar os elementos da caixa redutora e conter o lubrificante	1 Não acomodar os elementos da caixa redutora e não conter o lubrificante	1 Vazamento; Outros componentes podem se danificar	5	1 Ambiente corrosivo; Vibrações	1	Inspeção visual	2	10

Relativamente à severidade do efeito do modo de falha, viu-se que existem três índices de severidade, sendo escolhido o maior. Na tabela 6.12 apresentam-se os três índices de severidade, em termos ambientais, de segurança e económicos, sendo selecionado o maior para cada modo de falha. Para identificar os diferentes modos de falha utilizou-se um código constituído por dois algarismos separados por um ponto final, sendo que o primeiro algarismo se refere ao componente e o segundo ao modo de falha para esse componente. De acordo com a simplificação realizada dos formulários FMECA, cada componente apenas está associado a um modo de falha, tal como se observa pela tabela 6.12. Deste modo, o segundo algarismo do código do modo de falha será sempre 1, porque não existe mais do que um modo de falha por componente. Assim, quando no texto se refere ao componente, é o mesmo que estabelecer a referência ao modo de falha.

Tabela 6.12: Índice de severidade.

Modo de falha	Componente	Índice severidade ambiente	Índice severidade segurança	Índice severidade económico	Índice severidade
1.1	Rolamento	1	1	4	4
2.1	Engrenagem	1	1	5	5
3.1	Veio	1	1	5	5
4.1	Vedante	2	2	2	2
5.1	Carcaça	3	5	5	5

Para estabelecer o índice de severidade económico é necessário ter em conta os custos diretos e indiretos, tal como se indicou anteriormente. Os custos diretos estão, essencialmente, ligados ao custo de aquisição do componente, sendo que os custos indiretos devem-se ao dinheiro que se perde com a paragem da linha de misturação. De salientar que quando ocorre a paragem da linha de misturação, existem 4 diferentes situações que podem ocorrer, e desta forma os custos indiretos variam consoante a situação.

Tal como foi dito anteriormente, as caixas redutoras em análise estão localizadas no departamento da misturação e, como se viu no capítulo 3 o objetivo desta etapa é a produção do composto de borracha, que irá ser utilizado nas etapas seguintes do processo produtivo do pneu. Assim, quando existe uma avaria na caixa redutora, a máquina para, e consequentemente, deixa de ser produzido composto de borracha. Tal como foi dito, as etapas consecutivas à misturação precisam deste composto de borracha, logo a não produção pode afetar a produção do composto final (pneu). Quando isso acontece, o custo indireto é diretamente proporcional ao tempo em que a máquina está parada (*downtime*), sendo que, em média, por cada dia em que a linha está parada perdem-se 30 mil euros. O valor apresentado anteriormente é um valor hipotético, não sendo possível revelar o verdadeiro valor por motivos de confidencialidade.

Contudo, quando uma linha de misturação para, ou seja, quando se deixa de produzir composto de borracha, não significa que a produção do produto final (pneu) é afetado. A não afetação da produção do produto final deve-se a uma das três seguintes situações:

- comprar compostos de borracha no mercado;
- obter compostos de borracha de outras fábricas da Continental;

- se não houver necessidade de produzir compostos de borracha.

As duas situações indicadas primeiramente retratam medidas tomadas quando há necessidade de ter compostos de borrachas para dar continuidade ao ciclo produtivo do pneu, sendo que a última situação traduz um acontecimento em que a linha de misturação para, mas não havia uma necessidade de produzir compostos de borracha, por isso não é necessário tomar qualquer medida. No caso da primeira situação, existe um custo indireto associado, uma vez que o custo de produção do composto de borracha é inferior ao custo de compra do referido composto no mercado. Assim, o custo indireto é obtido subtraindo ao custo de compra do composto de borracha do mercado o custo de produção do mesmo (por este custo intende-se o custo associado à produção da mesma quantidade de composto que se comprou, por exemplo, o custo das matérias-primas). Na segunda situação, apesar do composto de borracha ser um produto interno, ou seja, do grupo Continental, seria necessário que uma das outras fábricas do grupo Continental adaptasse a sua produção e isto tem um custo associado, e é necessário transportar o composto de borracha para Portugal. Assim, o custo indireto é a soma do custo de aquisição a uma das outra fábricas da Continental mais o custo de transporte. A última situação não tem quaisquer custos indiretos associados, uma vez que a linha de produção não ia produzir composto de borracha de qualquer das maneiras.

De forma a simplificar o caso de estudo, considerou-se que existe diariamente uma necessidade de composto de borracha e que, se este deixar de ser produzido, o ciclo de produção do pneu é afetado. Assim, nenhuma das 3 situações indicadas anteriormente pode ser implementada e considera-se um custo indireto de 30 mil euros por dia de paragem.

De seguida, apresenta-se na tabela 6.13 todos os dados necessários à obtenção do índice de severidade económico para cada um dos componentes. Apenas foi necessário estabelecer os valores das colunas relativas ao custo direto, tempo de substituição e tempo de entrega, sendo as demais colunas preenchidas tendo em conta as seguintes relações.

Tabela 6.13: Índice de severidade económico.

Componente	Custo direto (euros)	Tempo subs. (dias)	Tempo entrega (meses)	Tempo total (dias)	Custo indireto (euros)	Custo total (euros)	Índice severidade económico
Rolamento	2 000	0,33	0,23	7,33	220 000	222 000	4
Engrenagem	5 000	1	6	181	5 430 000	5 435 000	5
Veio	5 000	0,67	6	180,67	5 420 100	5 425 100	5
Vedante	100	0,04	-	0,04	1 200	1 300	2
Carcaça	20 000	7	6	187	5 610 000	5 630 000	5

$$\text{Tempo total (dias)} = \text{Tempo substituição (dias)} + \text{Tempo entrega (meses)} \cdot 30 \tag{6.1}$$

$$\text{Custo indireto (euros)} = \text{Tempo total (dias)} \cdot 30\,000 \tag{6.2}$$

$$\text{Custo total (euros)} = \text{Custo direto (euros)} + \text{Custo indireto (euros)} \tag{6.3}$$

$$\text{Índice sev. eco.} = \begin{cases} 5, & \text{Custo total} \geq 250\ 000 \text{ euros} \\ 4, & \text{Custo total} \in [\ 50\ 000, 250\ 000\ [\ \text{ euros} \\ 3, & \text{Custo total} \in [\ 5\ 000, 50\ 000\ [\ \text{ euros} \\ 2, & \text{Custo total} \in\ ]\, 0, 5\ 000\ [\ \text{ euros} \\ 1, & \text{Custo total} = 0 \text{ euros} \end{cases} \tag{6.4}$$

Na equação 6.1 multiplica-se o tempo de entrega por 30, uma vez que se considera que, em média, um mês tem 30 dias, e se pretende apresentar o tempo total em dias. Esta equação retrata que o tempo total de paragem da máquina é resultado da soma do tempo que demorar a entregar o componente depois de pedido e o tempo que demora a realizar a sua substituição. A equação 6.2 foi elaborada tendo em conta que por cada dia em que a linha está parada perdem-se 30 mil euros e a equação 6.4 foi estabelecida tendo em conta os valores da tabela 6.6.

A coluna dos custos diretos foi preenchida tendo em conta os valores de aquisição dos componentes. Os rolamentos são fornecidos pela FAG e o seu custo é cerca de 2 mil euros. As engrenagens, em geral, são mais caras do que os rolamentos, atribuindo-se um custo de 5 mil euros. Por sua vez, os veios podem ser considerados ao mesmo nível económico das engrenagens. Os vedantes são mais baratos que os veios e os rolamentos, custando cerca de 100 euros. Por último, em termos de custo direto, a carcaça é o componente mais caro e, na presença de uma falha na carcaça, normalmente tudo o que está envolvido pela carcaça também sofre, por exemplo, os rolamentos e as engrenagens. Se a carcaça começa a apresentar fissuras, as precisões de contacto de funcionamento deixam de existir, e os equipamentos que estão envolvido pela carcaça também irão apresentar avarias. O custo de aquisição de uma carcaça ronda os 20 mil euros. De notar que os custos de aquisição apresentados referem-se apenas a um componente e não ao conjunto dos componentes.

O tempo de substituição de um rolamento é um turno de 8 horas o que corresponde a 0,33 dias, uma vez que um dia é composto por três turnos de trabalho de 8 horas. No caso das engrenagens, demoram-se os três turnos para realizar a substituição, logo 1 dia de trabalho. Por sua vez, os veio têm um tempo de substituição de 2 turnos, ou seja, 16 horas, que corresponde a 0,67 dias. Os vedantes são os componentes com menor tempo de substituição, cerca de 1 hora, que corresponde a 0,04 dias. Por fim, a carcaça é o componente que demora mais tempo a substituir, cerca de 1 semana, ou seja, 7 dias.

Relativamente ao tempo de entrega de cada uma dos componentes, o vedante não foi considerado, uma vez que a Continental tem vedantes em *stock*. Não existe *stock* de rolamentos na fábrica, nem há vendedores a fazer stock, logo é necessário encomendar, sendo a encomenda recebida ao final de 6 dias. No caso das engrenagens, veios e carcaça o tempo de entrega é bastante mais longo, cerca de 6 meses, uma vez que como a caixa não é *standard* é necessário contactar o fornecedor da caixa e esperar que ele produza e entregue os respetivos componentes. Sendo uma máquina especial, entra em fabrico quando o fornecedor tiver disponibilidade, não interrompe a produção da linha dele para fazer a peça especial, daí demorar tanto tempo a entregar. Os modelos especiais tem sempre esta limitação, quando acontece alguma anomalia é necessário recorrer ao construtor. Para além de ficar mais caro e demorar mais tempo, tem outra desvantagem que consiste no fabricante ir à falência. Existem duas alternativas que poderiam diminuir este tempo de entrega. Uma seria o fornecedor da caixa ser uma empresa que só produz máquinas especiais, que não é o caso do fornecedor da caixa em estudo. Nestes fabricantes, o pedido

de fabrico da peça especial entra logo numa série de fabrico normal, e o tempo de entrega é bastante mais reduzido. A segunda alternativa, seria contactar outro fabricante, capaz de reproduzir de acordo com o observado na máquina. Esta alternativa não é muito fiável, porque existe um elevado grau de incerteza associado, e é só tida em maior consideração caso o fornecedor da caixa redutora tenha entrado em falência. Por exemplo, no caso das engrenagens, se fosse uma engrenagem que se conheça as correções que foram dadas e o método de fabrico, recorre-se a um fabricante de engrenagens. Caso a engrenagem tenha alguma característica específica, ou alguma correção muito particular que tenha sido dada ao engrenamento ou outro tipo de correção, fica-se limitado ao construtor. Tendo em conta o que foi dito e utilizando as equações 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4, consegue obter-se o índice de severidade económico para cada um dos componentes.

Os rolamentos, engrenagens e veios, em termos de severidade dos efeitos do modo de falha, não têm impacto no ambiente, nem na segurança, logo o valor do índice de severidade corresponde ao ambiente e à segurança é 1, tendo em conta as tabelas 6.4 e 6.5.

No caso dos vedantes, considera-se, pela tabela 6.4, que o impacto ambiental ocorre localmente. Logo, em termos ambientais o índice de severidade é 2, uma vez que a falha associada aos vedantes são fugas pequenas que se vão controlando, a partir do momento que se começa a detetar uma fuga, e, evidentemente, que se planeia uma intervenção de substituição do vedante. Em termos de segurança, pela tabela 6.5, atribuiu-se o índice 2, porque a falha num vedante pode provocar ferimentos ligeiros, que não requerem tratamento hospitalar.

No caso da carcaça, considera-se, pela tabela 6.4, que o impacto ambiental ocorre ao nível da secção, uma vez que a caixa redutora é de cárter húmido, logo em termos ambientais o índice de severidade é 3. Se fosse um sistema de lubrificação por cárter seco, o valor do índice anterior já seria 2, ocorrendo o problema ao nível do equipamento. O sistema de lubrificação por cárter húmido é mais perigoso, em termos ambientais, uma vez que o óleo está dentro da carcaça. Por sua vez, no caso do sistema de lubrificação de cárter seco, o óleo é armazenado num depósito, exterior à caixa redutora, logo a quantidade de óleo dentro da caixa redutora é pequena. Em termos de segurança, pela tabela 6.5, atribuiu-se o índice 5, porque a falha na carcaça pode provocar ferimentos muito graves, que requerem tratamento hospitalar urgente, ou pode mesmo provocar a morte dos funcionários e/ou pessoal da manutenção.

Uma vez obtidos os diferentes índices de severidade relativos à economia da empresa, segurança e ambiente, escolhe-se o maior dos três para cada um dos componentes. As engrenagens, os veios e as carcaças são os componentes que apresentam o nível máximo de severidade (5). Os rolamentos apresentam o nível 4 e os vedantes o nível 2. Note-se que, o índice de severidade do vedante é inferior ao do veio, uma vez que se assumiu que quando acontece a falha do vedante, ocorre a substituição do mesmo, antes de provocar falhas nos outros equipamentos. Ou seja, a falha definiu-se da seguinte forma: o vedante deixou de cumprir a sua função, começou a permitir a passagem de lubrificante, mas ainda não se atingiu a fase de danificar o veio.

Explicar-se-á, seguidamente, como se obteve os índices de detetabilidade, tendo em conta a tabela 6.8. No caso dos rolamentos, das engrenagens e dos veios, o índice de detetabilidade é 3, uma vez que não se considera qualquer método de deteção. O índice de detetabilidade dos vedantes é 2, porque apesar de visualmente ser possível verificar se o vedante se encontra gasto ou não (as falhas nos vedante são visualmente detetáveis),

o sítio onde os vedantes estão localizados não é de fácil acesso, e como tal, não é muito fácil para o funcionário e/ou pessoal da manutenção detetar visualmente a ocorrência de falha. No caso da carcaça, à semelhança dos vedantes, por inspeção visual é possível observar a ocorrência de falha, uma vez que não há avarias repentinas, ou seja, não surgem repentinamente fissuras. Contudo, como a falha na carcaça pode acontecer numa região mais escondida, de difícil acesso, não é certo que seja detetável apenas visualmente. Sendo assim, para carcaça o índice de detetabilidade é também 2.

Relativamente ao índice de ocorrência, este vai ser estabelecido tendo em conta a tabela 6.7. Conseguiu-se estabelecer um índice de ocorrência para cada componente, baseando-se na duração da vida esperada, em média, para cada componente. Os rolamentos normalmente apresentam uma falha a cada 15 mil horas de funcionamento. Sabendo que a fábrica está em contínua produção, existindo três turnos de 8 horas por dia, estas 15 mil horas correspondem a 89 semanas de funcionamento. Desta forma, o índice de ocorrência é 4. No cálculo das engrenagens à resistência é necessário selecionar um fator que corresponde à duração de vida esperada. Este fator varia entre 10 e 25 mil horas, sendo que neste caso consideraram-se 25 mil horas. Seguindo o mesmo raciocínio utilizado para os rolamentos, as engrenagens apresenta uma falha a cada 149 semanas, sendo o índice de ocorrência o número 4. No caso dos veios, pode assumir-se que a duração de vida é o dobro das engrenagens, ou seja, 50 mil horas ou 298 semanas. Assim, o índice de ocorrência corresponde ao terceiro nível. No caso dos vedantes é mais difícil estabelecer o índice de ocorrência, porque depende muito do ambiente onde estão, mas como neste caso não é um ambiente corrosivo, visto que contactam com o óleo, considerou-se que os vedantes apresentam uma duração de vida esperada, de grosso modo, metade dos rolamentos. Assim, os vedantes apresentam uma falha a cada 7.5 mil horas, cerca de 45 semanas, correspondendo o índice de severidade ao nível 4. Por fim, a carcaça é o componente com um MTBF maior, sendo pouco provável a ocorrência de uma falha. Sendo assim, o índice de ocorrência corresponde ao nível mais baixo, ao nível 1.

Depois de atribuídos os índices, calcula-se o NPR para cada modo de falha, pela equação 4.3 do capítulo 4.3. Este cálculo será apresentado na tabela 6.14.

Tabela 6.14: Cálculo NPR dos modos de falha caixa redutora sem contribuição dos controlos atuais.

Componente	Índice severidade	Índice ocorrência	Índice detetabilidade	NPR
Rolamento	4	4	3	48
Engrenagem	5	4	3	60
Veio	5	3	3	45
Vedante	2	4	2	16
Carcaça	5	1	2	10

6.3.3.1 Análise dos resultados

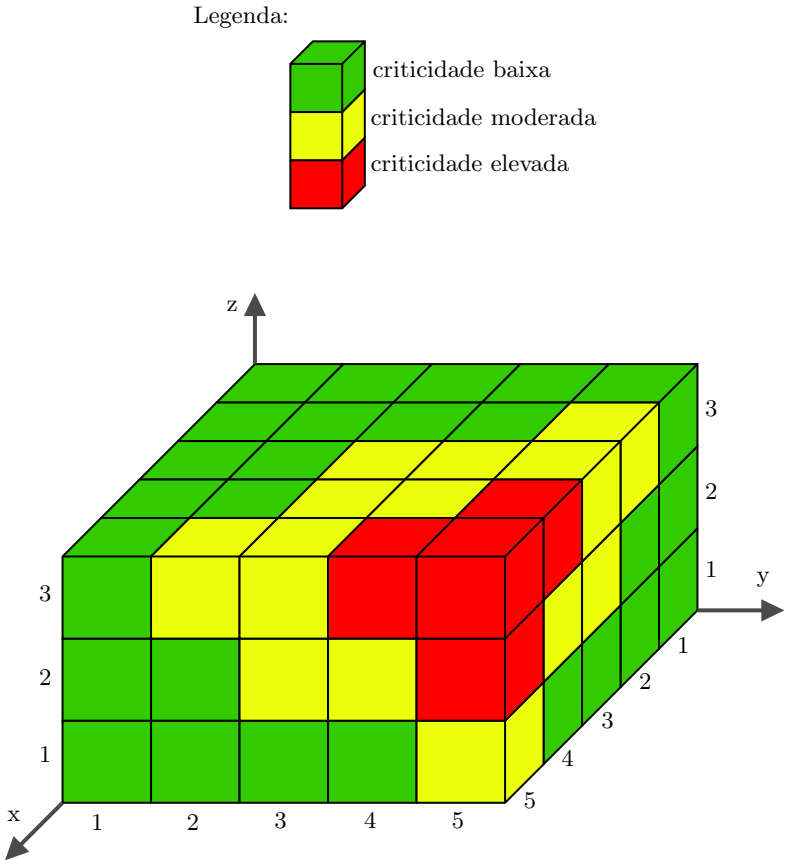
Depois de se calcular os diferentes valores de NPR para cada um dos modos de falha, é necessário analisar esses valores, para verificar quais são os modos de falha críticos para o equipamento. O NPR é obtido pelo produto de três índices, logo a sua representação 3D é um paralelepípedo de dimensões: 5 x 5 x 3, ver figura 6.12. Na figura 6.13 é

possível observar as 75 combinações possíveis para o NPR, correspondendo as figuras 6.13a, 6.13b e 6.13c às secções do paralelepípedo para índices de detetabilidade de 1, 2 e 3, respetivamente.

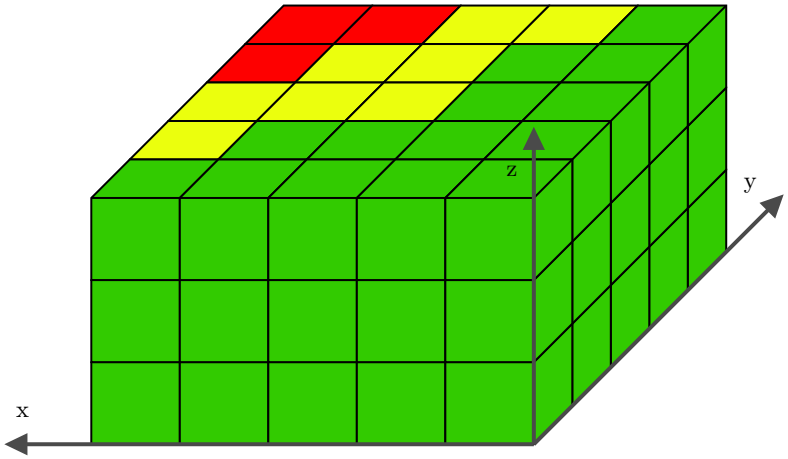
O valor máximo que o NPR pode tomar acontece quando cada um dos índices toma o seu valor máximo. Sendo assim, o NPR máximo é 75, visto que os índices de severidade e ocorrência têm como nível máximo o 5º nível, e o índice de detetabilidade o nível 3 ($75 = 5 \cdot 5 \cdot 3$). Tendo em conta este valor máximo, estabeleceu-se três níveis de criticidade:

- criticidade elevada: NPR $\in [\, 50, 75 \,]$
- criticidade moderada: NPR $\in [\, 25, 50 \,[$
- criticidade baixa: NPR $\in [\, 1, 25 \,[$

Nas figuras 6.12 e 6.13 os valores de NPR correspondentes à criticidade elevada estão representados a cor vermelha, os de criticidade moderada a cor amarela e, por fim, os de criticidade baixa a cor verde.

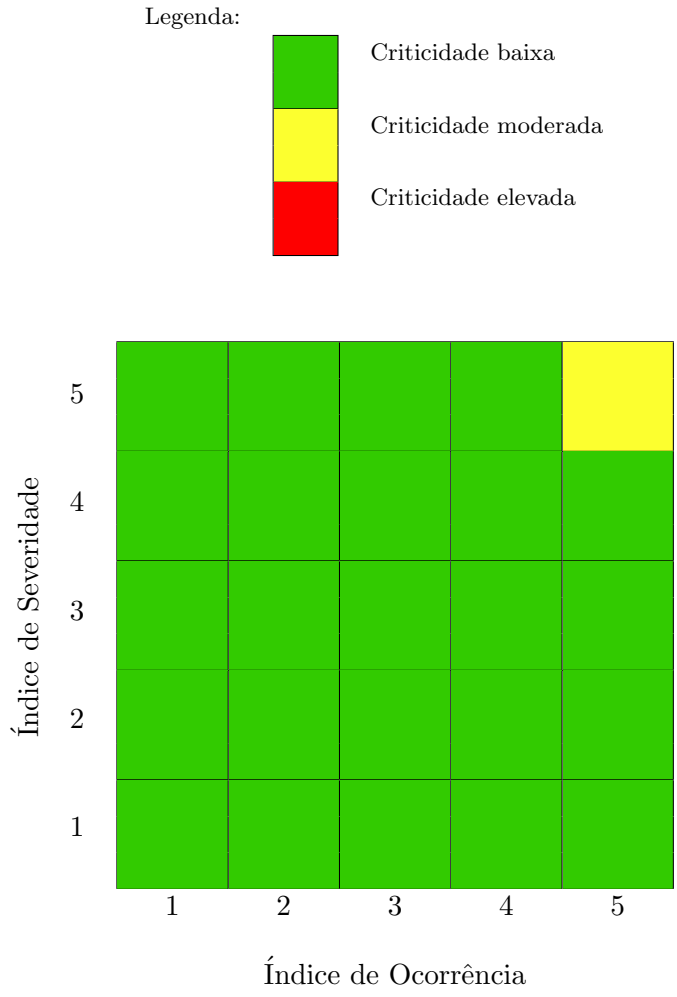


(a) Vista frontal

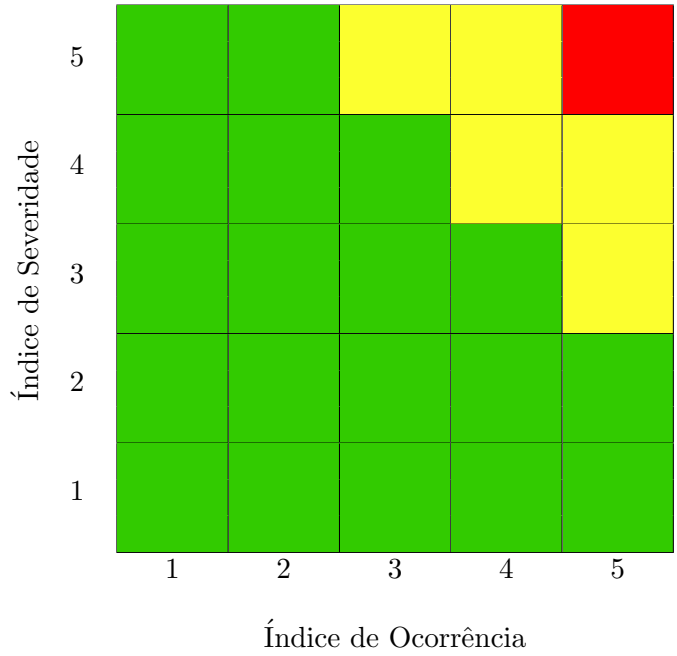


(b) Vista anterior

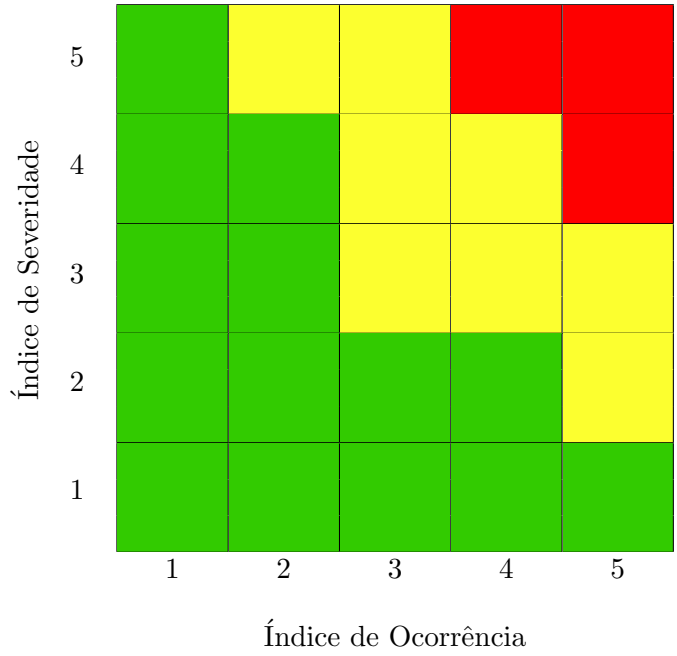
Figura 6.12: Representação 3D do NPR, onde o eixo dos xx representa o índice de severidade, o eixo dos yy o índice de ocorrência e o eixo dos zz o índice de detetabilidade.



(a) Índice de Detetabilidade = 1



(b) Índice de Detetabilidade = 2



(c) Índice de Detetabilidade = 3

Figura 6.13: Diferentes combinações possíveis para o NPR.

Utilizando os índices de NPR da análise FMECA realizada e as relações estabelecidas anteriormente para a criticidade em função do NPR, estabelece-se a tabela 6.15. Pela análise da tabela verifica-se que dos cinco modos de falha identificados para a caixa redutora um é de criticidade elevada, dois de criticidade moderada e dois de criticidade baixa. Se não existisse qualquer controlo ou mecanismo de deteção, ter-se-ia que ter em atenção os modos de falha 1.1, 2.1 e 3.1.

Tabela 6.15: Criticidade dos modos de falha sem contribuição dos controlos atuais.

Modo de falha	NPR	Criticidade
1.1	48	moderada
2.1	60	elevada
3.1	45	moderada
4.1	16	baixa
5.1	10	baixa

6.3.3.2 Criticidade global

O passo seguinte consistiu na obtenção da criticidade global de cada um dos componentes constituintes da caixa redutora. A criticidade global é obtida somando os índices NPR de todos os modos de falha que foram identificados na análise FMECA para cada componente. Neste caso, como se procedeu à simplificação da tabela FMECA, com a análise funcional, apenas se atribui um modo de falha a cada componente. Assim, os valores de NPR da tabela 6.15 correspondem à criticidade global.

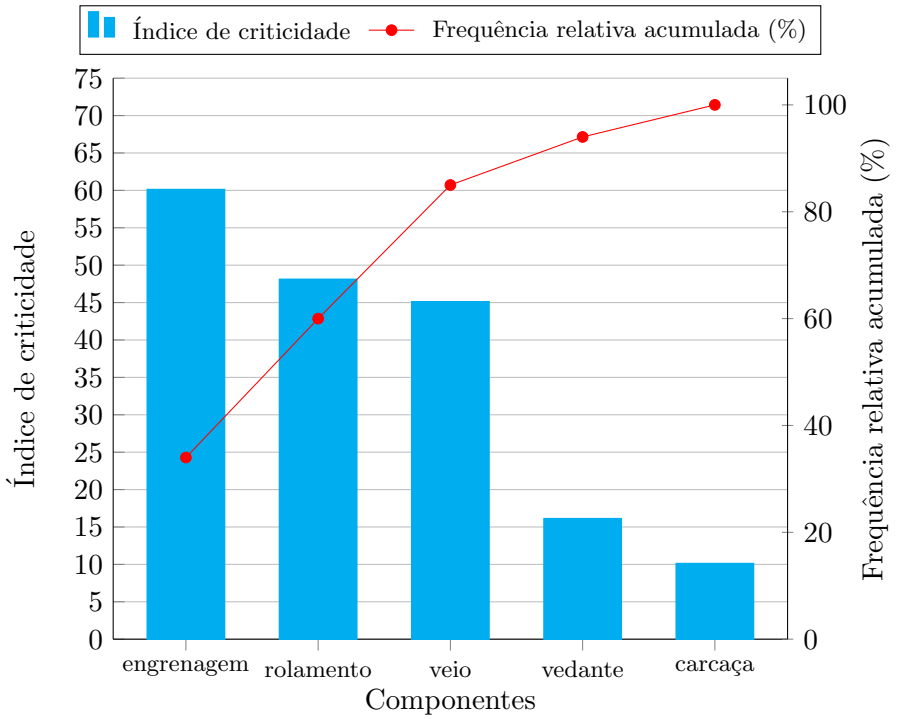


Figura 6.14: Diagrama do índice de criticidade dos componentes alvos de análise não considerando os controlos atuais.

Tal como se observa no diagrama representado na figura 6.14, existem três componentes, sendo todos componentes dinâmicos, que contribuem em 85% para a criticidade global do sistema. Esses componentes são os rolamentos, engrenagens e veios, sendo os componentes mais críticos.

6.3.4 Formulários FMECA com contribuição dos controlos atuais

Na tabela 6.17 é apresentado o formulário FMECA simplificado da caixa redutora com a respetiva contribuição dos controlos atuais. Esta situação corresponde à situação atual da Continental Mabor.

A grande diferença desta tabela comparativamente à tabela 6.11 é o índice de detetabilidade de alguns componentes. Ao contabilizar os controlos atuais, os índices de detetabilidade irão diminuir, uma vez que com estes controlos torna-se mais fácil detetar a ocorrência de um modo de falha, os restantes índices não variam.

Explicar-se-á como se obteve os índices de detetabilidade, tendo em conta a tabela 6.8. No caso dos rolamentos, atualmente já se realiza o controlo da temperatura, logo já existe um nível de deteção, sendo o índice número 2. O controlo de temperatura é mais eficaz no caso da lubrificação ser por salpico, em vez de forçada. Tal acontece, uma vez que na lubrificação forçada, o lubrificante é injetado a temperatura controlada, logo na ocorrência de falha, começaria a aumentar a temperatura do rolamento, mas com a injeção de óleo a uma temperatura baixa, não iria verifica-se um subida da temperatura tão acentuada. Por sua vez, na lubrificação por salpico, como o óleo circula dentro da caixa, na ocorrência de falha num rolamento, verifica-se uma maior elevação da temperatura. Resumindo, o controlo de temperatura continua a ser um método de deteção no caso da lubrificação forçada, porque se a falha evoluir, a temperatura, inadvertidamente, irá aumentar. Contudo, apresenta a desvantagem de não conseguir detetar a falha nos rolamentos nos estágios iniciais, não sendo possível fazer manutenção unicamente através deste método de deteção. No caso das engrenagens, o índice de deteção também é 2, porque apesar de também se realizar o controlo de temperatura e o operador realizar a análise sensorial do ruído, são métodos de deteção que só permitem detetar o problema numa fase muito tardia, não sendo possível, mais uma vez, fazer manutenção unicamente através destes métodos de deteção. No caso dos veios, o único método de deteção atual é a inspeção visual realizada durante as paragens, sendo por isso o índice de detetabilidade 2. O problema do veio, normalmente é a fadiga, e com a fadiga é possível verificar o aparecimento de fissuras. Se o veio for bem calculado, por exemplo, com um coeficiente de segurança 2, as fissuras demoram algum tempo a propagar-se, não sendo um processo repentino. Desta forma, a realização da inspeção visual durante as paragens pode ser considerado um método de deteção. O índice de detetabilidade dos vedantes continua a ser 2 e para a carcaça o índice de detetabilidade é 1, pelas razões explicadas anteriormente.

Depois de alterados os índices de detetabilidade de alguns componentes, calcula-se os valores NPR da mesma forma realizada anteriormente, ver tabela 6.16.

Tabela 6.16: Cálculo NPR dos modos de falha da caixa redutora com contribuição dos controlos atuais.

Componente	Índice severidade	Índice ocorrência	Índice detetabilidade	NPR
Rolamento	4	4	2	32
Engrenagem	5	4	2	40
Veio	5	3	2	30
Vedante	2	4	2	16
Carcaça	5	1	2	10

Tabela 6.17: FMECA simplificado caixa redutora com contribuição dos controlos atuais.

Responsável do Processo: Página 1 de 1
Grupo de Trabalho: Data FMEA (Orig.): 15/04/2020
Líder do Grupo de Trabalho: Elaborado por: Bruno Ribeiro Data FMEA (Rev.): 14/09/2020

COMPONENTE	FUNÇÃO	MODO POTENCIAL DA FALHA	EFEITOS POTENCIAIS DA FALHA	S E V	CAUSAS POTENCIAIS DA FALHA	O C O	CONTROLOS ATUAIS	D E T	N P R	AÇÕES RECOMENDADAS
1 Rolamento	Suportar/ guiar os elementos rotativos	1 Não suportar/ guiar os elementos rotativos	1 Paragem	4	1 Lubrificação inadequada; Entrada de impurezas; Oxidação que ocorre durante as paragens; Carregamento excessivo; Cargas de choque; Folga de funcionamento errada; Desalinhamento angular do veio	4	Temperatura	2	32	Sistema de monitorização
2 Engrenagem	Transmitir o movimento de rotação	1 Não transmitir o movimento de rotação	1 Paragem	5	1 Gripagem; Lubrificação inadequada; Entrada de impurezas; Elevada pressão de contacto	4	Análise sensorial de Ruído; Temperatura	2	40	Sistema de monitorização
3 Veio	Transmitir movimento e energia entre as engrenagens	1 Não transmitir movimento e energia entre as engrenagens	1 Paragem	5	1 Falha nos vedantes; Velocidade de rotação elevada; Binário de carga elevado; Elevada temperatura; Concentração de tensões resultantes da operação; Folga de funcionamento errada; Sobrecargas cíclicas	3	Inspeção visual nas paragens	2	30	Sistema de monitorização
4 Vedante	Garantir a união e a estanquidade	1 Não garantir a união e a estanquidade	1 Fuga de óleo	2	1 Funcionamento; Lubrificante inadequado; Ambiente corrosivo; Entrada de impurezas; Elevada rugosidade com a superfície de contacto	4	Inspeção visual	2	16	Controlo de fugas
5 Carcaça	Acomodar os elementos da caixa redutora e conter o lubrificante	1 Não acomodar os elementos da caixa redutora e não conter o lubrificante	1 Vazamento; Outros componentes podem se danificar	5	1 Ambiente corrosivo; Vibrações	1	Inspeção visual	2	10	Limpeza e verificar que não há fissuras

6.3.4.1 Análise dos resultados

Utilizando os índices de NPR da análise FMECA realizada e as relações estabelecidas anteriormente para a criticidade em função do NPR, estabelece-se a tabela 6.18. Pela análise da tabela verifica-se que dos cinco modos de falha identificados para a caixa redutora três são de criticidade moderada e dois de criticidade baixa. Deste modo, devem ser tidos em conta os modos de falha 1.1, 2.1 e 3.1.

Tabela 6.18: Criticidade dos modos de falha com contribuição dos controlos atuais.

Modo de falha	NPR	Criticidade
1.1	32	moderada
2.1	40	moderada
3.1	30	moderada
4.1	16	baixa
5.1	10	baixa

Através da tabela 6.19 é possível comparar a primeira situação (ausência de controlos atuais) com a segunda (presença dos controlos atuais), verificando-se que a criticidade dos modos de falha 1.1, 2.1 e 3.1 diminuiu cerca de 33%. Esta redução de 33% do NPR permitiu a criticidade do modo de falha 2.1 passar de elevada a moderada, contudo não alterou a categoria da criticidade dos modos de falha 1.1 e 3.1 que permaneceu moderada. A criticidade dos modos de falha 4.1 e 5.1 permaneceu inalterável, visto que, como foi dito, os índices de detetabilidade destes modos de falha não foram alterados e, assim, o NPR mantém-se.

Tabela 6.19: Influência dos controlos atuais na criticidade dos modos de falha.

Modo de falha	NPR sem controlos atuais	Criticidade sem controlos atuais	NPR com controlos atuais	Criticidade com controlos atuais
1.1	48	moderada	32	moderada
2.1	60	elevada	40	moderada
3.1	45	moderada	30	moderada
4.1	16	baixa	16	baixa
5.1	10	baixa	10	baixa

6.3.4.2 Criticidade global

O passo seguinte consistiu na obtenção da criticidade global de cada um dos componentes constituintes da caixa redutora, tendo sido seguido o raciocínio efetuado anteriormente. Assim, os valores de NPR da tabela 6.18 correspondem à criticidade global.

Tal como se observa no diagrama representado na figura 6.15, existem três componentes, sendo todos componentes dinâmicos, que contribuem em 80% para a criticidade global do sistema. Esses componentes são os rolamentos, engrenagens e veios, sendo os componentes mais críticos.

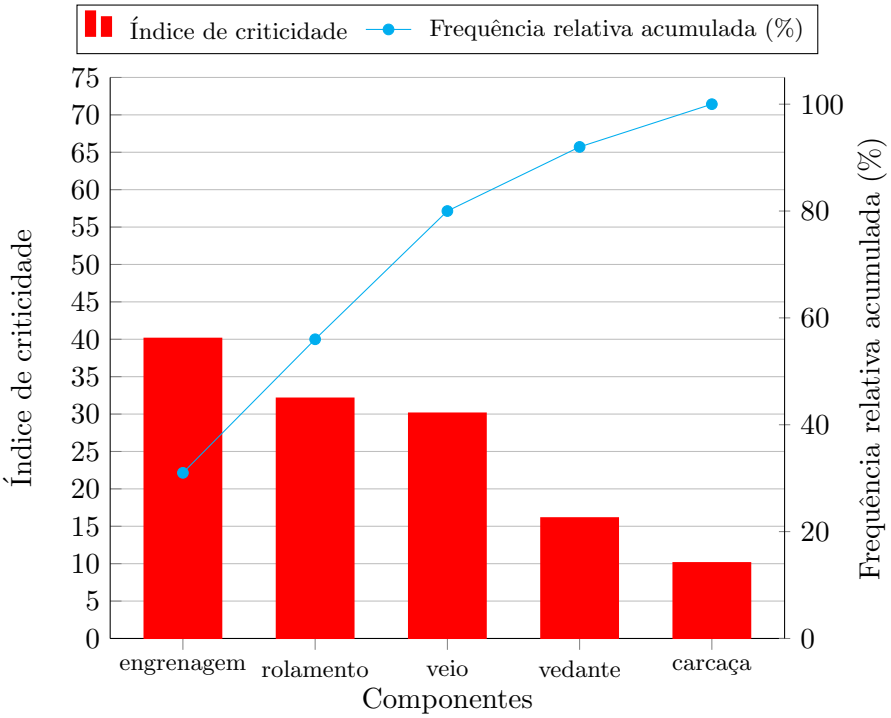


Figura 6.15: Diagrama do índice de criticidade dos componentes alvos de análise considerando os controlos atuais.

Seguidamente, analisar-se-á a influência da presença dos controlos na criticidade dos componentes. O facto de existirem atualmente mecanismos de controlo faz com que o índice de criticidade dos componentes seja menor, tal como se observa, comparando a figura 6.14 com a 6.15.

6.4 Ações recomendadas

Depois de realizada a análise FMECA é preciso considerar propostas para diminuir os NPR dos modos de falha mais críticos, classificados com criticidade moderada ou elevada. Estas propostas deverão conduzir os novos NPR, ou NPR revistos, para níveis de criticidade mais baixo. As decisões podem ser tomadas tendo em conta, unicamente, os valores de NPR dos modos de falha ou através de uma metodologia estruturada. De seguida, estabelecem-se as medidas a implementar segundo as duas maneiras, previamente evidenciadas. Posteriormente, será feita uma comparação entre as ações recomendas obtidas por técnicas diferentes.

6.4.1 Ações recomendadas segundo os valores NPR - FMECA

Utilizando unicamente os valores de NPR, facilmente se compreende que há uma necessidade de baixar os NPR dos modos de falha mais críticos, visto que a sua criticidade ainda é elevada, correspondendo a modos de falha de criticidade moderada. Uma solução seria implementar um sistema de monitorização, de forma a controlar o estado de condição dos rolamentos, engrenagens e veios, equipamentos associados aos modos de falha

mais críticos, que contribuem para a criticidade global do sistema. Relativamente aos dois modos de falha menos críticos, 4.1 e 5.1, apesar de as suas criticidades já serem baixas, pode ser implementado um controlo de fugas para melhor controlar o modo de falha 4.1 e para o modo de falha 5.1 pode ser limpar a carcaça e verificar que não há fissuras.

No entanto, uma vez que o FMECA não tem uma metodologia de resposta aos problemas colocados, de seguida aplicar-se-á o quadro de decisão do RCM. O RCM auxilia/facilita a tomada de decisões após a análise FMECA, uma vez que é uma metodologia estruturada.

6.4.2 Ações recomendadas segundo o diagrama de decisão proposto - RCM

A análise RCM é realizada partindo do princípio de que não há ações de manutenção ativas. Depois de realizada a análise, são propostas ações de manutenção que irão diminuir o risco. Compara-se as ações de manutenção que se está a propor com aquelas que já existem. Pode concluir-se que o que se está a propor é semelhante ao que ja existe. Se for o caso, não se recomenda essas ações de manutenção, visto que já se encontram implementadas.

Ao fazer esta análise realiza-se uma revisão de risco. Pode, também, concluir-se que se está a fazer manutenção a mais, isto é, a manutenção está a induzir falhas, em vez de as resolver.

6.4.2.1 Descrição do diagrama de decisão proposto - RCM

Tendo por base o diagrama de decisão da literatura, efetuaram-se algumas alterações, para contemplar a classificação da severidade e detetabilidade utilizadas para obter as tabelas FMECAS apresentadas anteriormente. Assim, partindo das classificações de severidade e de detetabilidade atribuídas aos modos de falha, procura-se com a aplicação do diagrama de decisão proposto avaliar de forma quantitativa o caráter oculto de algumas avarias, e no caso de avarias evidentes, o seu impacto ambiental e/ou segurança e as suas consequências operacionais e não operacionais.

O diagrama de decisão proposto está representado na figura 6.16. Este diagrama consiste num procedimento de decisão, que pode ser decomposto em três fases genéricas, considerando-se de uma avaria evidente, e em duas fases, tratando-se de uma avaria oculta. As três fases genéricas são as seguintes:

- verificar o caráter oculto/evidente do modo de falha;
- avaliar as consequências de uma avaria evidente;
- selecionar as tarefas de manutenção adequadas para a gestão do modo de falha.

No caso de ser uma avaria oculta, o processo de decisão restringe-se à primeira e terceira fase apresentadas anteriormente, sendo o processo de decisão composto por duas fases, como previamente mencionado.

Este diagrama é aplicado a cada modo de falha, resultando a técnica de manutenção a que o modo de falha deve ser sujeito. As condições que as técnicas de manutenção devem

possuir para serem “tecnicamente praticáveis” e “valerem a pena fazer-se” são apresentadas na tabela 4.7.

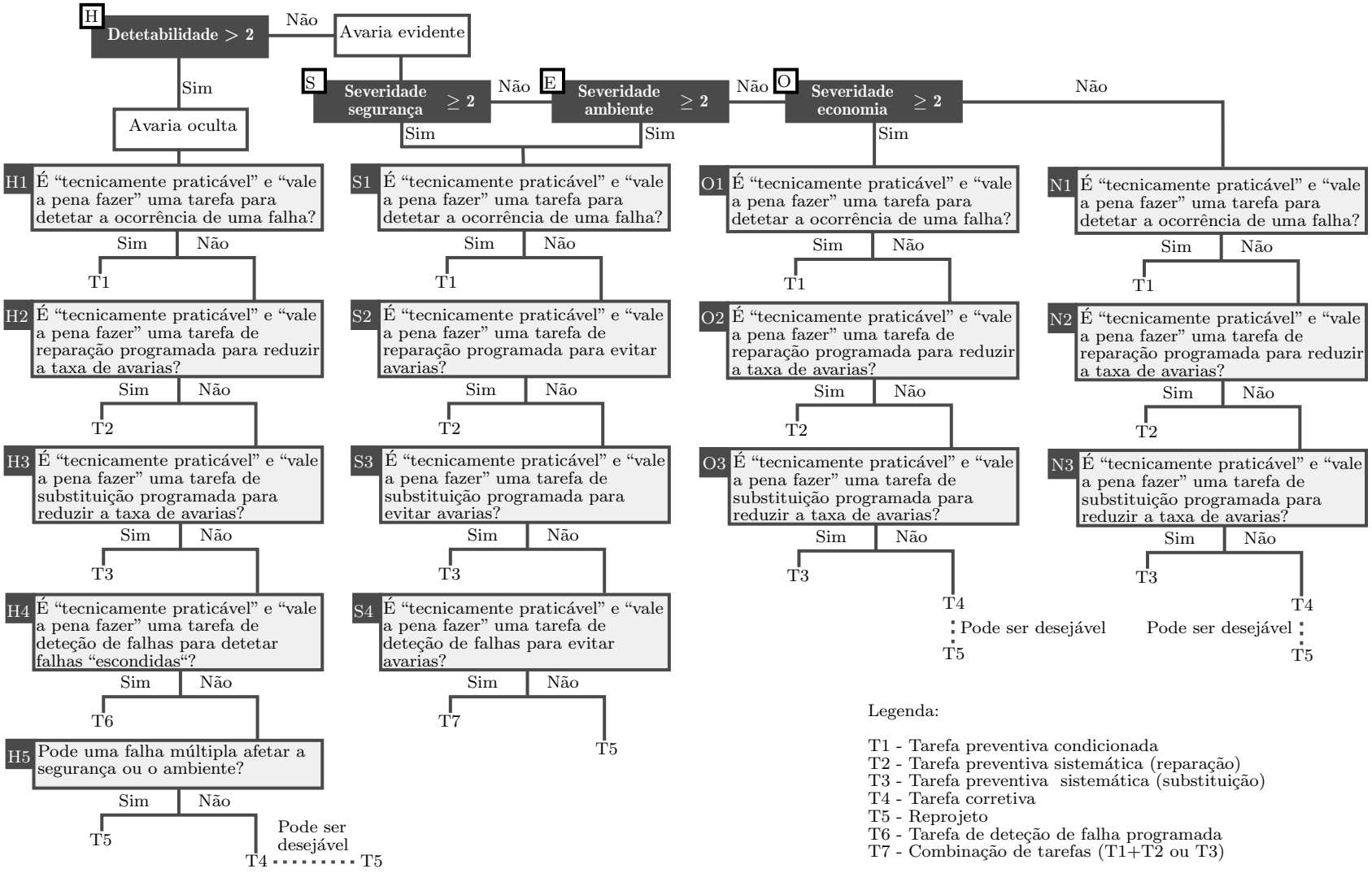


Figura 6.16: Diagrama de decisão proposto (Adaptado de [25]).

Na primeira fase esclarece-se o caráter oculto/evidente do modo de falha, sendo colocada a seguinte questão:

- detetabilidade > 2?

Da análise da tabela 6.8 pode verificar-se que os níveis de detetabilidade > 2 correspondem a uma classe de detetabilidade incerta, em função da classificação atribuída ao modo de falha ser 3. Assim, é possível estabelecer uma fronteira entre a detetabilidade/não detetabilidade de um modo de falha, ou seja, tendo em conta a resposta a questão anterior, vai ser possível classificar a avaria de evidente, caso a resposta seja não, e oculta, caso a resposta seja positiva.

Como se viu, no caso da avaria ser classificada de evidente, existe uma segunda fase na qual as consequências da avaria serão avaliadas. Será avaliado se a falha provoca consequências de segurança, ambientais e operacionais. Começa por ser colocada a seguinte questão:

- índice severidade de segurança ≥ 2?

Da análise da tabela 6.5 pode verificar-se que os níveis de severidade do efeito do modo de falha em termos de segurança ≥ 2 correspondem a situações em que existem consequências ao nível da segurança dos funcionários e/ou pessoal da manutenção. Se a resposta à pergunta anterior for positiva, o modo de falha apresenta consequências de segurança, e termina esta fase. Caso contrário, se a resposta for negativa, é porque não apresenta consequência ao nível da segurança, sendo necessário realizar a seguinte questão:

- índice severidade ambiental ≥ 2?

Da análise da tabela 6.4 pode verificar-se que os níveis de severidade do efeito do modo de falha em termos ambientais ≥ 2 correspondem a situações em que existem consequências ao nível do ambiente. Se a resposta a pergunta anterior for positiva, o modo de falha apresenta consequências ambientais, e termina esta fase. Caso contrário, se a resposta for negativa, é porque não apresenta consequência ao nível do ambiente, sendo necessário realizar a seguinte questão:

- índice severidade económico ≥ 2?

Da análise da tabela 6.6 pode verificar-se que os níveis de severidade do efeito do modo de falha em termos económico ≥ 2 correspondem a situações em que há perde económica devido a perdas operacionais. As falhas podem afetar as operações de diferentes modos, sendo que no caso em estudo, como se viu, considera-se que as falhas afetam a produção total. Isto acontece uma vez que o equipamento perante uma avaria, cessa totalmente o seu funcionamento, resultando na perda de vendas, visto que se considerou que a Continental está à plena carga. As consequências operacionais tendem a ter impactos económicos, daí serem avaliadas utilizando o índice de severidade económico. Se a resposta à pergunta anterior for positiva, o modo de falha apresenta consequências operacionais, caso contrário, se a resposta for negativa, é porque não apresenta consequência operacionais. Independentemente da resposta à pergunta anterior ser positiva ou negativa, ocorre o término desta fase.

Depois de se identificar se a avaria é oculta ou evidente (primeira fase) e de se terem analisado as consequências da avaria (segunda fase), a terceira fase consiste na seleção da natureza das tarefas de manutenção adequadas para a gestão do modo de falha em análise. A seleção da natureza da intervenção resulta das respostas encontradas para as questões apresentadas no diagrama. Para se conseguir responder é necessário saber quais são as condições que as técnicas de manutenção devem possuir para "valem a pena fazerem-se" e serem "tecnicamente praticáveis", ver tabela 4.7.

Após identificada a natureza da tarefa, elabora-se a descrição personalizada da mesma, tendo em conta o modo de falha em análise.

6.4.2.2 Aplicação do diagrama de decisão proposto

Depois de apresentado e explicado o diagrama de decisão proposto, este será aplicado aos modos de falha das caixas redutoras.

Recapitulando, foram identificados no equipamento em análise os seguintes modos de falha:

Tabela 6.20: Caracterização dos diferentes modos potenciais de falha das caixas redutoras.

MODO DE FALHA	COMPONENTE	FUNÇÃO	FALHA FUNCIONAL	MODO POTENCIAL DA FALHA
1.1	1 Rolamento	1 Suportar/ guiar os elementos rotativos	A Não suportar/ guiar os elementos rotativos	1 Não suportar/ guiar os elementos rotativos
2.1	2 Engrenagem	1 Transmitir o movimento de rotação	A Não transmitir o movimento de rotação	1 Não transmitir o movimento de rotação
3.1	3 Veio	1 Transmitir movimento e energia entre as engrenagens	A Não transmitir movimento e energia entre as engrenagens	1 Não transmitir movimento e energia entre as engrenagens
4.1	4 Vedante	1 Garantir a união e a estanquidade	A Não garantir a união e a estanquidade	1 Não garantir a união e a estanquidade
5.1	5 Carcaça	1 Acomodar os elementos da caixa redutora e conter o lubrificante	A Não acomodar os elementos da caixa redutora e não conter o lubrificante	1 Não acomodar os elementos da caixa redutora e não conter o lubrificante

Como se observa na tabela 6.20, a falha funcional coincide com o modo potencial de falha. Tal acontece, uma vez que se utilizou a análise funcional para caracterizar os modos de falha, em vez da análise estrutural.

Para aplicar o diagrama de decisão proposto é necessário ter em conta os índices das tabelas 6.12 e 6.16.

6.4.2.2.1 Modos de falha 1.1, 2.1 e 3.1

Os modos de falha dos rolamentos, engrenagens e veios apresentam um índice de detetabilidade igual a 2. Sendo assim, a resposta à primeira pergunta é negativa, caracterizando-se de modos de falha evidentes. De seguida pergunta-se se o índice de severidade de segurança é maior ou igual a 2, a resposta é negativa, uma vez que, tal com foi dito anteriormente, o índice é 1, logo a segurança dos funcionários e do pessoal da manutenção não é colocada em risco com estes modos de falha. Após esta resposta negativa, avalia-se as consequências ambientais, perguntando se o índice de severidade ambiental é maior ou igual a 2, é sendo o índice 1, concluiu-se que não existe impacto no ambiente. A próxima pergunta é se o índice de severidade económico é maior ou igual a 2, sendo a resposta positiva, ou seja, estes modos de falha têm consequências operacionais.

Percorrendo o diagrama de decisão, pergunta-se se é "tecnicamente praticável" e "vale a pena fazer" uma tarefa para detetar a ocorrência de falha, sendo a resposta positiva, conforme se irá explicar de seguida. Assim, a tarefa de manutenção é uma tarefa preventiva condicionada.

A tarefa preventiva condicionada mais adequada para a gestão de modos de falha consiste numa tarefa de monitorização da condição. Realizar a monitorização da condição do equipamento, significa intervir quando a sua condição assim o exigir, podendo essa intervenção resultar numa substituição ou reparação.

Para cada um destes três componentes, é importante monitorizar o seguinte:

- rolamento: monitorização de vibração, das partículas e da temperatura;
- engrenagem: monitorização de vibração, das partículas e da temperatura;
- veio: monitorização de vibração.

Uma vez que atualmente já se realiza a monitorização da temperatura, apenas se implementará um sistema de monitorização da vibração para os modos de falha 1.1, 2.1 e 3.1, e uma sistema de monitorização das partículas de desgaste para os modos de falha 1.1 e 2.1. A monitorização da condição será realizada continuadamente e terá uma pessoa responsável por realizar esta ação, o responsável de manutenção.

Agora, tendo em conta a tabela 4.7 explicar-se-á porque é "tecnicamente praticável" e "vale a pena fazer" a monitorização da condição. No caso de modos de falha evidentes com consequências operacionais, para uma técnica preventiva condicionada "valer a pena fazer-se" e ser "tecnicamente praticável", é necessário que, durante um período de tempo, apresente um custo inferior ao custo resultante das consequências operacionais e de reparação da falha e que seja possível identificar claramente uma falha potencial.

Começando pela segunda parte, facilmente se percebe que a realização da monitorização da condição identifica claramente uma falha potencial, uma vez que a monitorização da condição recorre a um conjunto de técnicas, que permitem receber avisos prévios da deterioração dos componentes, logo a técnica de manutenção é "tecnicamente praticável". Relativamente aos custos, a implementação de um sistema de monitorização da vibração para uma caixa redutora ronda os 5 000 euros e um sistema de monitorização das partículas de desgaste cerca de 10 000 euros. Tendo em conta os custos dos sistemas de monitorização e os custos da tabela 6.13 estabelece-se a tabela 6.21.

Tabela 6.21: Caracterização dos custos associados à reparação da falha e às consequências operacionais e dos custos da implementação do sistema de monitorização.

Modo de falha	Custo total (euros)	Custo ação manutenção (euros)
1.1	222 000	15 000
2.1	5 435 000	15 000
3.1	5 425 100	5 000

Pela tabela 6.21 verifica-se que o custo da ação de manutenção do modo de falha 1.1 e 2.1 é 15 mil euros, uma vez que necessitam de um sistema de monitorização das vibrações e das partículas de desgaste. Por sua vez, o modo de falha 3.1 apenas apresenta um custo de 5 mil euros, porque apenas necessita do sistema de monitorização da vibração.

Os custos das consequências operacionais se referem aos custos da indisponibilidade da caixa redutora, logo aos custos indiretos da tabela 6.13. Por custos de reparação da falha, consideram-se os custos diretos da tabela 6.13. Salienta-se que o custo total apresentado para cada modo de falha refere-se à ocorrência de apenas uma falha, contudo o equipamento ao longo da sua vida não terá só uma falha. Assim, como o custo total referente à existência de apenas uma falha, para cada um dos modos de falha em análise, é superior ao custo do sistema de monitorização, a técnica de manutenção "vale a pena fazer-se".

6.4.2.2.2 Modo de falha 4.1

O modo de falha dos vedantes apresenta um índice de detetabilidade igual 2. Sendo assim, a resposta à primeira pergunta é negativa, caracterizando-se de modos de falha evidentes. De seguida pergunta-se se o índice de severidade de segurança é maior ou igual a 2, sendo a resposta positiva. Assim, este modo de falha apresenta consequências de segurança.

Percorrendo o diagrama de decisão, pergunta-se se é "tecnicamente praticável" e "vale a pena fazer" uma tarefa para detetar a ocorrência de falha, sendo a resposta positiva, conforme se explicará de seguida. Assim, a tarefa de manutenção é uma tarefa preventiva condicionada.

A tarefa preventiva condicionada mais adequada para a gestão de modos de falha consiste num controlo de fugas. Este controlo de fugas, não é mais do que uma inspeção

programada, que consiste em verificar se existem ou não fugas. De notar que a inspeção é programada, mas a intervenção não, sendo a intervenção condicionada à inspeção visual. No caso dos vedantes em estudo como se tratam de vedantes de lábio, se após a inspeção visual se achar que é necessário intervir, realiza-se a substituição do vedante. Nem sempre assim, no caso dos vedantes de empanque mecânico, em vez de substituir poderia realizar-se a sua reparação.

O controlo de fugas será realizado por um técnico de manutenção com uma periodicidade de 16 semanas.

Agora, tendo em conta a tabela 4.7 explicar-se-á porque é "tecnicamente praticável" e "vale a pena fazer" o controlo de fugas. No caso de modos de falha evidentes com consequências de segurança, para uma técnica preventiva condicionada "valer a pena fazer-se" e ser "tecnicamente praticável", é necessário que a tarefa de manutenção possa dar um alerta de falha com tempo suficiente, para se conseguir evitar as consequências de segurança, e é necessário que seja possível identificar claramente uma falha potencial.

Começando pela segunda parte, facilmente se percebe que a realização da inspeção visual permite verificar se o vedante se encontra gasto ou não, logo a técnica de manutenção é "tecnicamente praticável". Para além disso, como o estado de degradação de um vedante não é um processo rápido e instantâneo, com esta ação de manutenção existe tempo para evitar as consequências de segurança, "valendo a pena fazer" esta ação.

De notar que o controlo de fugas nem sempre é a ação de manutenção selecionada para os vedantes. Poderia ser implementada uma manutenção de oportunidade, quando existissem problemas nos rolamentos, ao substituí-los tratava da substituição dos vedantes, realizando as duas ações ao mesmo tempo. Esta ação oportunística é igualmente considerada uma ação de manutenção condicionada, uma vez que está condicionada à substituição dos rolamentos.

A outra opção, seria realizar uma substituição programada dos vedantes. Esta ação de manutenção já não se considera condicionada, mas sim ação preventiva sistemática de substituição. Para chegar a esta ação seria necessário responder que não é "tecnicamente praticável" e que não "vale a pena fazer" uma tarefa para detetar a ocorrência de falha. Como a resposta seria não, a análise iria continuar e à pergunta se é "tecnicamente praticável" e "vale a pena fazer" uma tarefa de reparação programada para evitar avarias, a resposta seria não, uma vez que o vedante é de lábio. Por fim, responde-se que sim à pergunta se é "tecnicamente praticável" e "vale a pena fazer" uma tarefa de substituição programa para evitar avarias.

6.4.2.2.3 Modo de falha 5.1

O modo de falha das carcaças apresenta um índice de detetabilidade igual 2. Sendo assim, a resposta à primeira pergunta é negativa, caracterizando-se de modos de falha evidentes. De seguida pergunta-se se o índice de severidade de segurança é maior ou igual a 2, sendo a resposta positiva. Assim, este modo de falha apresenta consequências de segurança.

Percorrendo o diagrama de decisão, pergunta-se se é "tecnicamente praticável" e "vale a pena fazer" uma tarefa para detetar a ocorrência de falha, sendo a resposta positiva,

conforme se irá explicar de seguida. Assim, a tarefa de manutenção é uma tarefa preventiva condicionada.

A tarefa preventiva condicionada mais adequada para a gestão de modos de falha consiste na limpeza das carcaças e na verificação da presença de fissuras. Esta ação de manutenção, não é mais do que uma inspeção programada, que consiste em verificar se existe ou a presença de fissuras nas carcaças. A inspeção é programada, mas a intervenção não, sendo a intervenção condicionada à inspeção visual.

A ação será realizado por um técnico de manutenção com uma periodicidade de 3 anos.

Agora, tendo em conta a tabela 4.7 explicar-se-á porque é "tecnicamente praticável" e "vale a pena fazer" a limpeza das carcaças e a verificação da presença de fissuras. No caso de modos de falha evidentes com consequências de segurança, para uma técnica preventiva condicionada "valer a pena fazer-se" e ser "tecnicamente praticável", é necessário, que a tarefa de manutenção possa dar um alerta de falha com tempo suficiente para se conseguir evitar as consequências de segurança, e é necessário que seja possível identificar claramente uma falha potencial.

Começando pela segunda parte, facilmente se percebe que a realização da inspeção visual permite verificar se existem ou não fissuras nas carcaças, logo a técnica de manutenção é "tecnicamente praticável". Para além disso, como não existem avarias repentinas na carcaça, ou seja, não surgem repentinamente fissuras, com esta ação de manutenção existe tempo para evitar as consequências de segurança, "valendo a pena fazer" esta ação.

O que foi discutido ao longo dos pontos anteriores, foi materializado na folha de decisão do RCM, ver tabela 6.22.

Tabela 6.22: Folha de decisão RCM.

Sistema: caixa redutora — Data: 27/06/2020 — Página: 1 de 1

INFORMAÇÕES DE REFERÊNCIA				AVALIAÇÕES DE CONSEQ.				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	H4	H5	S4	TAREFA PROPOSTA	INTERVALO INICIAL	REALIZADO POR
MF	F	AF	MA	H	S	E	O									
1.1	1	A	1	N	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Monitorização da condição (vibração e partículas de desgaste)	Continuamente	Responsável de manutenção
2.1	1	A	1	N	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Monitorização da condição (vibração e partículas de desgaste)	Continuamente	Responsável de manutenção
3.1	1	A	1	N	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Monitorização da condição (vibração)	Continuamente	Responsável de manutenção
4.1	1	A	1	N	S	-	-	S	-	-	-	-	-	Controlo de fugas	16 semanas	Técnico de manutenção
5.1	1	A	1	N	S	-	-	S	-	-	-	-	-	Limpar e verificar que não há fissuras	3 anos	Técnico de manutenção

6.4.3 Análise das técnicas de manutenção estabelecidas

Do estudo realizado foram identificados 5 modos de falha, responsáveis por falhas da caixa redutora. A figura 6.17 ilustra a divisão das consequências dos 5 modos de falha. A partir da análise desta figura conclui-se que 60% dos modos de falha apresentam consequências operacionais e sendo que 40% dos modos de falha apresentam consequências ao nível da segurança. Todos os modos de falha são evidentes.

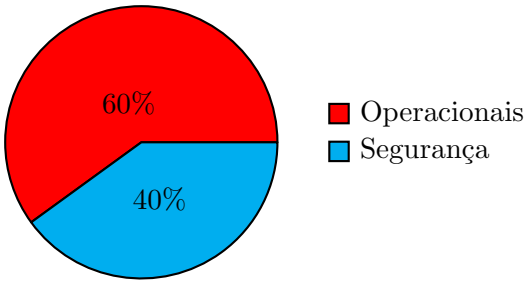


Figura 6.17: Consequência dos modos de falha.

Após aplicar o diagrama de decisão RCM aos 5 modos de falha, verificou-se que todos os modos de falha deveriam ser tratados com técnicas de manutenção condicionada. A figura 6.18 representa a divisão das categorias das técnicas de manutenção condicional a realizar aos modos de falha identificados.

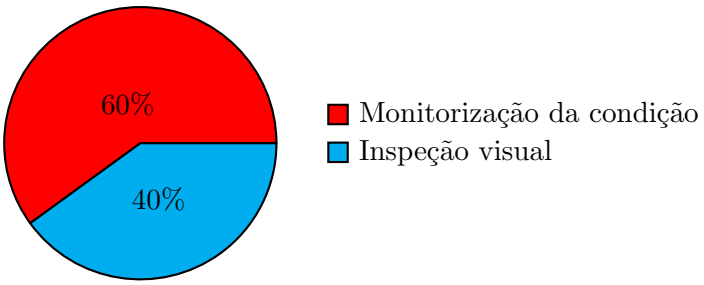


Figura 6.18: Categorias das técnicas de manutenção condicionada dos modos de falha.

De seguida serão revistas as decisões estabelecidas inicialmente com base apenas na análise FMECA com as estabelecidas com base na metodologia RCM. Inicialmente, as decisões foram estabelecidas baseando-se na criticidade, e no que se achou que deveria ser feito, não sendo utilizada nenhuma metodologia estruturada. Posteriormente, as decisões foram estabelecidas segundo uma metodologia estruturada.

As decisões propostas inicialmente, tendo em conta unicamente a criticidade dos modos de falha, foram as mesmas ações que se obtiveram com a aplicação do diagrama estruturado RCM. Apesar de, inicialmente, se terem proposto ações que poderiam ser implementadas, não foram tomadas tendo em conta uma metodologia estruturada. A análise estruturada RCM veio provar que de facto essas ações podem "ser tecnicamente praticáveis" e "valem a pena fazerem-se".

6.5 Monitorização das partículas de desgaste

6.5.1 Introdução

Com a realização da metodologia RCM concluiu-se que uma das ações a implementar era a aquisição de um equipamento de monitorização das partículas de desgaste. Inicialmente, é necessário estabelecer qual dos diferentes métodos de monitorização das partículas de desgaste será o escolhido. Após escolhido o método, tendo em conta a análise do sistema hidráulico da caixa redutora, levanta-se os requisitos que irão ser decisivos quer para a seleção do equipamento de monitorização disponível no mercado, quer para a sua montagem no circuito hidráulico existente.

6.5.2 Seleção do método de monitorização das partículas de desgaste

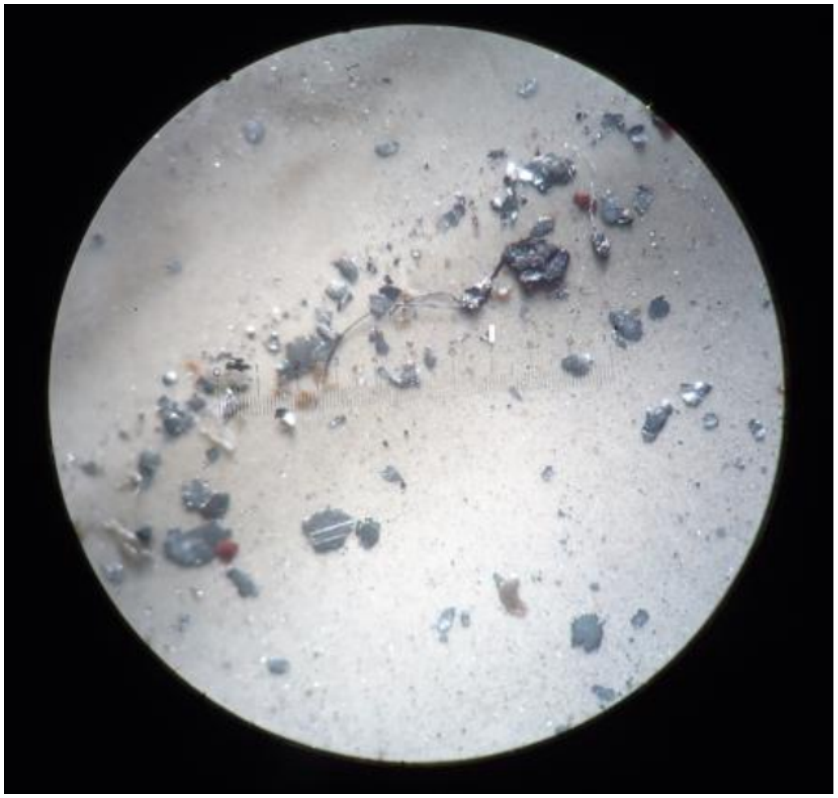
A seleção do método de monitorização das partículas de desgaste será realizada tendo em conta os seguintes fatores:

- a gama de tamanhos das partículas que cada técnica consegue detetar;
- vantagens e desvantagens de cada uma das técnicas;
- disponibilidade dos equipamentos existentes no mercado.

Relativamente ao tamanho das partículas, é importantes que a técnica selecionada consiga detetar partículas de pequena dimensão, uma vez que as partículas de pequenas dimensão podem permanecer no óleo quase indefinidamente, e, como não são tão quebradiças (facilmente desintegradas) comparativamente com as partículas maiores, a destruição pode ser contínua. Muitos estudos mostraram, com evidências convincentes, o maior dano associado a partículas pequenas. Ainda assim, a maioria dos profissionais de manutenção tem conceitos errados sobre o tamanho das partículas e os danos associados [139].

Para identificar qual o tamanho mínimo aceitável para monitorizar de uma forma eficaz as partículas de desgaste da caixa redutora, utilizaram-se os resultados de um teste *Millipore*. Este teste é utilizado como ferramenta analítica para recolher, identificar e medir partículas presentes nos óleos lubrificantes. Este teste consiste em passar uma amostra de óleo por um disco de filtro *Millipore*. As partículas cujo tamanho excede a dimensão dos poros das membrana serão recolhidas e, posteriormente, observadas ao microscópico. Como a caixa redutora alvo do estudo está inserida numa linha de produção recente, este teste ainda não foi realizado. Deste modo, utilizar-se-ão os resultados do teste efetuado na caixa redutora do andar superior da linha de produção 11, que apesar de não ser exatamente igual à caixa redutora em estudo, está sujeita às mesmas condições de trabalho. Assim, é aceitável utilizar os dados recolhidos como se fosse da caixa redutora em análise.

Na figura 6.19 observam-se as imagens microscópicas do referido teste. A ampliação é de 100 vezes e a quantidade de óleo da amostra foi 25 ml. Relativamente à escala, uma divisão corresponde a 14 µm e os poros da membrana têm 1,2 µm. Isto significa que todas as partículas que se observam nas imagens microscópicas têm pelo menos 1,2 µm.



(a)



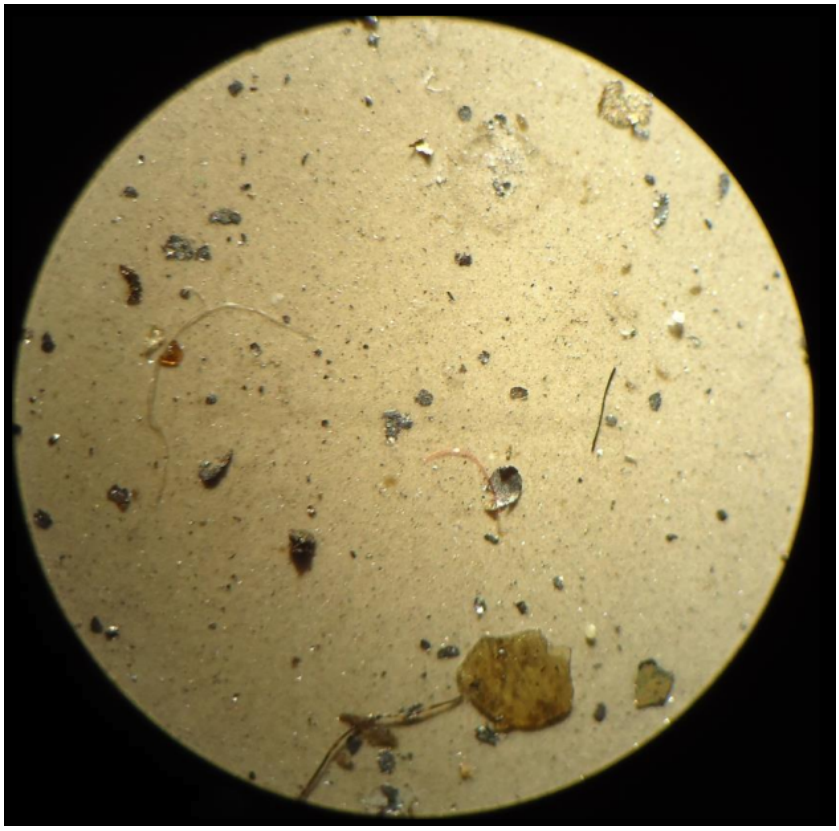
(b)



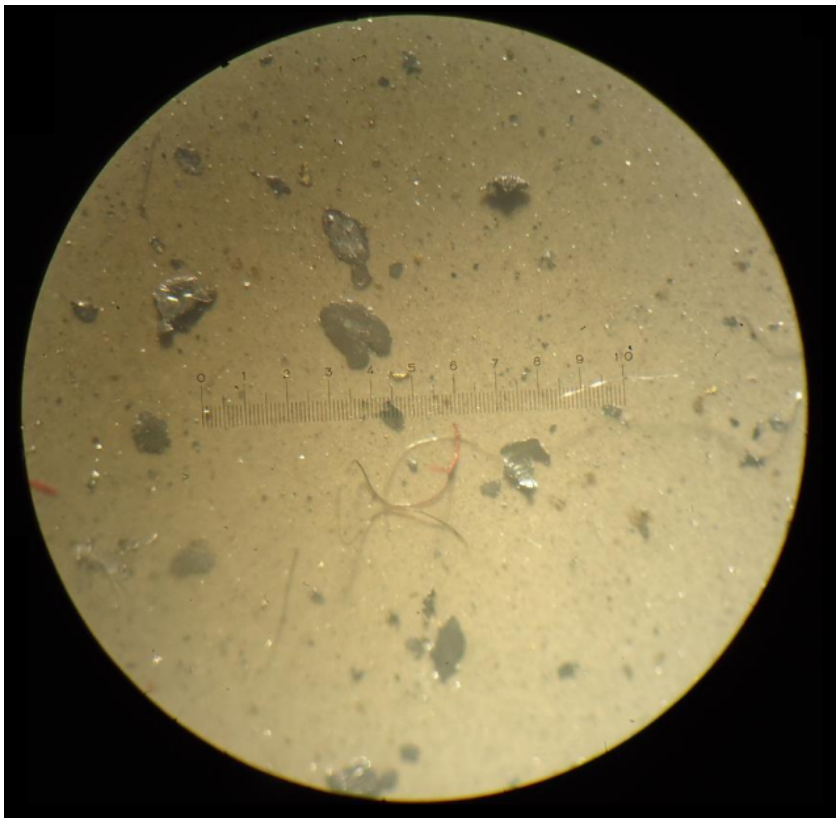
(c)



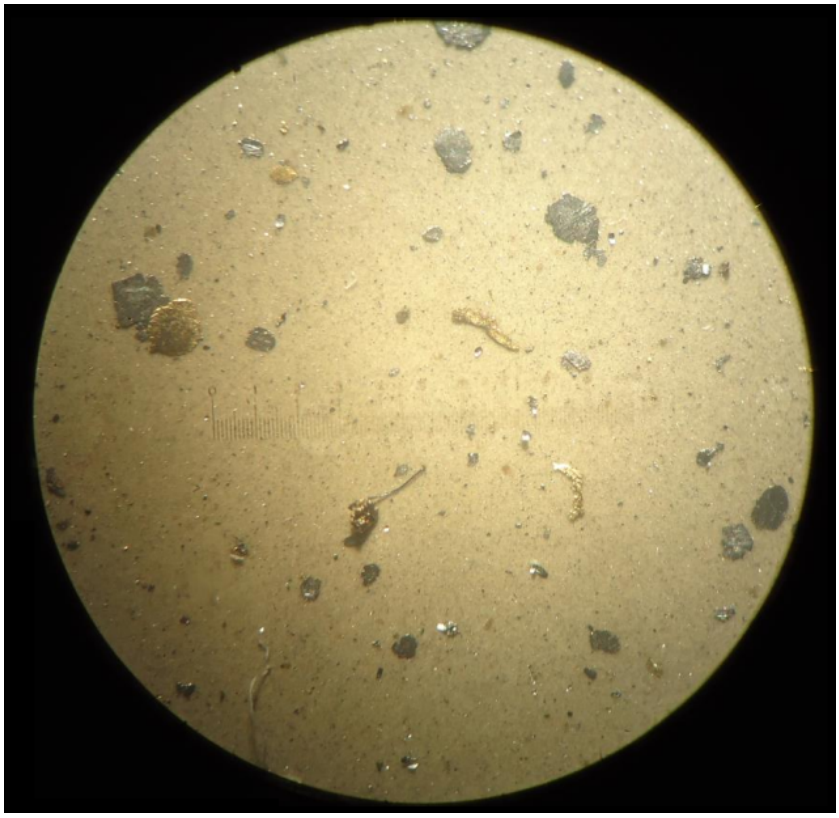
(d)



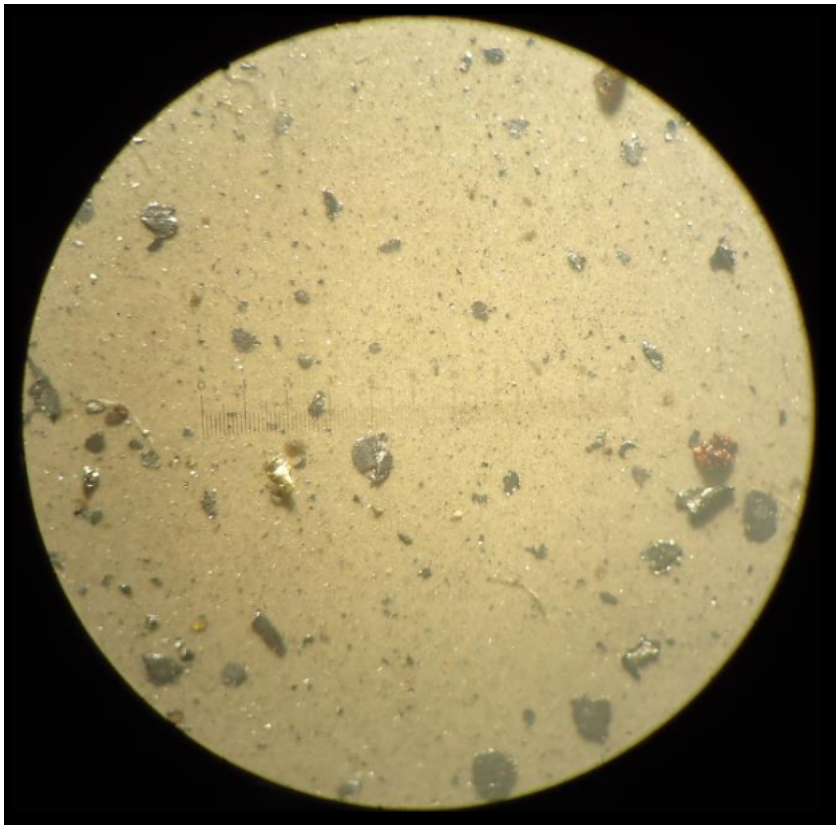
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 6.19: Imagens microscópicas do teste *Millipore*.

Analisando as imagens microscópicas verifica-se uma grande contaminação por partículas metálicas. As partículas de desgaste metálicas amarelas são verificadas em quantidades apreciáveis, assim como um grande número de outras partículas metálicas, sílica, fibras e alguns óxidos metálicos. Assim, observam-se sinais de corrosão em algumas partículas metálicas, o que indica a presença de água. Para além disso, observa-se um grande número de partículas brilhantes de pequena dimensão, que parecem ser recentes e que estão em processo de crescimento. Deste modo, tendo em conta este teste, verifica-se que há uma necessidade de monitorizar as partículas de tamanhos muito reduzidos, mas também partículas de grande dimensão, uma vez que tal como se observa na figura, obtêm-se partículas superiores a 20 µm.

De acordo com a figura 5.26 o desgaste é considerado normal quando a maioria das partículas apresentam um tamanho compreendido entre 0.1 e 1 µm. As partículas maiores podem chegar a ter no máximo 10 µm. Assim, com base na literatura conclui-se que seria importante selecionar uma técnica de monitorização das partículas capaz de detetar partículas muito pequenas, preferencialmente partículas superiores a 1 µm, o que foi também comprovado com o teste *Millipore*.

Mesmo sabendo que os sistemas de engrenagens são os sistemas mais robustos e tolerantes em termos da presença de partículas no contacto, todas as partículas de desgaste geradas em rolamentos são prejudiciais ao seu bom funcionamento. No entanto, o tamanho e a natureza metalúrgica das partículas que entram num contacto de engrenamento (rolamento e escorregamento), são fatores determinantes do dano causado nas suas superfícies. Assim, não se pode isolar o fator tamanho e definir a partir do qual se torna perigoso. Por exemplo, duas partículas de 2 µm, sendo uma de liga de aço e outra de liga de cobre, se entrarem no contacto, a de cobre será esmagada e deformada provocando um dano específico (indentação e fragilização da superfície), enquanto que a de aço poderá causar um dano mais abrasivo.

Para além do tamanho e natureza da partícula, há também a quantidade, muitas partículas pequenas podem ser mais perigosas que poucas partículas grandes, pois estas não conseguem entrar no contacto.

Resumindo, para a questão do tamanho das partículas a monitorizar não existe uma resposta concreta em termos de tamanhos considerados "perigosos" para as caixas redutoras. Muitos outros fatores contribuem para que as partículas de um rolamento sejam ou não perigosas. No entanto, apesar de não existir um valor crítico estabelecido, é preferencial que a monitorização se realize a partir do mais baixo possível tamanho das partículas e que monitorize também partículas de grande dimensão.

O método de monitorização das partículas de desgaste selecionado tem que permitir realizar uma monitorização em tempo real das partículas. De facto, é um requisito, uma vez que a análise em laboratório leva tempo e, durante esse tempo, a máquina pode ser danificada. Um estudo revelou que 50% das análises *off-line* não encontraram problemas, 5% detetaram problemas sérios e os restantes 45% das análises realizadas mostraram falha iminente, ver figura 6.20 [206].

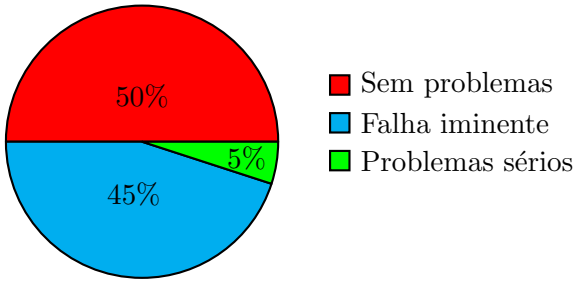


Figura 6.20: Resultados das análises *off-line*.

Para além disso, nunca se pode ter certeza de que o óleo amostrado é representativo de todo o sistema de lubrificação. Várias técnicas de amostragem são utilizadas na tentativa de adquirir a melhor amostra, mas ainda existe a possibilidade de que a amostra coletada não seja a mais representativa do sistema. Além disso, quando uma amostra é coletada, é difícil garantir que nenhuma contaminação externa ocorre durante o procedimento de amostragem, ou durante a análise em laboratório. Finalmente, a amostragem e análise *off-line* de óleo podem ser caras [206].

Assim, para a técnica de análise de partículas de desgaste que for selecionada tem de existir um equipamento disponível no mercado que permita realizar monitorização *on-line*/*in-line*.

Tendo em conta o que foi dito, estabelecem-se dois requisitos:

- monitorização ter de se realizar *on-line*/*in-line*;
- necessidade de monitorizar, para além das partículas de grande dimensão, as partículas de pequena dimensão, preferencialmente a parir de 1 µm.

As diferentes técnicas de análise de desgaste, conforme verificado na literatura, são:

- Espectroscopia elementar;
- Densidade ferrosa
  - Ferrografia de leitura direta;
- Contagem de partículas;
- Espectrometria de Fluorescência de Raios-X;
- Ferrografia analítica;
- LaserNet Fines.

A Espectroscopia elementar não pode ser utilizada, uma vez que não consegue detetar partículas de desgaste com tamanho superior a 3 ou 8 µm, dependendo do instrumento utilizado. E, na caixa redutora em análise podem existir partículas com dimensão superior, tal como se viu nas imagens microscópicas do teste *Millipore*.

A técnica de densidade ferrosa, mais concretamente a Ferrografia de leitura direta também não pode ser utilizada, uma vez que apesar de ser utilizada na análise de óleo

para sistemas com grandes quantidades de metais ferrosos, o teste está limitado a partículas magnéticas e não indica problemas com componentes não ferrosos. Para além disso, as partículas ferrosas oxidadas também não seriam detetadas, uma vez que não podem ser magnéticas, embora ainda sejam indicativas de desgaste. Não se encontrou nos fabricantes de equipamentos de monitorização de óleo, um equipamento que permitisse realizar a monitorização *on-line/in-line*.

A Espectrometria de Fluorescência de Raios-X não pode ser utilizada, uma vez que não podem ser contabilizadas partículas muito pequenas que emitem radiação abaixo do limite de detecção do instrumento. Para além disso, os fornecedores contactados não tinham nenhum equipamento que utilizasse esta técnica.

A ferrografia analítica é uma técnica bastante mais completa, comparativamente com as outras já abordadas, uma vez que é capaz de identificar partículas de desgaste, sua composição e origem. No entanto, apresenta algumas limitações, que invalidam a sua utilização, nomeadamente, o facto de ser um método caro, que depende do conhecimento do analista, exige muito tempo e requer conhecimento muito detalhado e específico. Para além disso, não existem no mercado equipamentos capazes de realizar monitorização *on-line/in-line*. A ferrografia analítica não pode ser utilizada para analisar diariamente o óleo da caixa redutora, mas pode ser utilizada quando há suspeitas de problemas de desgaste com base no resultado do teste selecionado para este caso prático.

A técnica LaserNet Fines apesar de detetar partículas maiores que 4 µm, não pode ser utilizada, uma vez que apenas recentemente começou a ser utilizada por laboratórios comerciais de análise de óleo e, como tal, ainda não existe um equipamento disponível no mercado capaz de realizar a monitorização *on-line/in-line*.

Assim, por exclusão de parte, terá que ser a contagem de partículas o método de análise de desgaste selecionado. E, de facto, cumpre ambos os requisitos, porque existem no mercado equipamentos capazes de realizar a monitorização *on-line/in-line*, e é uma técnica que deteta o início do desgaste severo, logo deteta partículas muito pequenas, assim como partículas de grande dimensão. Outra vantagem desta técnica é que deteta partículas ferrosas e não ferrosas.

6.5.3 Contadores de partículas disponíveis no mercado

Existem diferentes tipos de contadores de partículas disponíveis no mercado, devido a uma variedade de fornecedores deste tipo de equipamentos. Os fornecedores que foram contactados para a realização deste trabalho foram os seguintes:

- Hydac;
- Filtertechnik;
- Parker;
- Pamas;
- Prüftechnik.

Tendo em conta as informações recolhidas através do contacto com os fornecedores e dos catálogos dos equipamentos, presentes no anexo D, foi possível construir a tabela 6.23.

Tabela 6.23: Comparação entre os diferentes contadores de partículas.

	Hydac			Filtertechnik		Parker		Pamas	Prüftechnik
	MCS 15	MCS 14	MCS 13	PC9001-31/61	PC9001-21/51	IPD	MWDS	S50	WEARSCANNER
caudal (l/min)	10-200	2-40	0.4-8	50-500 $\cdot 10^{-3}$	2.8-45.4	40-140* $\cdot 10^{-3}$	1.3-9	5-50 $\cdot 10^{-3}$	0.1-40
viscosidade (cSt)	máx. 1000			2-424		1-500		máx. 1000	máx. 1000
Pressão de operação (bar)	máx. 20			1-500		2-420	máx. 20	0.2-15	máx. 16
Temperatura do fluido (°C)	-40 a 85			-10 a 60		0 a 85	-20 a 85	máx. 60	-20 a 80
Temperatura ambiente (°C)	-40 a 70			0 a 60		-20 a 60	-20 a 70	máx. 40	-20 a 80
Tamanho de partículas ferrosas (µm)	>200	>100	>70	4, 6, 14, 21		4, 6, 14	>40	4, 6, 10, 14, 21, 25, 38, 70	>200
Tamanho de partículas não ferrosas (µm)	>550	>300	>200				>135		
Tipo de óleo	sintético/mineral			sintético/mineral		sintético/mineral	sintético	sintético/mineral	sintético/mineral
Tipo de contador	indutivo			bloqueio por luz		bloqueio por luz	indutivo	bloqueio por luz	indutivo
Presença de água	N			N		S	N	N	N
Software	S			S		N	S	S	S

* caudal ótimo é de 60 ml/min

Tal como se observa na tabela 6.23 vão ser comparados nove contadores de partículas, com características muito distintas. Nas figuras 6.21, 6.22, 6.23, 6.24 e 6.25 observam-se os diferentes contadores em análise.

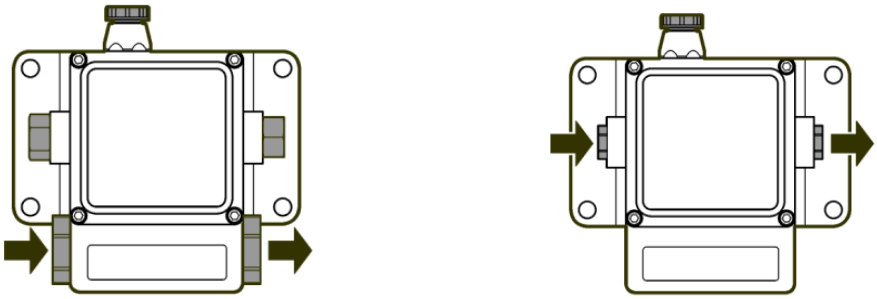


(a) MCS 13 (b) MCS 14 (c) MCS 15

Figura 6.21: Contadores Hydac (Adaptado de [207]).



(a) PC9001



PC9001-21/51 PC9001-31/61

(b) Representação esquemática dos diferentes modelos PC9001

Figura 6.22: Contadores Filtertechnik (Adaptado de [208; 209]).



(a) IPD (b) MWDS

Figura 6.23: Contadores Parker (Adaptado de [210; 211]).



Figura 6.24: Contador Pamas - S50 (Adaptado de [212]).



Figura 6.25: Contador Prüftechnik - WEARSCANNER (Adaptado de [213]).

A comparação entre os diferentes contadores de partículas é realizada nos seguintes tópicos:

- caudal (l/min): caudal de óleo admissível que pode passar pelo contador de partículas;
- viscosidade (cSt): viscosidade aceitável do óleo;
- pressão de operação (bar): pressão do óleo quando passa pelo contador de partículas;
- temperatura do fluido (°C): temperatura do óleo quando passar pelo contador de partículas;
- temperatura ambiente (°C): temperatura do ambiente em volta do contador de partículas;
- tamanho de partículas ferrosas (µm): dimensão a partir da qual as partículas ferrosas começam a ser monitorizadas pelo contador de partículas;
- tamanho de partículas não ferrosas (µm): dimensão a partir da qual as partículas não ferrosas começam a ser monitorizadas pelo contador de partículas;

  - quando o contador de partículas não distingue as partículas ferrosas das não ferrosas, as duas células anteriores convergem numa, onde se indicam as diferentes classes de monitorização de partículas;
- tipo de óleo: tipo de óleo em que o contador de partículas pode funcionar, mineral e/ou sintético;
- tipo de contador: mecanismo de funcionamento do contador de partículas, bloqueio por luz, bloqueio por poros ou indução.
- presença de água: se o contador de partículas consegue ou não detetar a presença de água no óleo (S- sim, N- não);
- *software*: se existe ou não um *software* capaz de observar os dados capturados pelo contador de partículas no computador (S- sim, N- não).

6.5.4 Seleção do contador de partículas

A seleção do contador de partículas irá ser feita com base nos dados da tabela 6.23.

Como se viu anteriormente, existe um requisito referente a detetar pequenas partículas. Assim, excluíram-se os três contadores da Hydac (MCS 15, MCS14 e MCS13), o contador MWDS da Parker e o contador da Prüftechnik (WEARSCANNER), uma vez que estes contadores só detetam partículas de grandes dimensões. Dos nove contadores iniciais só restam quatro.

O contador de partículas vai ser inserido no circuito hidráulico existente da caixa redutora. Uma vez que o objetivo do contador de partículas é monitorizar as partículas, este deve ser colocado antes da unidade de filtros. Assim, o contador de partículas pode ser colocado na posição A (monitorização *in-line*) ou B (monitorização *on-line*), ver figura 6.26. No anexo E apresentam-se, com algum detalhe, exemplos de circuitos hidráulicos com os contadores de partículas colocados na posição A e B.

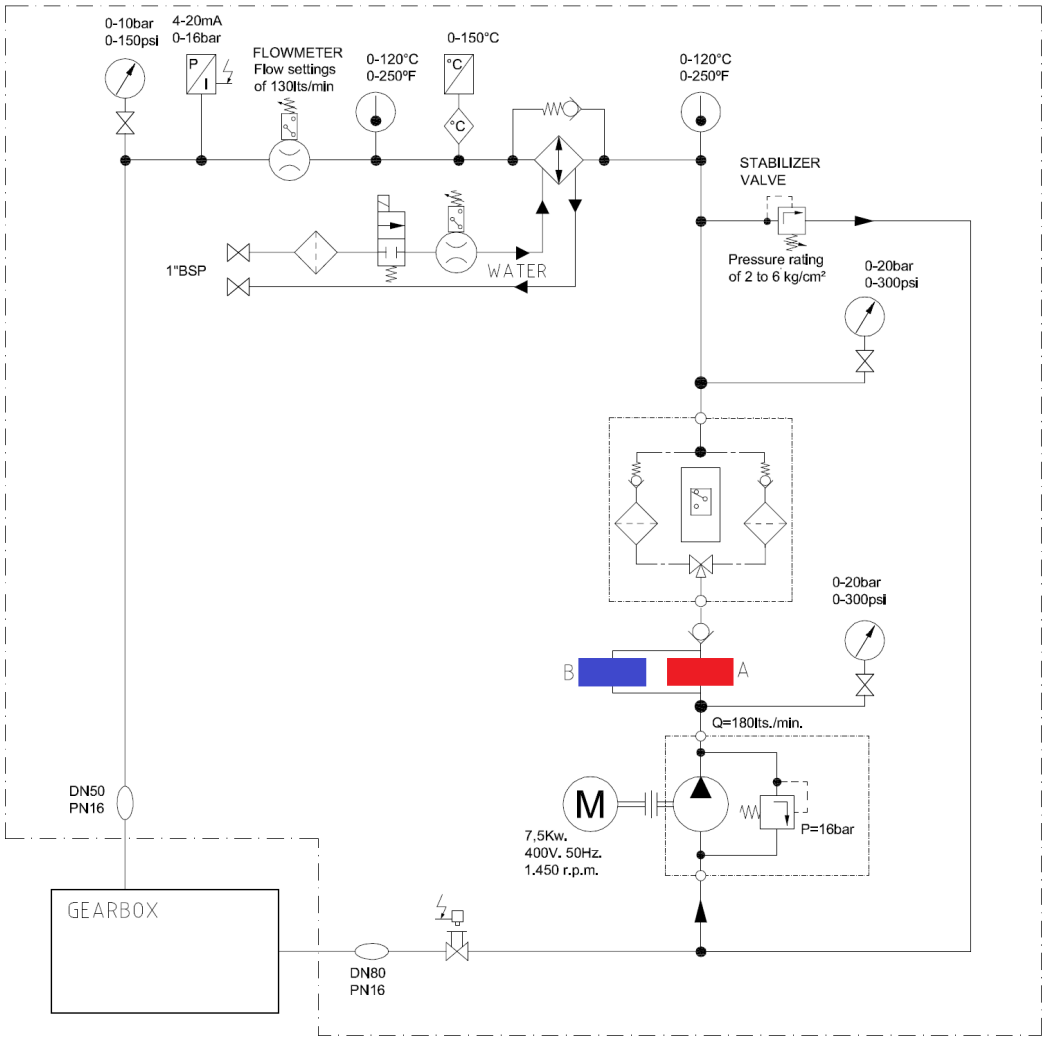


Figura 6.26: Diferentes posições do contador de partículas: A- em série e B- em paralelo.

Na posição A o contador de partículas é colocado em série, sendo necessário que o contador de partículas admita um caudal mínimo de 180 l/min, o que não é o caso, visto que os restantes 4 contadores têm caudais admissíveis inferiores a 180 l/min. Assim, o contadores de partículas terá que ser colocado em paralelo, posição B.

Com o contador de partículas em paralelo é necessário que este aceite uma pressão de 16 bar, visto que é a pressão máxima que pode existir à saída da bomba, conforme se verificou no início deste capítulo. Assim, o contador S50 da Pamas não poderá ser utilizado, uma vez que apresenta uma pressão de operação máxima admissível de 15 bar. Dos nove contadores iniciais apenas restam três, os dois da Filtertechnik e o IPD da Parker.

Relativamente aos contadores da Filtertechnik, não se vai considerar os PC9001-21/51, uma vez que, como se viu, não têm um caudal suficiente para serem utilizados em série com o circuito existente, e ao utilizar em paralelo, utiliza-se os PC9001-31/61, uma vez que apresentam um caudal inferior aos contadores PC9001-21/51.

Comparando os contadores PC9001-31/61 da Filtertechnik com o IPD da Parker, ambos os contadores cumprem o requisito de temperatura do fluido em operação, visto que

a temperatura do fluido no zona do circuito hidráulico onde o contador de partículas será colocado nunca excede os 60°C e é superior a 40°C. O óleo utilizado é Omala S4 GX ISO 320 que apresenta uma viscosidade de 312.7 cSt a 40°C [150]. Tendo em conta a figura 6.27 verifica-se que a viscosidade diminui com o aumento da temperatura e, como se viu, a temperatura do óleo no ponto onde o contador será inserido varia entre 40°C e 60°C. Assim, a viscosidade é no máximo 312.7 cSt, sendo no mínimo 135 cSt. Este valor de viscosidade é obtido com auxílio da figura 6.27 para uma temperatura de 60°C e um óleo ISO 320. Assim, o requisito da viscosidade é cumprido em ambos os casos, uma vez que este intervalo de viscosidade (135-312.7 cSt) está compreendido nos intervalos admissíveis de viscosidade de ambos os contadores. Os dois contadores cumprem o requisito referente à pressão, uma vez que a pressão máxima que o contador de partículas tem que suportar é 16 bar. Relativamente à temperatura ambiente, raramente desce abaixo dos 20°C e ultrapassa os 30°C, sendo assim, ambos os contadores cumprem este requisito. Em relação ao tamanho das partículas é bastante semelhante, uma vez que ambos monitorizam para os tamanhos 4, 6 e 14 µm. A diferença é que os contadores da Filtertechnik monitorizam para partículas maiores do que 21 µm. Ambos os contadores podem monitorizar óleo sintético ou mineral. As principais diferenças são as seguintes: os contadores PC9001-31/61 não conseguem detetar a presença de água no óleo, enquanto que o IPD consegue e, os contadores PC9001-31/61 apresentam um *software* que permite a visualização dos valores medidos num computador, enquanto que o IPD não.

Assim, optou-se por utilizar o contador da Filtertechnik, uma vez que é importante conseguir visualizar continuadamente os dados num computador e garantir que os dados sejam devidamente guardados, para análises futuras. Com o IPD seria possível, após um trabalho demoroso e complexo, estabelecer uma ligação ao computador, mas nunca se iria conseguir guardar esses dados. Apesar dos contadores PC9001-31/61 não conseguirem detetar a presença de água, existem equipamentos que podem ser adquiridos de forma a realizar essa atividade. Deste modo, os contadores PC9001-31/61 são a melhor opção para o caso em estudo.

De seguida é necessário escolher entre o contador PC9001-31 e o PC9001-61, ver figura 6.28. A única diferença é que o contador PC9001-61 apresenta um ecrã integrado no próprio contador, o que permite observar os dados medidos pelo mesmo, localmente, ou seja, no sítio onde este contador está colocado. Este ecrã não é fundamental, uma vez que a ideia é monitorizar os dados medidos pelo contador de partículas através do computador, com apoio do *software*, e não através do ecrã presente no contador de partículas. Para além disso, o contador PC9001-31 é mais barato do que o PC9001-61. A diferença não é significativa na compra de apenas um contador, mas visto que a Continental Mabor tem 12 linhas de produção, sendo nove linhas de misturação simples (um andar de misturação) e três têm dois andares de misturação, existem no total 15 caixas redutoras semelhantes à que se está a analisar, e como tal, serão necessários 15 contadores de partículas. Os custos dos contadores de partículas estão apresentados na tabela 6.24.

Tabela 6.24: Custos de aquisição dos contadores PC9001-31/61.

Contadores	PC9001-31	PC9001-61
Custo por unidade (euros)	1 507,41	1 814,48
Custo por unidade após desconto (euros)	1 130,60	1 360,86
Custo total (euros)	16 959	20 412,9

O custo por unidade após desconto resulta de um desconto de 25% relativamente ao valor inicial, e deve-se ao facto da Continental Mabor adquirir 15 unidades. O custo total representa o custo das 15 unidades.

Assim, pelos motivos atrás evidenciados, optou-se pela aquisição do contador PC9001-31.

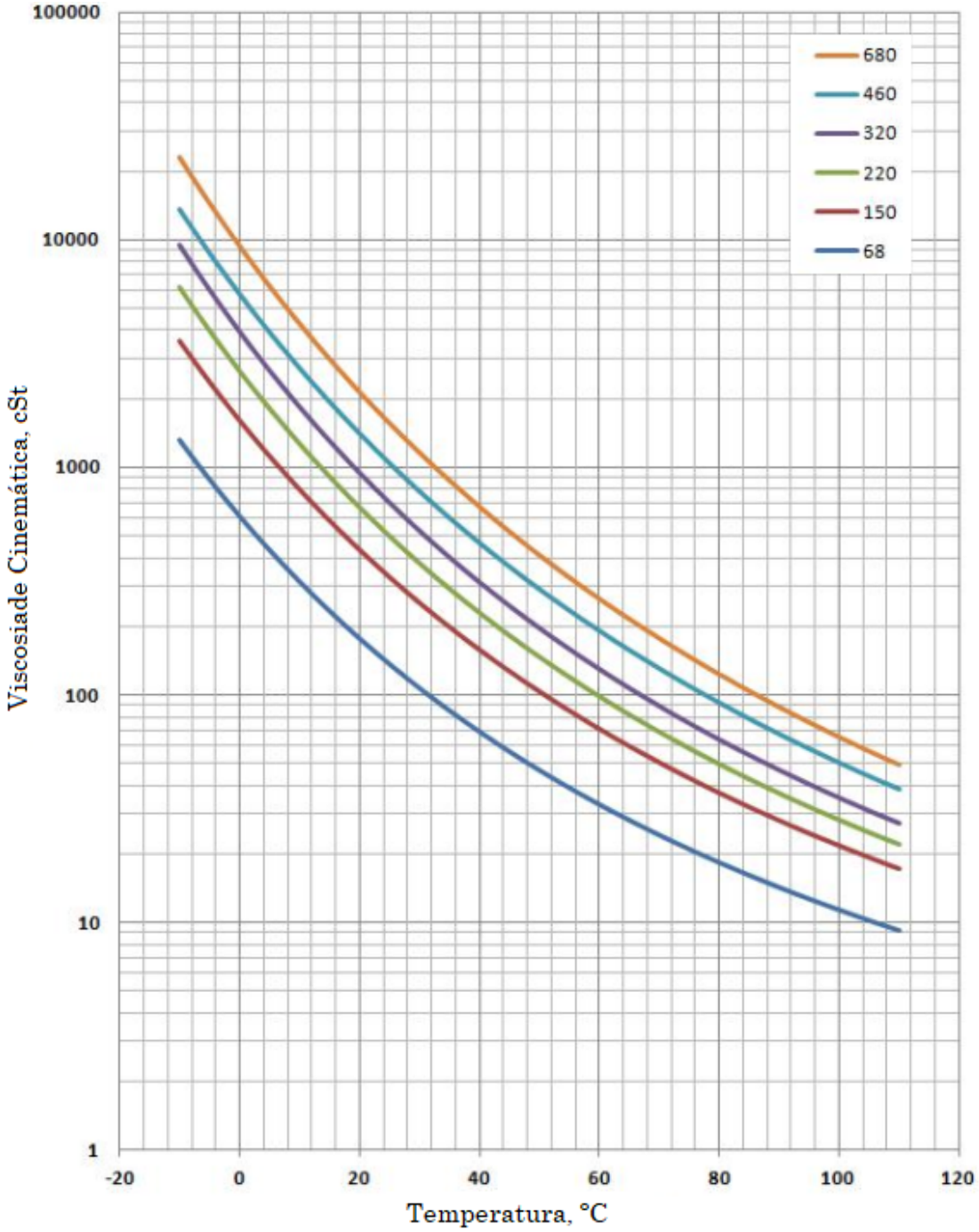
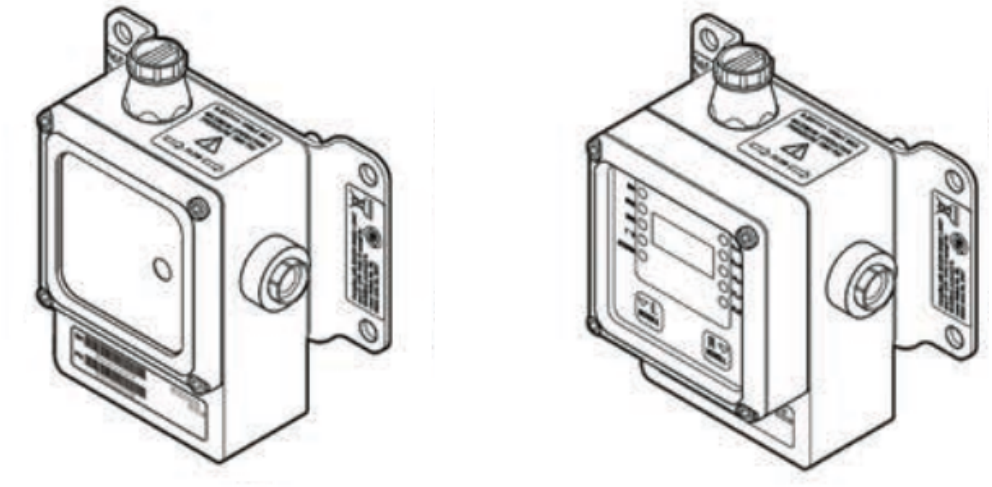


Figura 6.27: Viscosidade cinemática em função da temperatura para óleos Omala S4 GX (Adaptado de [150]).



(a) PC9001-31 (b) PC9001-61

Figura 6.28: Contadores Filtertechnik PC9001 (Adaptado de [209]).

6.5.4.1 Sistema de contagem de partículas

Depois de selecionado o contador de partículas, não basta colocá-lo na posição B, de acordo com a figura 6.26. É necessário realizar alterações no sistema de lubrificação atual, para garantir o correto funcionamento na presença do contador de partículas.

Na figura 6.29 apresenta-se um esquema da implementação do contador de partículas no sistema de lubrificação da caixa redutora. Tal como se observa na imagem o sistema de contagem de partículas é constituído pelos seguintes equipamentos:

- contador de partículas (componente número 1);
- válvula agulha (componente número 2);
- válvulas de esfera (componente número 3);
- válvula de retenção com mola (componente número 4).

As duas válvulas de esfera são utilizadas devido ao *bypass*. Se ocorrer algum problema no circuito em paralelo, estas válvulas fecham-se, e deste modo o circuito de lubrificação da caixa redutora pode continuar a funcionar normalmente. A única diferença é que deixa de ser possível monitorizar as partículas presentes no óleo lubrificante. A válvula de retenção com mola deve ser definida para 5 bar, de forma a criar uma pressão diferencial que causará um fluxo adequado através do contador de partículas. Depois do contador de partículas, coloca-se uma válvula agulha de forma a ser possível controlar o fluxo.

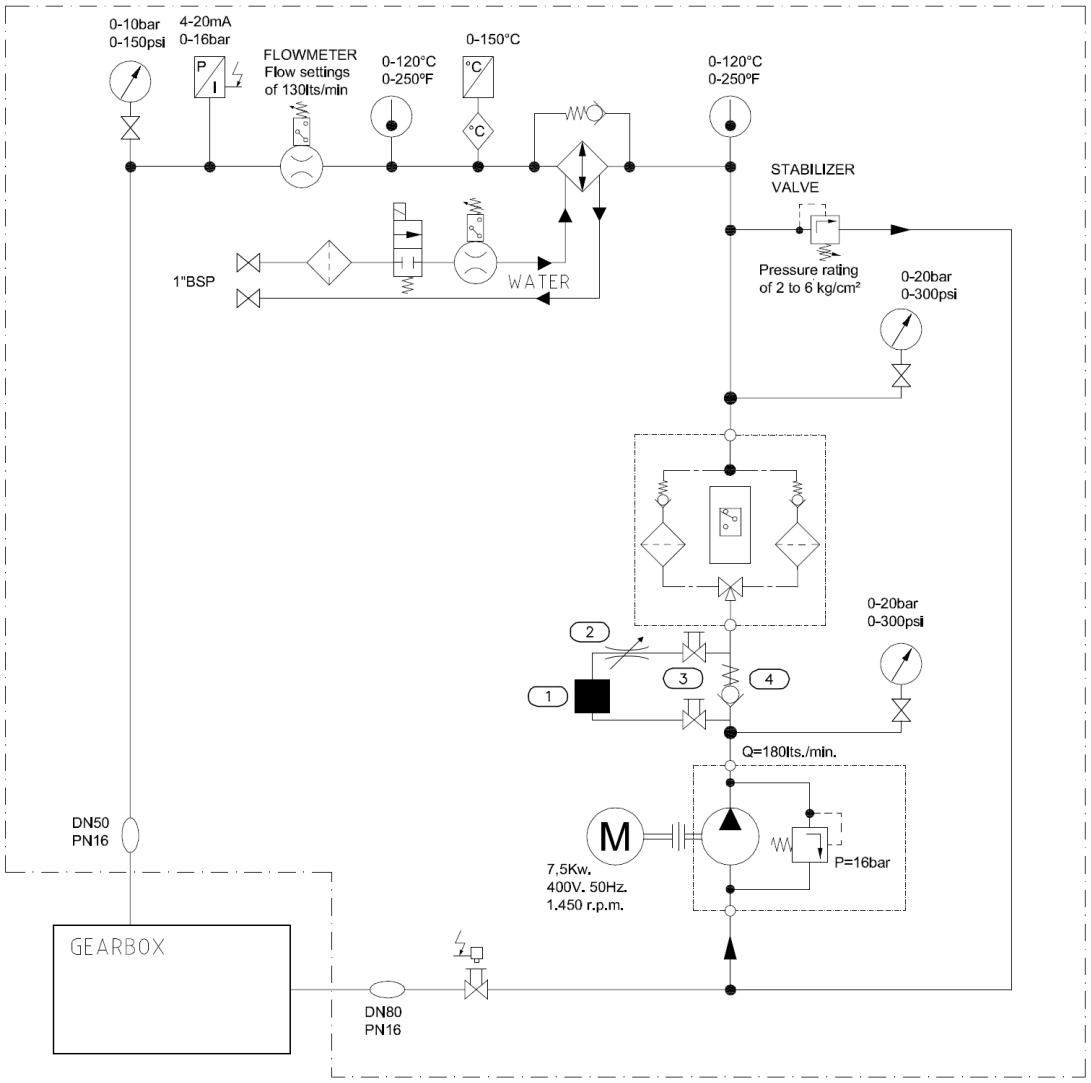
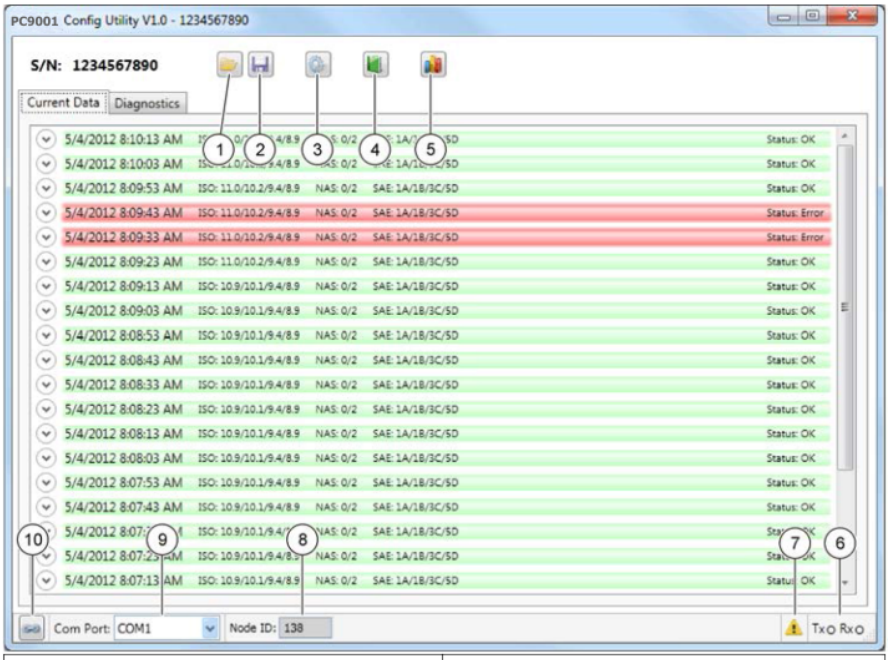


Figura 6.29: Esquema do sistema de contagem de partículas.

6.5.4.2 *Software*

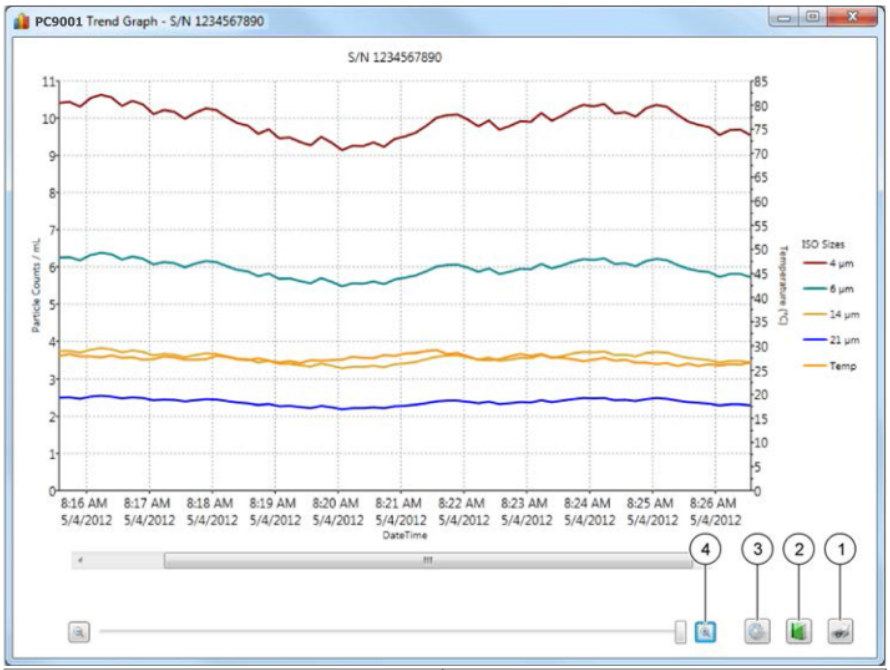
Como previamente observado, uma das razões que contribuiu para a seleção do contador de partículas PC9001-31 da Filtertechnik foi o facto deste apresentar um *software* que permite visualizar os valores medidos pelo contador. Na figura 6.30 apresenta-se a interface principal deste *software*. Nesta imagem é possível visualizar as medições realizadas, verificando se estão de acordo com os parâmetros estabelecidos (cor verde) ou se estão fora dos mesmos (cor vermelha).

Este *software* permite criar gráficos e comparar os dados que foram recolhidos anteriormente. Para criar um gráfico basta clicar no ícone número 5 da imagem 6.30 e uma nova janela será aberta, figura 6.31. É possível alterar as opções do gráfico, clicando no ícone número 3 da imagem 6.31. Na figura 6.32 é possível verificar as alterações que podem ser realizadas.



1	Ícone Instalar definições	6	Transmitir e receber indicações
2	Ícone salvar definições	7	Indicadores de erro
3	Ícone editar definições	8	Número ID do nó
4	Ícone gravar dados	9	Número *Com Port*
5	Ícone gráficos de dados	10	Botão Conetar/Desconectar

Figura 6.30: Interface principal do *software* do contador de partículas (Adaptado de [209]).



1	Ícone de impressão de gráfico	3	Ícone de definições de gráfico
2	Ícone de instalação de dados a partir de ficheiro	4	Barra de deslizamento

Figura 6.31: Gráfico da evolução da contagem de partículas obtido com o *software* (Adaptado de [209]).

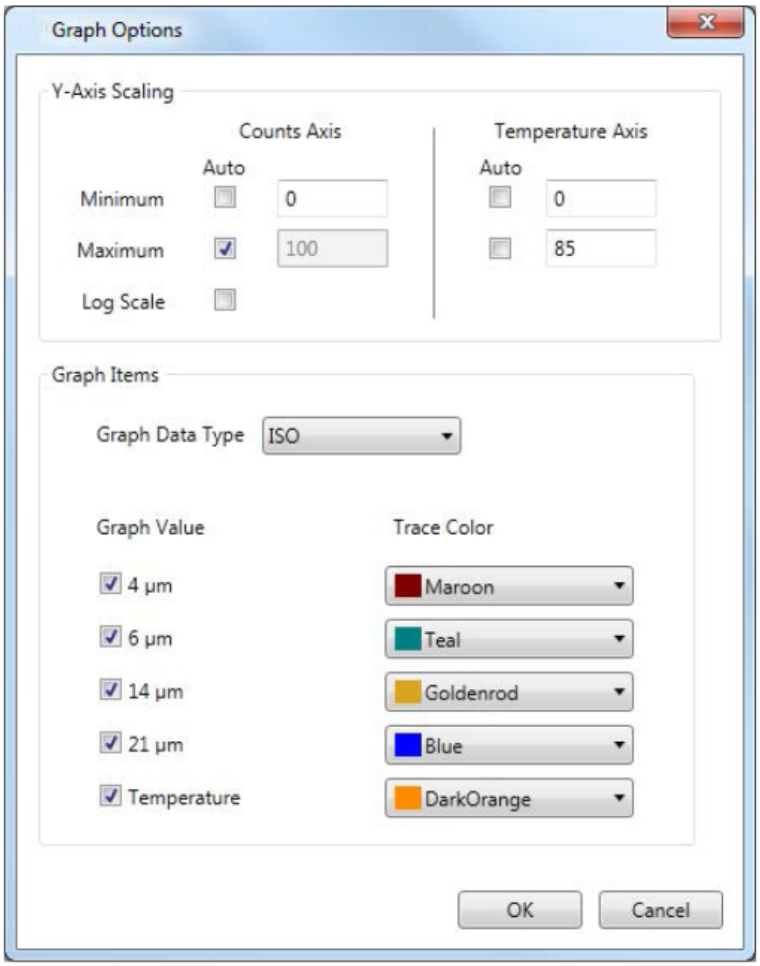


Figura 6.32: Opções de visualização do Gráfico da evolução da contagem de partículas obtido com o *software* do contador de partículas (Adaptado de [209]).

Para além disso, o *software* permite lançar alertas quando a contagem de partículas atinge um determinado valor previamente selecionado. Os alertas podem ser definidos para cada classe de tamanhos: 4, 6, 14 e 21 µm.

6.6 Monitorização do teor de condensados

A monitorização do teor de condensados traduz-se na verificação da presença de água no óleo. O funcionamento normal do sistema de lubrificação da caixa redutora não se caracteriza pela comparência de água no óleo. Os condensados aparecem quando a caixa arrefece, ou seja, quando as temperaturas são elevadas, se a caixa ficar em repouso durante algum tempo, o ar que entrou pelo respiro da caixa redutora vai arrefecendo, e, se houver humidade no ar, quando a temperatura baixa, naturalmente aparecem os condensados. No inverno o teor de condensados aumenta, uma vez que o ar entra na caixa redutora com mais humidade. Para além deste fator, uma avaria no sistema de refrigeração pode resultar no aparecimento de água no óleo. Visto que o arrefecimento do óleo é realizado através da circulação de água no permutador, podem existir falhas no mesmo que permitem a entrada de água no óleo. Na Continental Mabor, no óleo lubrificante de certas caixas

redutoras semelhantes à caixa redutora em análise deteta-se a presença de água no óleo. Tal como se viu, os resultados do teste *Millipore* efetuado evidenciaram a presença de certos óxidos metálicos, que correspondem à corrosão de partículas metálicas, sendo a corrosão provocada pela presença de água. Assim, concluiu-se que é importante realizar a monitorização do teor de condensados.

Para além disso, uma desvantagem do contador de partículas selecionado (PC9001-31) é não conseguir detetar a presença de água no óleo, e tratando-se de um contador cujo mecanismo de funcionamento é bloqueio por luz, não é muito eficaz na presença de água no óleo, uma vez que confunde as bolhas de água com partículas. Assim, é importante realizar a monitorização do teor de condensados, de forma a verificar se o valor fornecido pelo contador de partículas corresponde à realidade ou se está a ser influenciado pela presença de água no óleo.

Assim, concluiu-se que é importante monitorizar o teor de condensados, e consegue-se através da implementação de um sensor de humidade. Uma vez que o contador de partículas foi selecionado do fornecedor Filtertechnik, utilizou-se o sensor de humidade vendido pelo mesmo fornecedor.

O sensor utilizado é o LubCos H_2O, ver figura 6.33, sendo o seu catálogo apresentado no anexo F. Este sensor mede a humidade relativa do óleo e, portanto, exibe o grau de saturação de água [214]:

- 0%: óleo absolutamente seco;
- 100%: óleo completamente saturado de água. A água adicional não será mais dissolvida e apresentar-se-á como água livre.

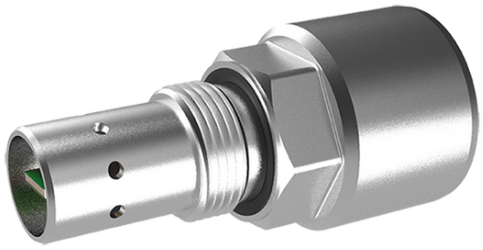


Figura 6.33: Sensor de humidade LubCos H_2O [214].

É importante verificar as características técnicas de modo a verificar que este sensor pode ser utilizado no caso em estudo. As características técnicas mais importantes são as seguintes:

- pressão de operação (bar): pressão do óleo quando passa pelo sensor de humidade;
- temperatura do fluido (°C): temperatura do óleo quando passar pelo sensor de humidade;
- tipo de óleo: tipo de óleo em que o sensor de humidade pode funcionar, mineral e/ou sintético;
- *software*: se existe ou não um *software* capaz de observar os dados capturados pelo sensor de humidade no computador (S- sim, N- não).

Na tabela 6.25 apresentam-se as diferentes caraterísticas deste sensor de humidade.

Tabela 6.25: Dados técnicos do sensor de humidade LubCos H_2O.

	LubCos H_2O
Pressão de operação (bar)	máx. 50
Temperatura do fluido (°C)	-40 a 105
Tipo de óleo	sintético/mineral
Software	S

Tendo em conta a tabela 6.25 verifica-se que este sensor pode ser utilizado no caso em estudo, uma vez que a pressão máxima que o óleo apresenta no sistema de lubrificação da caixa redutora é 16 bar. Para além disso, a temperatura do óleo está compreendida no intervalo admissível deste sensor. Este sensor pode ser utilizado com óleo sintéticos e apresenta um *software* capaz de observar os dados capturados pelo sensor de humidade no computador. O *software* é gratuito e permite para além do registo de dados a avaliação dos valores medidos.

Este sensor pode ser instalado na caixa redutora ou na linha de retorno, conforme se verifica na figura 6.34.

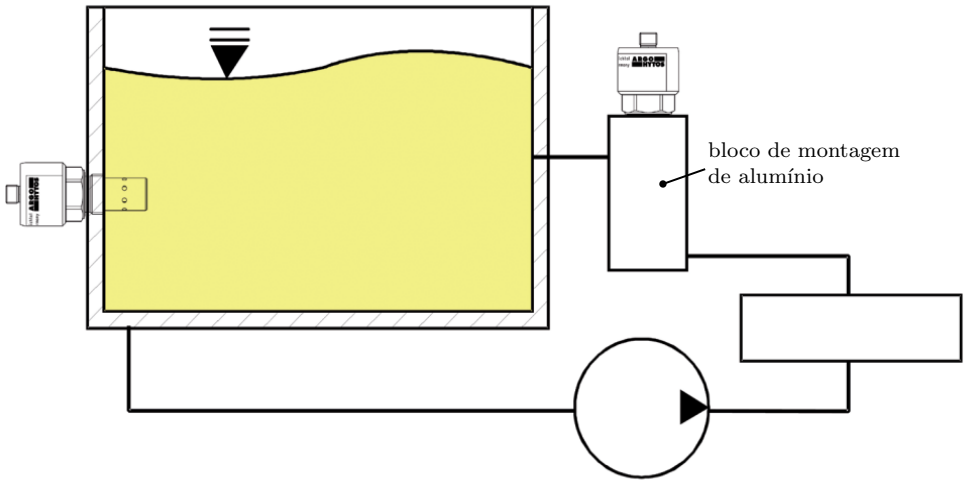


Figura 6.34: Diferentes posições de montagem do sensor de humidade (Adaptado de [215]).

No caso em estudo optou-se por instalar na linha de retorno, uma vez que é um processo mais simples comparativamente com a instalação na caixa redutora. A instalação do sensor de humidade na linha de retorno exige um bloco de alumínio para montar o sensor, tal como se verifica na figura 6.34. Para além disso, é necessário adquirir um cabo de dados que se liga ao sensor.

Na tabela 6.26 apresenta-se o custo de aquisição dos diferentes equipamentos.

Tabela 6.26: Custos de aquisição dos equipamentos para monitorizar o teor de condensados.

Componente	Custo por unidade (euros)	Custo por unidade após desconto (euros)	Unidades	Custo total (euros)
Sensor de humidade	753,86	565,40	15	8 481
Bloco de alumínio	56,3	56,3	15	844,5
Cabo de dados	61,93	61,93	15	928,95

O custo por unidade após desconto resulta de um desconto de 25% relativamente ao valor inicial, no caso do sensor de humidade, e deve-se ao facto da Continental Mabor adquirir 15 unidades. No caso do bloco de alumínio e do cabo de dados o custo mantém igual ao inicial, uma vez que não aplica qualquer desconto relacionado com a quantidade de aquisição destes equipamentos. O custo total representa o custo das 15 unidades.

Na figura 6.35 observa-se a posição do sensor de humidade no sistema de lubrificação da caixa redutora.

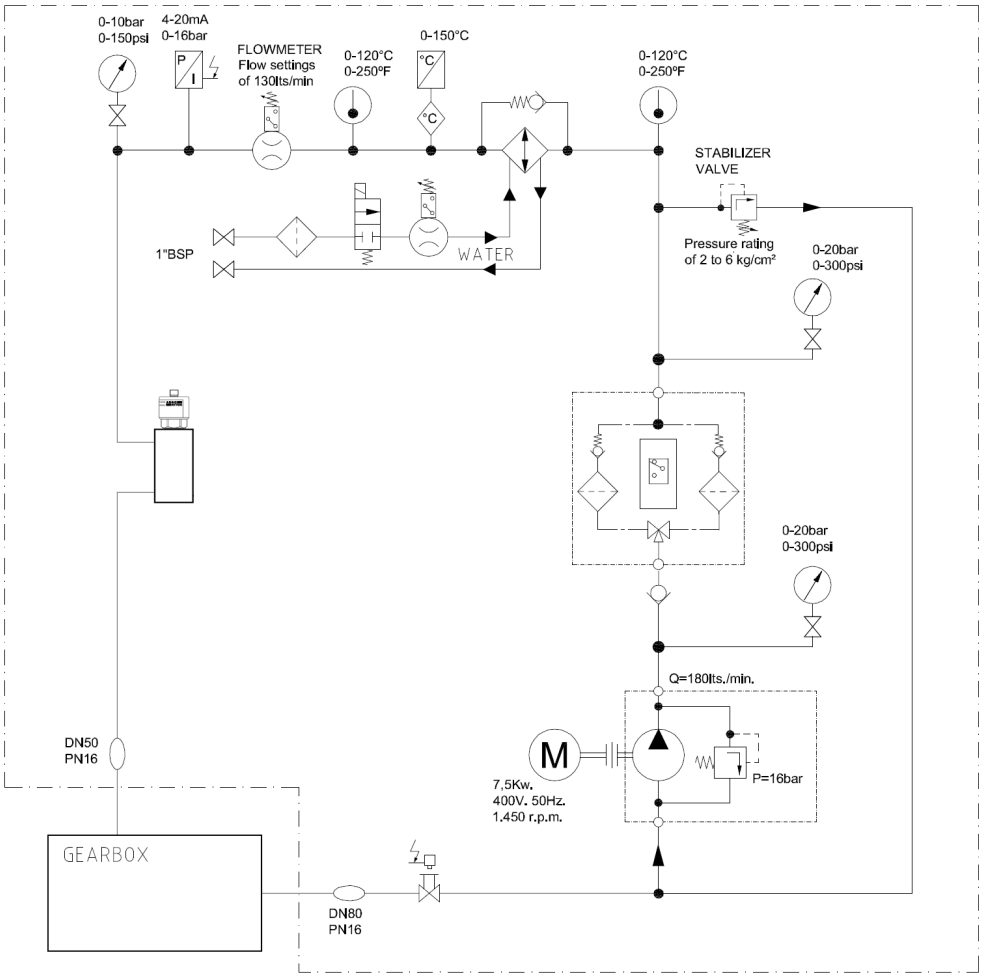


Figura 6.35: Esquema do sistema de lubrificação com o sensor de humidade.

6.7 Plano base de lubrificação

Nesta secção apresenta-se o plano base de lubrificação da caixa redutora, tendo sido elaborado de acordo com os catálogos dos fabricantes da caixa redutora e a informação dos fornecedores de óleos e massas lubrificantes.

Este plano de lubrificação deve ser otimizado em função dos seguintes parâmetros:

- viscosidade;
- teor de acidez (TAN);
- teor de condensados;
- partículas presentes no óleo.

O teor de condensados é obtido através do sensor de humidade e as partículas presentes no óleo são monitorizadas com o contador de partículas.

Os dois primeiros parâmetros são obtidos através de análises laboratoriais realizadas em 6 em 6 meses, uma vez que são parâmetros que não têm uma evolução repentina, logo não se justifica implementar na linha de produção equipamentos que obtenham estes parâmetros de uma forma contínua no tempo.

O TAN varia muito em função da oxidação do óleo, e a oxidação do óleo está relacionada com a temperatura. Assim, normalmente, o TAN tem uma queda mais abrupta quando o óleo é submetido a choques de temperatura muito elevados. No caso da caixa redutora em análise, o óleo sofre um aquecimento, mas face à quantidade de óleo existente, o aquecimento não é assim tão elevado. Por exemplo, o óleo presente num motor de combustão interna de um automóvel atinge a temperatura de 120 a 130°C, no caso em estudo o óleo na caixa redutora atinge os 60°C, logo a oxidação é muito mais lenta. Apesar de a oxidação ser lenta, é importante ter em consideração o valor do TAN, uma vez que a carga de óleo é muito grande, 1300 litros.

Com o tempo há uma variação da viscosidade, sendo normal que aconteça, uma vez que o óleo vai ficando contaminado, vai perdendo algumas características e vai perdendo os aditivos presentes no óleo. Há determinados aditivos que se gastam com o tempo, e, normalmente, verifica-se isso com a variação da viscosidade. Quando a viscosidade varia em situações de elevada carga de óleo, faz-se uma analise mais descritiva dos componentes do óleo.

De seguida apresenta-se uma parte do plano de lubrificação estando a restante parte do plano de lubrificação presente no anexo G.

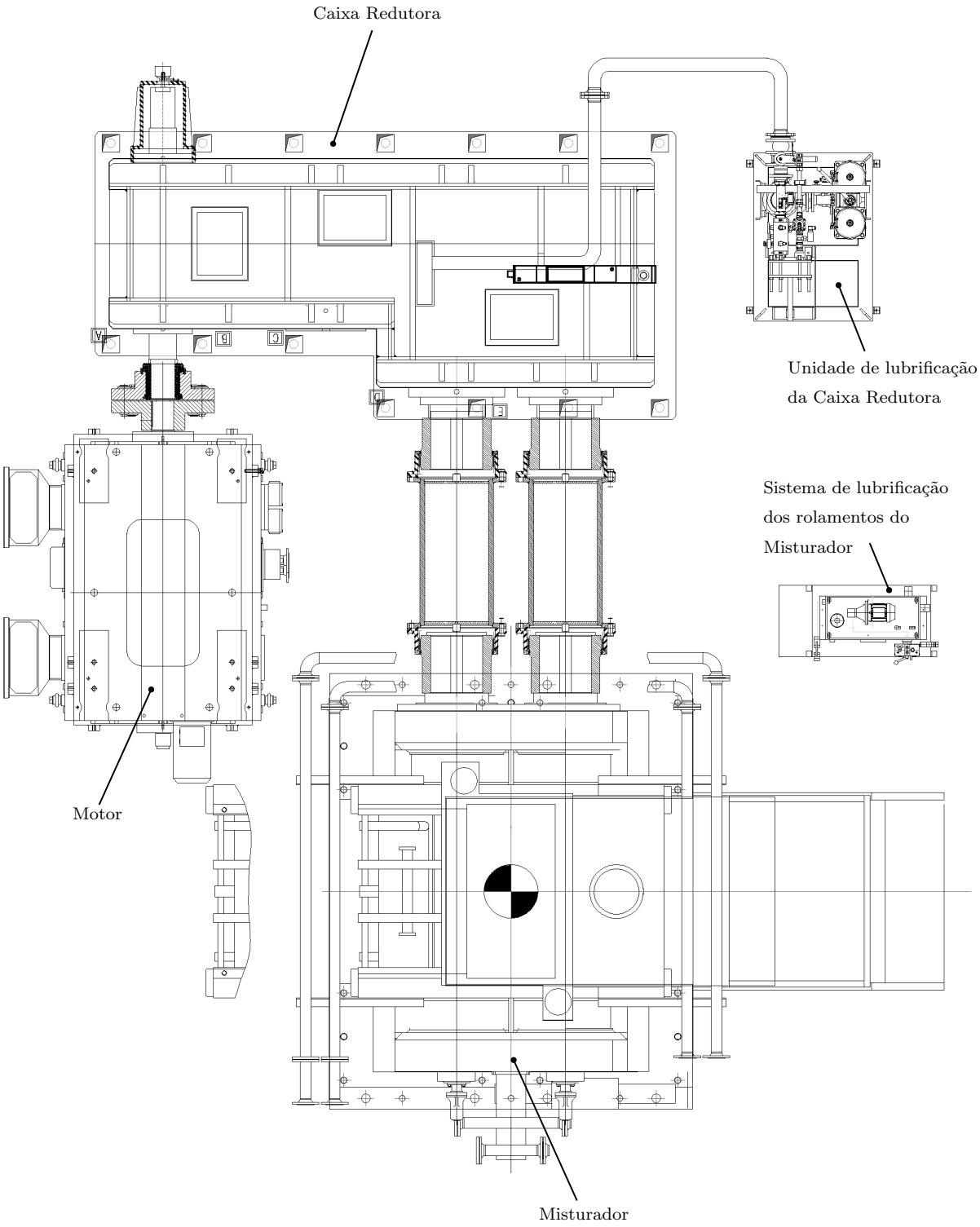


Figura 6.36: *Layout* do andar superior de misturação.

Tabela 6.27: Plano de lubrificação da Caixa Redutora - Misturador.

Operação		Procedimento	Período (semanas)	Tempo exec. (meses)	Mão-de-obra		Parada	Tipo de lubrificante	Quantidade	Comentários
Nº	Descrição				Qualificação	nº				
1	Verificar nível de óleo da Caixa Redutora	Verificar se o óleo alcança a linha de referência	1	10	Mecânico	1	X	-	-	Quando a caixa estiver parada e o óleo arrefecido; Quando o óleo baixar para o nível mínimo, deve ser reabastecido; Deve-se evitar misturas de óleos diferentes.
2	Substituir o óleo da Caixa Redutora	Ver tabela 6.29	119*	300	Mecânico	2	X	Sintético VG 320	1300 L	*1ª troca de óleo: 500 horas, com óleo ainda quente trocas seguintes: ver tabela 6.28 Se adicionar um óleo novo limpar o interior da carcaça, com o óleo usado para o serviço da caixa redutora ou com óleo de limpeza.
3	Verificar os filtros do óleo da Uni. Lubri. Caixa Redutora	Ver tabela 6.29	4	30	Mecânico	1	-	-	-	
4	Limpar filtros do óleo da Uni. Lubri. Caixa Redutora	-	12	60	Mecânico	1	-	-	-	Devem ser limpos com gasolina ou produto semelhante, e em seguida deixar secar ao ar ou com ar comprimido.
5	Substituir o óleo dos Acoplamentos Caixa Redutora-Misturador	Verificar se os bujões de óleo do lado inferior e a junta estão fixos; Encher o óleo pela parte superior; Colocar o outro bujão e junta.	47*	120	Mecânico	1	X	VG 1000	6 L	*Ou ao final de 2 anos, se durante esse período não se atingirem 8 000 horas de operação. Se a temperatura de trabalho for mais de 40°C acima da temperatura ambiente, o óleo deve ser trocado a cada 3 000 horas de trabalho ou no máximo 1 ano.
6	Verificar pureza do óleo da Uni. Lubri. Caixa Redutora	-	26	30	Mecânico	1	X	-	-	Se o nível de impureza exceder o máximo recomendado, trocar o óleo.

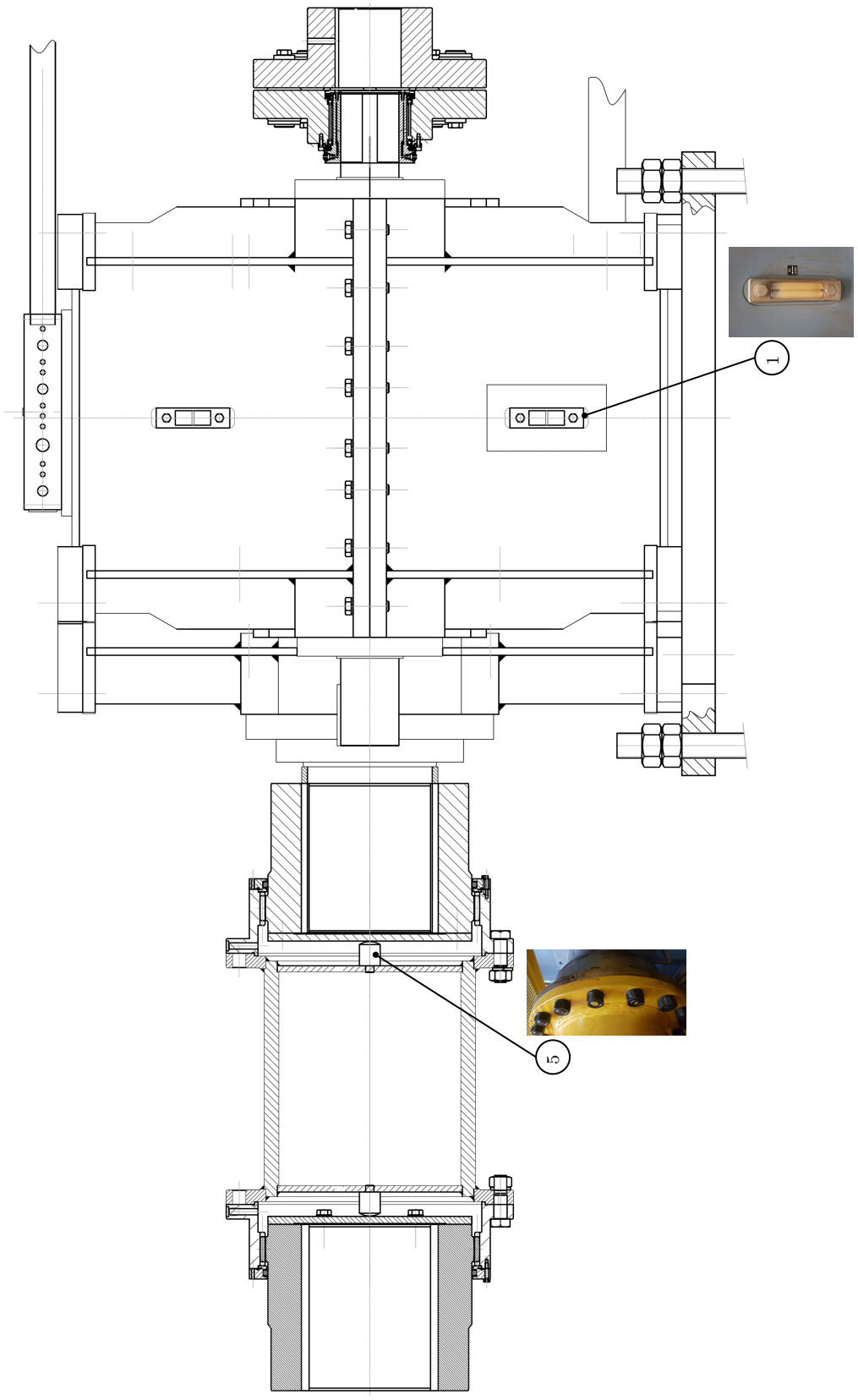


Figura 6.37: Identificação das operações 1 e 5.

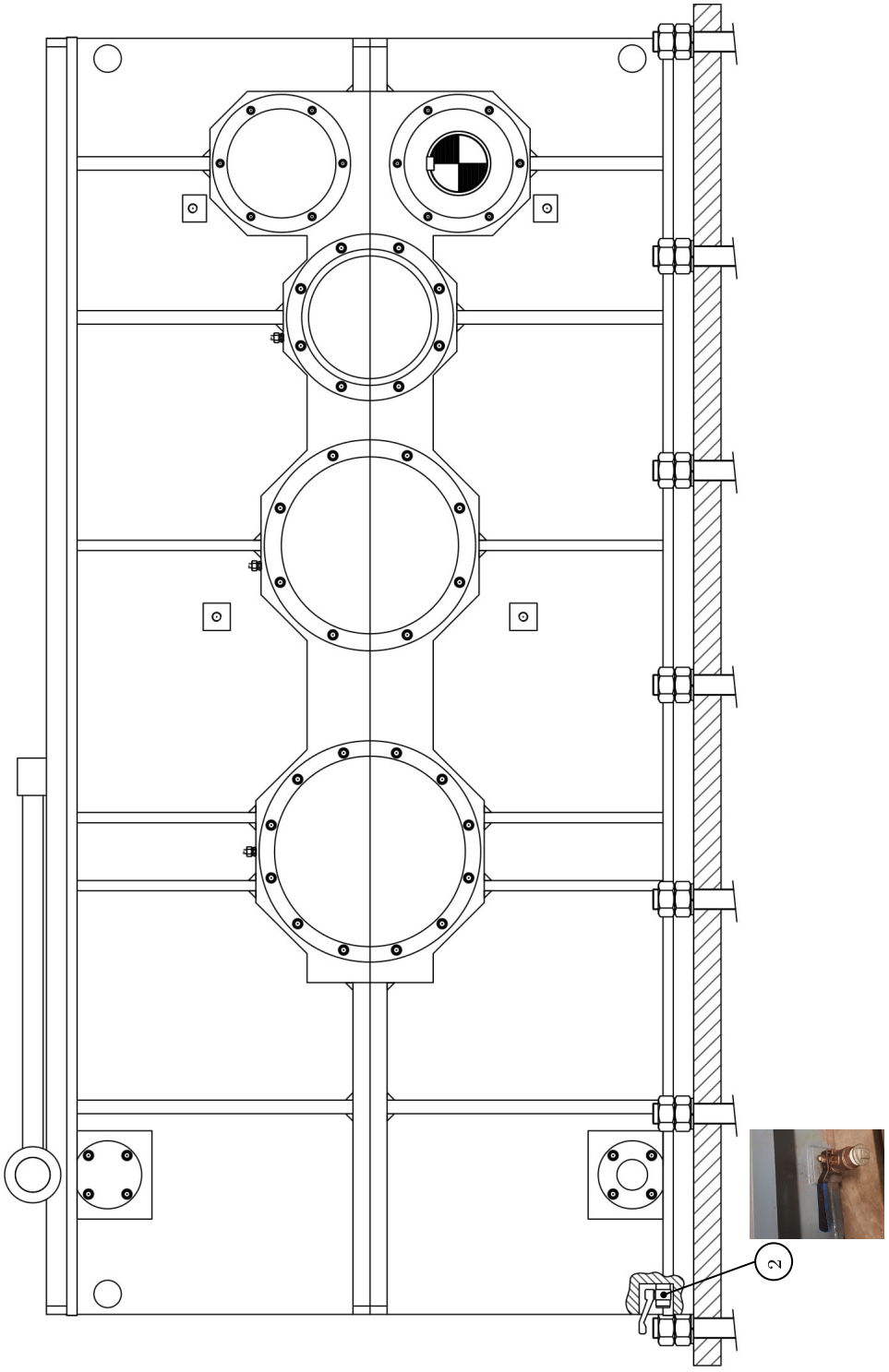


Figura 6.38: Identificação da operação 2.

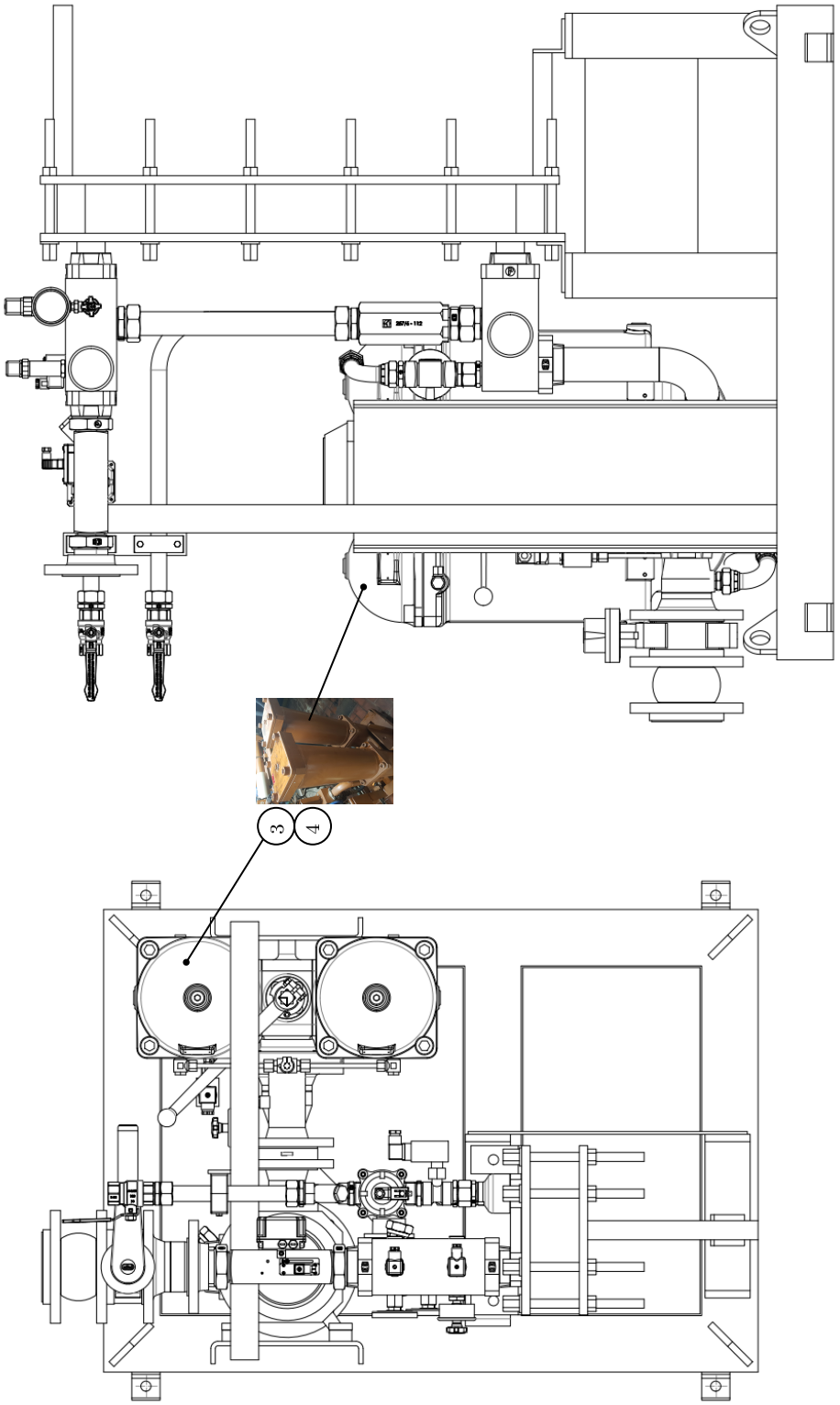


Figura 6.39: Identificação das operações 3 e 4.

Tabela 6.28: Período, em horas, da mudança do óleo da caixa redutora em função da temperatura e do tipo de óleo.

Tipo de óleo	Temperatura do óleo		
	65°C	80°C	90°C
Mineral	8 000	3 000	1 000
Sintético	20 000	15 000	9 000

Tabela 6.29: Procedimentos de operações do plano de lubrificação.

Nº Operação	Procedimento	Comentários
3 e 9	1. Abrir a válvula de corte para equilibrar a pressão; 2. Trocar o filtro para o lado oposto; 3. Fechar a válvula de corte; 4. Abrir a válvula de passagem de ar do lado de descarga do compartimento para equilibrar a pressão com a atmosfera circundante; 5. Abrir as válvulas de drenagem para drenar o filtro; 6. Abrir a tampa do lado descarregado do compartimento do filtro; 7. Alargar e remover o elemento através de um balançar leve e puxar; 8. Se necessário, tapar ou fechar a extremidade do adaptador dentro do compartimento e limpar o interior totalmente; 9. Fechar a válvula de drenagem e remova a tampa da extremidade do adaptador, se presente; 10. Verificar a vedação da cobertura do filtro e substituir o anel de vedação, se necessário; 11. Comparar o número de série do elemento substituto com o do elemento substituído, e inserir no compartimento; 12. Fechar o filtro com a respetiva cobertura; 13. Virar a chave do filtro para a posição intermédia; 14. Encher ambos os lados do filtro utilizando o fluxo de fluido operacional normal; 15. Remover os parafusos de fixação no topo do filtro ou no topo da cobertura do filtro e esperar até verificar a passagem de fluido sem bolhas, e sem som de escape de ar; 16. Apertar os parafusos de fixação novamente.	-

Nº Operação	Procedimento	Comentários
2 e 10	1. Operar o sistema até que a temperatura normal de trabalho seja atingida; 2. Recolher amostra de óleo para análise; 3. Aliviar toda a pressão no sistema e desconectar a alimentação elétrica; 4. Drenar a carga de óleo atual, incluindo filtros de óleo, bombas, válvulas, reservatórios e refrigeradores de óleo; 5. Para remover a maior quantidade de óleo possível, limpar o reservatório ou espaço acessível com um pano limpo e seco; 6. Encher o sistema com o novo óleo recomendado e executar o sistema na pressão mínima ou carga zero por um período de tempo adequado face às recomendações do fabricante do equipamento ou até atingir a temperatura normal de funcionamento; 7. Drenar a carga de óleo atual, incluindo filtros de óleo, bombas, válvulas, reservatórios e refrigeradores de óleo; 8. Substituir os vedantes necessários e os filtros; 9. Encher totalmente o sistema até ao nível normal e operar o sistema até atingir a temperatura ou pressão normal de funcionamento; 10. Verificar filtros e encher até o nível normal, se necessário; 11. Recolher amostra de óleo para análise.	No caso de se manter o mesmo tipo de óleo que estava anteriormente em serviço, ignorar os passos 6 e 7. A etapa 9 é realizada com o novo óleo.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

7.1 Conclusões

O objetivo principal da presente dissertação consistiu na análise da monitorização da condição de uma caixa redutora da nova linha de misturação da Continental Mabor. Apesar de terem surgido algumas limitações referentes à interrupção do estágio em ambiente empresarial, considera-se que se conseguiu cumprir de forma eficaz o objetivo proposto, bem como atingir as principais metas estabelecidas.

Conclui-se que a metodologia RCM é utilizada para estabelecer o procedimento que visa garantir que um determinado equipamento continua a cumprir a sua função.

Para a realização da análise FMECA foi necessário definir previamente as classificações para os índices de detetabilidade, ocorrência e severidade. A severidade foi analisada tendo em conta o ambiente, a segurança e a economia. As definições de classificação dos três índices foram estabelecidas com o objectivo de refletir a realidade da Continental Mabor. Concluiu-se que a falta de dados se deve ao facto de na Continental Mabor não existirem muitos casos de falha relativos às caixas redutoras, e pelo facto de a caixa redutora em estudo ser um modelo não *Standard*, implica que o fabricante da caixa redutora não tenha dados de utilização. Constata-se que a alteração da abordagem estrutural para funcional não está incorreta, uma vez que em termos de manutenção, o que importa é a deterioração do componente. Concluiu-se que na abordagem funcional os valores de NPR obtidos coincidem com a criticidade global de cada um dos componentes. Tal acontece, uma vez que a criticidade global é obtida somando os índices NPR de todos os modos de falha que foram identificados para cada componente, neste caso apenas existe um modo de falha por componente.

Os formulários FMECA foram realizados sem e com a contribuição dos controlos atuais. Sem a contribuição dos controlos atuais verificou-se que os componentes mais críticos são as engrenagens, os rolamentos e os veios, e contribuem em 85% para a criticidade global do sistema. Com a contribuição dos controlos atuais, apenas se verifica uma diminuição do índice de detetabilidade. Nesta situação, verificou-se que os componentes mais críticos continuam a ser as engrenagens, os rolamentos e os veios. Concluiu-se que estes três componentes contribuem em 80% para a criticidade global do sistema. Com a implementação dos controlos atuais verifica-se que a criticidade dos modos de falha das engrenagens, rolamentos e veios diminui cerca de 33%.

O diagrama de decisão definido recorre às classificações de detetabilidade e severidade definidas na análise FMECA. Conclui-se que a aplicação do diagrama de decisão proposto permite avaliar de forma quantitativa o caráter oculto de algumas avarias, e no caso de avarias evidentes, o seu impacto ambiental e/ou segurança e as suas consequências operacionais e não operacionais. Do estudo realizado foram identificados 5 modos de falha, sendo que 60% dos modos de falha apresentam consequências operacionais (modos de falha das engrenagens, rolamentos e veios) e 40% dos modos de falha apresentam consequências ao nível da segurança (modos de falha dos vedantes e carcaça). Todos os modos de falha são evidentes. Com a aplicação do diagrama de decisão RCM conclui-se que todos os modos de falha deveriam ser tratados com técnicas de manutenção condicionada, sendo que para 60% dos modos de falha (modos de falha das engrenagens, rolamentos e veios) deveria realizar-se a monitorização da condição, que envolve a utilização de equipamentos especializados, e para 40% dos modos de falha (modos de falha dos vedantes e carcaça) deveria realizar-se a inspeção visual. Conclui-se que no caso das engrenagens e rolamentos deve monitorizar-se as vibrações e as partículas de desgaste, enquanto que no caso dos veios apenas se devem monitorizar as vibrações.

O presente estudo da monitorização da condição do equipamento é centrado na análise das partículas presentes no óleo. A análise de partículas de desgaste é uma técnica que se utiliza para monitorizar a condição operacional de um determinado equipamento, uma vez que as peças/sistemas lubrificados contaminam o lubrificante com os materiais provenientes do seu desgaste. Atualmente, existem diversos métodos que permitem monitorizar e analisar o desgaste: espectroscopia elementar, densidade ferrosa (ferrografia de leitura direta), contagem de partículas, espectrometria de fluorescência de Raios-X, ferrografia analítica e LaserNet Fines.

Relativamente ao tamanho das partículas, é importante que a técnica selecionada para monitorização das partículas de desgaste detete partículas de pequena dimensão, uma vez que as partículas de pequenas dimensão podem permanecer no óleo quase indefinidamente, e, como não são tão quebradiças comparativamente com as partículas maiores, a destruição pode ser contínua. O tamanho e a natureza metalúrgica das partículas que entram num contacto de engrenamento, são fatores determinantes do dano causado nas suas superfícies. Assim, não se pode isolar o fator tamanho e definir a partir do qual se torna perigoso. Para além do tamanho e natureza da partícula, há também a quantidade, muitas partículas pequenas podem ser mais perigosas que poucas partículas grandes, pois estas não conseguem entrar no contacto. Assim, no que diz respeito ao tamanho das partículas a monitorizar não existe uma resposta concreta em termos de tamanhos considerados "perigosos" para as caixas redutoras. No entanto, apesar de não existir um valor crítico estabelecido, é preferencial que a monitorização se realize a partir do mais baixo possível tamanho das partículas e que monitorize também partículas de grande dimensão. Conclui-se que o método de monitorização das partículas de desgaste selecionado tem de permitir realizar uma monitorização em tempo real das partículas de desgaste, uma vez que a análise em laboratório leva tempo, e durante esse tempo, a máquina pode ser danificada. Para além disso, nunca se pode ter certeza de que o óleo amostrado é representativo de todo o sistema de lubrificação, e, quando uma amostra é coletada, é difícil garantir que nenhuma contaminação externa ocorre durante o procedimento de amostragem, ou durante a análise em laboratório.

Tendo em conta os requisitos previamente abordados, e após uma comparação entre os diversos métodos que permitem monitorizar e analisar o desgaste, conclui-se que o me-

lhor método para monitorizar o degaste das caixas redutoras em estudo é a contagem de partículas. Após uma comparação entre os diferentes contadores de partículas existentes no mercado, concluiu-se que o contador que melhor se enquadra na situação em estudo é o contador PC9001-31 da Filtertechnik. Relativamente à sua localização no circuito hidráulico da caixa redutora, o contador de partículas tem que ser colocado antes da unidade de filtros, visto que o objetivo do contador de partículas é monitorizar as partículas. O contador de partículas foi instalado em paralelo, uma vez que não admite um caudal de 180 l/min. Assim, concluiu-se que a monitorização do óleo é considerada *on-line*.

Com a realização do presente trabalho verificou-se que é importante monitorizar o teor de condensados, uma vez que na Continental Mabor, no óleo lubrificante de certas caixas redutoras semelhantes à caixa redutora em análise deteta-se, por vezes, a presença de água no óleo. Para além disso, uma desvantagem do contador de partículas selecionado é não conseguir detetar a presença de água no óleo, e tratando-se de um contador cujo mecanismo de funcionamento é bloqueio por luz, não é muito eficaz na presença de água no óleo, uma vez que confunde as bolhas de água com partículas. Assim, é importante realizar a monitorização do teor de condensados, de forma a verificar se o valor fornecido pelo contador de partículas corresponde à realidade ou se está a ser influenciado pela presença de água no óleo. Uma vez que o contador de partículas foi selecionado do fornecedor Filtertechnik, utilizou-se o sensor de humidade vendido pelo mesmo fornecedor, o LubCos H_2O.

Importa ainda mencionar que o trabalho desenvolvido não aborda a implementação da monitorização da vibração na caixa redutora da nova linha de misturação, uma vez que esta técnica já se utiliza nas restantes caixas redutoras de outras linhas de misturação da Continental Mabor. Assim, apesar da monitorização da vibração ainda não estar implementada na nova linha, o processo que é necessário realizar para assegurar a sua implementação já se encontra devidamente estabelecido.

Por fim, o plano base de lubrificação desenvolvido deve ser otimizado em função da viscosidade, TAN, teor de condensados e partículas presentes no óleo. O teor de condensados é obtido através do sensor de humidade e as partículas presentes no óleo são monitorizadas com o contador de partículas. A viscosidade e o TAN são obtidos através de análises laboratoriais realizadas em 6 em 6 meses, uma vez que são parâmetros que não têm uma evolução repentina, logo não se justifica implementar na linha de produção equipamentos que obtenham estes parâmetros de uma forma contínua no tempo.

7.2 Trabalhos Futuros

No desenvolvimento da presente dissertação foram elencados tópicos cuja abordagem não foi possível realizar. Considera-se, contudo, que as possibilidades de desenvolvimento futuro posteriormente apresentadas podem constituir boas oportunidades, para complementar o trabalho desenvolvido e contribuir para o avanço do tema em estudo:

- Na Continental Mabor existem 12 linhas de misturação, sendo 9 linhas simples e 3 linhas *Tandem*. Assim, existem 15 caixas redutoras semelhantes à analisada. Deste modo, apesar do estudo ser realizado para a caixa redutora do andar superior da linha de misturação número 12, o objetivo é aplicar o trabalho desenvolvido às restantes caixas redutoras da Continental Mabor. Para além disso, as restantes fábricas do

Grupo Continental têm exatamente a mesma necessidade, logo o presente trabalho irá contribuir para a análise da monitorização da condição das caixas redutoras de outras linhas de misturação das diversas fábricas do grupo Continental AG.

- Depois de selecionado o contador de partículas, não é suficiente colocá-lo em paralelo, é necessário realizar alterações no sistema de lubrificação atual, para garantir o correto funcionamento na presença do contador de partículas. Estas alterações não foram realizadas de acordo com uma análise de mecânica dos fluidos. Pela equação da energia, sabe-se que a perda de carga em dois ramais em paralelo é a mesma. Sendo assim, poder-se-ia realizar uma análise tendo em conta as perdas de carga.

- A partir da monitorização da condição, será possível aprofundar o conhecimento dos modos de falha, uma vez que se começarão a registar dados operacionais da nova linha de misturação. Esses dados obtidos permitirão conhecer e caracterizar as falhas nas caixas redutoras. Deste modo, poder-se-á atualizar/melhorar a previsão realizada inicialmente e/ou realizar a análise FMECA segundo a abordagem estrutural.

- Na análise realizada, não foi encontrado no mercado nenhum contador de partículas de bloqueio de poros. Assim, numa análise futura, poder-se-ia tentar apurar, novamente, a disponibilidade de este tipo de contadores de partículas, uma vez que têm a capacidade de distinguir as partículas duras de outras impurezas no óleo, não contabilizando as bolhas de água como partículas, contrariamente ao que se verifica no contador atualmente selecionado (contador de partículas de bloqueio de luz).

- Investir fortemente nas novas tecnologias digitais: *Internet of Things*, o *Big Data* e a Inteligência Artificial, para continuar a transformação dos ativos em equipamentos inteligentes. Por exemplo, utilizar a inteligência artificial para prescrever ações de manutenção com base nos dados recolhidos sobre cada equipamento.

Referências

[1] T. Zabiński, T. Maoczka, J. Kluska, M. Madera, and J. Sęp. Condition monitoring in Industry 4.0 production systems - The idea of computational intelligence methods application. In *Procedia CIRP*, volume 79, pages 63–67, 2019. doi: 10.1016/j.procir.2019.02.012.

[2] Primavera. Manutenção Industrial na Era 4.0, como tirar partido da Tecnologia. URL `https://pt.primaverabss.com/pt/blog/manutencao-industrial-na-era-4-0-como-tirar-partido-da-tecnologia/`. Último acesso a: 2020-09-11.

[3] Continental. Continental Mabor comemora o seu 30º aniversário, 2020. URL `https://www.continental.com/pt-pt/imprensa/comunicados-de-imprensa/continental-mabor-lousado-226318`. Último acesso a: 2020-08-15.

[4] Continental. História, 2020. URL `https://www.continental.com/pt-pt/empresa/hist%C3%B3ria`. Último acesso a: 2020-08-15.

[5] Continental. História, 2020. URL `https://www.continental-pneus.pt/pesados/company/businessunit/history2`. Último acesso a: 2020-08-15.

[6] Vasco M. N. Oliveira. Borrachas. URL `https://www.vascomnoliveira.com/borrachas`. Último acesso a: 2020-08-15.

[7] Continental. Grupo Continental, 2020. URL `https://www.continental-pneus.pt/ligeiros/empresa/sobre-n%C3%B3s/corporativo`. Último acesso a: 2020-08-15.

[8] Continental. Localizações, 2020. URL `https://www.continental.com/en/company/locations`. Último acesso a: 2020-08-15.

[9] José Leite. Mabor - manufactura nacional de borracha. URL `https://restosdecoleccao.blogspot.com/2012/01/mabor-manufactura-nacional-de-borracha.html`. Último acesso a: 2020-08-15.

[10] COCKPIT automóvel. HISTÓRIA; MABOR, uma marca portuguesa que roda em todo o Mundo. URL `https://www.cockpitautomovel.com/2014/10/mabor-uma-marca-portuguesa-que-rola.html`. Último acesso a: 2020-08-15.

[11] Continental. An inside look at the components that make up modern car tires, 2020. URL `https://www.continental-tires.com/car/tire-knowledge/tire-basics/tire-components`. Último acesso a: 2020-08-15.

[12] Tire Industry Project. Technical report, World Business Council for Sustainable Development, 2006.

[13] Daniel de Almeida Tavares. Oportunidades energéticas na Continental-Mabor. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2015.

[14] Continental. How a tire is made, 2020. URL `https://www.continental-tires.com/car/tire-knowledge/tire-basics/tire-production`. Último acesso a: 2020-05-03.

[15] HF Group. Mixing Room Solutions, 2020. URL `https://www.hf-mixinggroup.com/en/products/mixing-room-solutions/`. Último acesso a: 2020-05-02.

[16] Económico.TV. "como se faz" um pneu, 2012. URL `https://www.youtube.com/watch?v=mn1MHFcfD4g`. Último acesso a: 2020-05-02.

[17] Câmara Municipal de Vila Nova de Famalicão. Continental Mabor atinge recorde de 17 milhões de pneus. Continental ITA tem lucros históricos, 2015. URL `https://www.famalicaomadein.pt/_continental_mabor_atinge_recorde_de_17_milhoes_de_pneus_continental_ita_tem_lucros_historicos`. Último acesso a: 2020-05-02.

[18] Instituto Superior Engenharia do Porto. Parceria com a Continental-Mabor, 2017. URL `https://www.youtube.com/watch?v=8-lWqXl8a28`. Último acesso a: 2020-05-02.

[19] Walbridge. Continental Tire Manufacturing Facility. URL `http://www.walbridge.com/project/continental-tire-manufacturing-facility-sumter-s-c/`. Último acesso a: 2020-05-03.

[20] Brendan Rodgers and Walter Waddell. Chapter 9 - The Science of Rubber Compounding. In *The Science and Technology of Rubber (Fourth Edition)*, pages 417 – 471. Academic Press, Boston, fourth edition edition, 2013. doi: 10.1016/B978-0-12-394584-6.00009-1.

[21] Mário J.L. Caetano. Matérias primas. URL `https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/materias-primas/`. Último acesso a: 2020-05-03.

[22] Bainite Machines. Bainite Automated Turnkey Mixing Line - Saves Labor. URL `https://www.youtube.com/watch?v=9Iu3N_H7kRA`. Último acesso a: 2020-05-04.

[23] HF Group. Products: Our mixers and compounding facilities make an impression through technology and expertise, 2020. URL `https://www.hf-mixinggroup.com/en/products/`. Último acesso a: 2020-05-05.

[24] Eduarda Sousa. Aplicação da Metodologia de RCM II ao Sistema de Proteção, Comando Controlo de uma Subestação Numérica AT/MT. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013.

[25] John Moubray. *RCM II - Manutenção Centrada em Confiabilidade*. Aladon, 1999.

[26] Nancy Regan. *RCM Solution - A Practical Guide to Starting and Maintaining a Successful RCM Program*. Industrial Press, 2012.

[27] C. McCollin. Working around failure. *Manufacturing Engineer*, 78(1):37–40, 1999. doi: 10.1049/me:19990114.

[28] Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis (FMECA). Procedure RA–006–013–1A, National Aeronautics and Space Administration, 1966.

[29] Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA). Practice PD-AP-1307, National Aeronautics and Space Administration.

[30] Design Analysis Procedure For Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA). Standard ARP926, Society for Automotive Engineers, 1967.

[31] S.R. Silva, M. Fonseca, and J. Brito. Metodologia FMEA e Sua Aplicação à Construção de Edifícios. In *Proceedings of the National Meeting on Quality and Innovation in Construction (QIC 2006)*. LNEC, 2006.

[32] Morris K. Dyer, Dewey G. Little, Earl G. Hoard, Alfred C. Taylor, and Campbell. Rayford. Applicability of NASA Contract Quality Management and Failure Mode Effect Analysis Procedures to the USFS Outer Continental Shelf Oil and Gas Lease Management Program. Report TM X–2567, National Aeronautics and Space Administration, 1972.

[33] Charles W. Mallory and Robert Waller. Application of Selected Industrial Engineering Techniques to Wastewater Treatment Plants. Report EPA-R2–73–176, United States Environmental Protection Agency, 1973.

[34] R. Borgovini, S. Pemberton, and M. Rossi. Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA). Report CRTA–FMECA, Reliability Analysis Center, 1993.

[35] Procedures for perfoming a Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis. Standard MIL-STD-1629A, United States Department of Defense, 1980.

[36] Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA). Standard CEI/IEC 60812:2006, International Electrotechnical Commission, 2006.

[37] Eduardo Yuji Sakurada. As técnicas de Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

[38] Electronic Reliability Design Handbook. Handboock MIL-HDBK-338A, United States Department of Defense, 1988.

[39] Porto Editora. Dicionário Infopédia da Língua Portuguesa. URL `https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa`. Último acesso a: 2020-04-09.

[40] Mario Villacourt. Failure Mode and Effects Analysis (FMEA): A Guide for Continuous Improvement for the Semiconductor Equipment Industry. Report 92020963B-ENG, Sematech, 1992.

[41] P. Palady. *FMEA: Análise dos modos de falha e Efeitos: prevendo e prevenindo problemas antes que ocorram.* IMAM, 1997.

[42] D.H. Stamatis. *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution.* ASQ Quality Press, 1995.

[43] R.R. Mohr. *Failure Modes and Effects Analysis*. Sverdrup, 1994.

[44] M. Ben-Daya and A. Raouf. A revised failure mode and effects analysis model. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 13(1):43–47, 1996. doi: 10.1108/02656719610108297.

[45] R.A. Souza and O. Possamai. Confiabilidade e Falhas de Campo: Uma Metodologia para Suporte ao Projeto. In *Proceedings of the II Brazilian Congress of Product Development Management*, 2000.

[46] Kenneth C. Latino. Failure modes & effects anaysis, a modified approach. In *Proceedings of the National Petroleum Refineries Association Maintenance Conference*, 1996.

[47] Failure Modes Effects and Criticality Analysis Research for and Application to the Building Domain. Technical Report CIB W080, Conseil International du Bâtimen, 2005.

[48] D.R. Bull, C.R. Burrows, W.J. Crowther, K.A. Edge, R.M. Atkinson, P.G. Hawkins, and D.J. Woollons. Approaches to Automated FMEA of Hydraulic Systems. In *Proceedings of the Aerotech 95 Conference*, 1995.

[49] Y. Chen, Y. Hou, A. Peterson, and M. Ahmadian. Failure mode and effects analysis of dual levelling valve airspring suspensions on truck dynamics. *Vehicle System Dynamics*, 57(4):617–635, 2019. doi: 10.1080/00423114.2018.1480787.

[50] Christopher J. Price. Effortless incremental design FMEA. In *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1996.

[51] T. Pinna, R. Caporali, G. Cambi, L. Burgazzi, A. Poucet, and M.T. Porfiri. Failure mode and effect analysis on ITER heat transfer systems. *Fusion Engineering and Design*, 42(1-4):431–436, 1998. doi: 10.1016/S0920-3796(98)00091-X.

[52] A. Koncz. Failure mode and effect analysis types in the automotive industry. In *Proceedings of the Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies*, pages 321–328, 2019.

[53] L. Krejci, V. Schindlerova, M. Bucko, I. Hlavaty, and M. Mician. The Application of PFMEA for Roller Bearings Production. *Manufacturing Technology*, 19(3):439–445, 2019. doi: 10.21062/ujep/310.2019/a/1213-2489/MT/19/3/439.

[54] F. Li, L. Ren, J. Lin, Z. Li, and S. Lin. Aerospace product process FMEA technology and its application. In *Proceedings of the 26th European Safety and Reliability Conference*, page 371, 2017.

[55] Failure Mode and Effect Analysis. Handbook Version 4.1, Ford Motor Company, 2004.

[56] S. Teng and S. Ho. Failure mode and effects analysis: An integrated approach for product design and process control. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 13(5):8–26, 1996. doi: 10.1108/02656719610118151.

[57] P.A. Johnson and S.L. Niezgoda. Risk-based method for selecting bridge scour countermeasures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(2):121–128, 2004. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:2(121).

[58] F. Cicco and M. Fantazzini. *Introdução à Engenharia de Segurança de Sistemas*. Fundacentro, 1988.

[59] C. Moura. *Análise de Modo e Efeitos de Falha Potencial (FMEA) - Manual de Referência*. Instituto da Qualidade Automotiva, 2002.

[60] J. Layzell and S. Ledbetter. FMEA applied to cladding systems - Reducing the risk of failure. *Building Research and Information*, 26(6):351–357, 1998. doi: 10.1080/096132198369689.

[61] The condition monitoring comparison guide. Technical report, Semiotic Labs, 2020.

[62] George E. Totten, Steven R. Westbrook, and Rajesh J. Shah. *Fuels and lubricants handbook : technology, properties, performance, and testing*. ASM International, 2003.

[63] K.A.I. Sheriff, V. Hariharan, and B.M. Kumar. Review on condition monitoring of rotating machines. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 9 (2):2343–2346, 2020.

[64] Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines. Standard ISO 17359:2018(E), International Organization for Standardization, 2018.

[65] H.P. Bloch and F.K. Geitner. *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting*. Butterworth Heinemann, 2012.

[66] C. Sequeira. Sensores para medições de Vibrações Mecânicas – Acelerómetros. *Revista Manutenção*, 2013.

[67] M. Serridge. Ten crucial concepts behind trustworthy fault detection in machine condition monitoring. In *American Society of Mechanical Engineers, International Gas Turbine Institute (Publication) IGTI*, volume 4, pages 419–423, 1989.

[68] S.K. Al-Arbi. *Condition Monitoring of Gear Systems using Vibration Analysis*. PhD thesis, University of Huddersfield, 2012.

[69] Daniel Fabiano Lago. Manutenção de redutores de velocidade pela integração das técnicas preditivas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante. Master's thesis, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira., Ilha Solteira, 2007.

[70] Paula Alexandra Silva. Manutenção Condicionada baseada na Análise de Vibrações. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1994.

[71] Jack P. Salameh, Sebastien Cauet, Erik Etien, Anas Sakout, and Laurent Rambault. Gearbox condition monitoring in wind turbines: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 111:251 – 264, 2018. ISSN 0888-3270. doi: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.03.052.

[72] J.B.J. Baron Fourie. The Analytical Theory of Hea. *The University Press*, 1878.

[73] J. Allen. Short term spectral analysis, synthesis, and modification by discrete fourier transform. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 25(3): 235–238, 1977.

[74] T. A. Classen. The wigner distribution - a tool for time-frequency signal analysis, part ii: Discrete-time signals. *Philips J. Res.*, 1980.

[75] Andreas Bruns. Fourier-, Hilbert- and wavelet-based signal analysis: are they really different approaches? *Journal of Neuroscience Methods*, 137(2):321 – 332, 2004. ISSN 0165-0270. doi: https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2004.03.002.

[76] N.E. Huang, S.R. Long Z. Shen, M.C. Wu, H.H. Shih, Q. Zheng, N.C. Yen, C.C. Tung, and H.H. Liu. The empirical mode decomposition and the hilbertspectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, volume 454, pages 903 – 995. The Royal Society, 1998.

[77] Corinna Cortes and Vladimir Vapnik. Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3):273–297, 1995. ISSN 1573-0565. doi: 10.1007/BF00994018.

[78] Power-MI. Industrial machinery vibration, 2020. URL `https://power-mi.com/content/industrial-machinery-vibration`. Último acesso a: 2020-05-17.

[79] B.D. Forrester. *Advanced Vibration Analysis Techniques for Fault Detection and Diagnosis in Geared Transmission Systems*. PhD thesis, Swinburne University of Technology, 1996.

[80] Power-MI. Study of vibration, 2020. URL `https://www.power-mi.com/content/study-vibration`. Último acesso a: 2020-05-17.

[81] A. Davies. *Management Guide to Condition Monitoring in Manufacture*. The Institution of Engineering and Technology, 1990.

[82] D. Romahadi, H. Xiong, and H. Pranoto. Intelligent System for Gearbox Fault Detection & Diagnosis Based on Vibration Analysis using Bayesian Networks. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 694, 2019. doi: 10.1088/1757-899X/694/1/012001.

[83] Cepstrum Analysis and Gearbox Fault Diagnosis. Application notes, Brüel & Kjær.

[84] R.B. Randall. A new method of modeling gear faults. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 104, 1982. doi: 10.1115/1.3256334.

[85] DMC-Engenharia e Sistemas Ibéricos. Análise de vibrações em engrenagens. URL `https://www.dmc.pt/analise-de-vibracoes-em-engrenagens/`. Último acesso a: 2020-05-15.

[86] J. Hedlund and A. Lehtovaara. Modeling of helical gear contact with tooth deflection. *Tribology International*, 40(4):613–619, 2007. doi: 10.1016/j.triboint.2005.11.004.

[87] R. Gasch. A survey of the dynamic behaviour of a simple rotating shaft with a transverse crack. *Journal of Sound and Vibration*, 160(2):313–332, 1993. doi: 10.1006/jsvi.1993.1026.

[88] SKF. Rolamentos rígidos de esferas. URL `https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings`. Último acesso a: 2020-05-19.

[89] J.D. Rodrigues. *Apontamentos de Vibrações de Sistemas Mecânicos*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2018.

[90] S.M. Hsu and R.S. Gates. Boundary lubricating films: Formation and lubrication mechanism. *Tribology International*, 38(3):305–312, 2005. doi: 10.1016/j.triboint.2004.08.021.

[91] E. Höglund. Influence of lubricant properties on elastohydrodynamic lubrication. *Wear*, 232(2):176–184, 1999. doi: 10.1016/S0043-1648(99)00143-X.

[92] F.P. García Márquez, A.M. Tobias, J.M. Pinar Pérez, and M. Papaelias. Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods. *Renewable Energy*, 46:169–178, 2012. doi: 10.1016/j.renene.2012.03.003.

[93] Oil Condition Monitoring. Technical report, Intertek.

[94] A. Davies. *Handbook of Condition Monitoring: Techniques and Methodology*. Springer, 1998.

[95] Machinery Lubrication I and II Course Manual. Technical report, Noria Corporation, 2004.

[96] Mary Moon. Lubricant contaminants limit gear life. *Gear Solutions*, 2009.

[97] Basic Handbook of Lubrication. Handbook, Society of Tribologists and Lubrication Engineers, 2003.

[98] Leugner L. The Practical Handbook of Machinery Lubrication. Handbook, Maintenance Technology International.

[99] K. C. Ludema. *Friction Wear Lubrication: A Textbook in Tribology*. CRC Press, 1996.

[100] Jim Fitch. *Practicing Oil Analysis*, 2005.

[101] A.R. Lansdown. *Lubrication and Lubricant Selection*. ASME, 2003.

[102] Wani Khalid Shafi, Ankush Raina, and Mir Irfan Ul Haq. Friction and wear characteristics of vegetable oils using nanoparticles for sustainable lubrication. *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces*, 12(1):27–43, 2018. doi: 10.1080/17515831.2018.1435343.

[103] Luís Ferreira. *Orgãos de Máquina I: Tribologia*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2018.

[104] W.S. Robertson. *Lubrication in Practice*. Palgrave, 1983.

[105] G. Stachowiak and A. Batchelor. *Engineering Tribology*. Butterworth Heinemann, 2013.

[106] P.D. Srivyas and M.S. Charoo. A review on tribological characterization of lubricants with nano additives for automotive applications. *Tribology in Industry*, 40(4):594–623, 2018. doi: 10.24874/ti.2018.40.04.08.

[107] B.J. Hamrock, S.R. Schmid, and B.O. Jacobson. *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*. CRC Press, 2004.

[108] Don M. Pirro, Martin Webster, and Ekkehard Daschner. *Lubrication Fundamentals*. CRC Press, 2016.

[109] Michael P. Barrett and Justin Stover. Understanding Oil Analysis: How It Can Improve Reliability of Wind Turbine Gearboxes. *Gear Techonology*, pages 104–111, 2013.

[110] Pedro Nelson A. Belmiro and Ronald P. Carreteiro. *Lubrificantes & Lubrificação Industrial*. Interciência, 2006.

[111] H.P. Bloch. *Practical Lubrication for Industrial Facilities*. Fairmont Press, 2009.

[112] Dennis A. Lauer. Gear Lubrication. In Q. Jane Wang and Yip-Wah Chung, editors, *Encyclopedia of Tribology*, pages 1493–1501. Springer US, 2013. doi: 10.1007/978-0-387-92897-5_19.

[113] Lubrication of gear systems. Technical report, Klüber Lubrication.

[114] Byington, Carl S. and Schalcosky, David C. Advances in Real Time Oil Analysis. URL `https://www.machinerylubrication.com/Read/138/real-time-oil-analysis`. Último acesso a: 2020-06-24.

[115] AAVOS International. Online, inline, atline and bypass (analysers). URL `https://aavos.eu/glossary/online-inline-atline-bypass-analysers/`. Último acesso a: 2020-06-24.

[116] X. Zhu, C. Zhong, and J. Zhe. Lubricating oil conditioning sensors for online machine health monitoring – A review. *Tribology International*, 109:473–484, 2017. doi: 10.1016/j.triboint.2017.01.015.

[117] Andrew K. S. Jardine, Daming Lin, and Dragan Banjevic. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7):1483 – 1510, 2006. ISSN 0888-3270. doi: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012.

[118] Wei HONG, Wenjian CAI, Shaoping WANG, and Mileta M. TOMOVIC. Mechanical wear debris feature, detection, and diagnosis: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*, 31(5):867 – 882, 2018. ISSN 1000-9361. doi: https://doi.org/10.1016/j.cja.2017.11.016.

[119] S. Fouvry, T. Liskiewicz, Ph Kapsa, S. Hannel, and E. Sauger. An energy description of wear mechanisms and its applications to oscillating sliding contacts. *Wear*, 255 (1):287 – 298, 2003. ISSN 0043-1648. doi: https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00117-0.

[120] D. Scott. Debris examination — a prognostic approach to failure prevention. *Wear*, 34(1):15 – 22, 1975. ISSN 0043-1648. doi: https://doi.org/10.1016/0043-1648(75)90304-X. URL `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/004316487590304X`.

[121] B. J. Roylance. Ferrography—then and now. *Tribology International*, 38 (10):857 – 862, 2005. ISSN 0301-679X. doi: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.03.006. URL `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X05000897`.

[122] P. W. Centers and F. D. Price. Real time simultaneous in-line wear and lubricant condition monitoring. *Wear*, 123(3):303 – 312, 1988. ISSN 0043-1648. doi: https://doi.org/10.1016/0043-1648(88)90146-9.

[123] J. L. Miller and D. Kitaljevich. In-line oil debris monitor for aircraft engine condition assessment. In *2000 IEEE Aerospace Conference. Proceedings (Cat. No.00TH8484)*, volume 6, pages 49–56, 2000.

[124] P.J. Dempsey, Nathan Bolander, C. Haynes, and A.M. Toms. Investigation of Bearing Fatigue Damage Life Prediction Using Oil Debris Monitoring. Memorandum NASA/TM-2011-217117,E-17804, National Aeronautics and Space Administration: GlennResearch Center, 2011.

[125] Noria Corporation. Wear Analysis, 2020. URL `https://www.machinerylubrication.com/Read/382/wear-analysis`. Último acesso a: 2020-06-15.

[126] Nikolai K. Myshkin and Liubou V. Markova. *On-line Condition Monitoring in Industrial Lubrication and Tribology*. Springer, 2018.

[127] B. J. Roylance, J. A. Williams, and R. Dwyer-Joyce. Wear debris and associated wear phenomena—fundamental research and practice. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 214(1):79–105, 2000. doi: 10.1243/1350650001543025.

[128] John A. Williams. Wear and wear particles—some fundamentals. *Tribology International*, 38(10):863 – 870, 2005. ISSN 0301-679X. doi: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.03.007.

[129] Bharat Bhushan. *Modern Tribology Handbook: Materials, Coatings, and Industrial Applications*. CRC Press, 2000.

[130] J. F. Archard and W. Hirst. The wear of metals under unlubricated conditions. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 236(1206):397–410, 1956. ISSN 00804630. URL `http://www.jstor.org/stable/99967`.

[131] E. Rabinowicz and R. I. Tanner. Friction and wear of materials. *Journal of Applied Mechanics*, 33(2):479–479, 1966. ISSN 0021-8936. doi: 10.1115/1.3625110.

[132] Xiaogang Leng, Qing Chen, and Eryu Shao. Initiation and propagation of case crushing cracks in rolling contact fatigue. *Wear*, 122(1):33 – 43, 1988. ISSN 0043-1648. doi: https://doi.org/10.1016/0043-1648(88)90004-X.

[133] M. N. Webster and C. J. J. Norbart. An Experimental Investigation of Micropitting Using a Roller Disk Machine. *Tribology Transactions*, 38(4):883–893, 1995. doi: 10.1080/10402009508983485.

[134] L. Badal, J. Whigham, and T. Minnick. *Machinery Lubrication*, 2005.

[135] Jim Fitch. *Reliable Plant*, 2005.

[136] A. Mayer. *Practicing Oil Analysis*, 2006.

[137] TestOil. Elemental Spectroscopy, 2016. URL `https://testoil.com/services/oil-analysis/elemental-spectroscopy/`. Último acesso a: 2020-06-22.

[138] Efficient Plant. Improving Predictive Maintenance Through Wear Debris Analysis. URL https://www.efficientplantmag.com/2006/11/improving-predictive-maintenance-through-wear-debris-analysis/. Último acesso a: 2020-08-12.

[139] Wear Analysis. Machine Life Extension Calculator. URL https://www.machinerylubrication.com/Read/95/machine-life-extension. Último acesso a: 2020-08-09.

[140] Portable oil and fuel cleanliness monitor - FS9001+. Technical report, Filtertechnik, 2020.

[141] Martin Williamson. Mesh Blockage Particle Monitoring. URL https://www.machinerylubrication.com/Read/2018/mesh-blockage. Último acesso a: 2020-08-27.

[142] WEARSCANNER: Online particle size distribution counter based on eddy current technology. Technical report, Prüftechnik, 2020.

[143] Joanna A. Wolska and Bruno A.R. Vrebos. XRF: A Powerful Oil Analysis Tool. URL https://www.machinerylubrication.com/Read/602/xrf-oil-analysisy. Último acesso a: 2020-08-15.

[144] TestOil. Analytical Ferrography, 2016. URL https://testoil.com/services/oil-analysis/analytical-ferrography/. Último acesso a: 2020-06-22.

[145] Noria Corporation. Anatomy of Wear Debris, 2020. URL https://www.machinerylubrication.com/Read/29537/wear-debris-anatomy. Último acesso a: 2020-08-14.

[146] David Filicky, Thomas Sebok, and Malte Lukas. LaserNet Fines - A New Tool for the Oil Analysis Toolbox. URL https://www.machinerylubrication.com/Read/383/lasernet-fines-oil-analysis. Último acesso a: 2020-08-15.

[147] José António Almacinha. *Redutor de Engrenagens Cilíndricas de Dentado Exterior*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016.

[148] Operating manual and parts lists with drawings. Technical Report 7000006208, HF Mixing Group, 2006.

[149] Service and maintenance instructions manual for GUIBE Tandem gearboxes. Technical report, GUIBE, 2019.

[150] Technical data sheet shell omala s4 gx 320. Technical report, Shell, 2012.

[151] Valuekeep. O que é o MTTR e o MTBF?, 2019. URL https://www.valuekeep.com/pt/recursos/e-books-artigos/o-que-e-o-mttr-e-o-mtbf?action. Último acesso a: 2020-06-26.

[152] Drive systems: traction motor and gearbox bearings, sensors, condition monitoring and services. Railway technical handbook, SKF Group, 2012.

[153] Manual de manutenção de rolamentos da SKF. Technical Report SR/P7 10001/1, SKF Group, 2012.

[154] Tabela de possíveis falhas de rolamentos. Technical report, SKF Group, 2005.

[155] Bearing damage and failure analysis. Technical Report BU/I3 14219 EN, SKF Group, 2014.

[156] Diagnóstico Rápido de Ocorrências em Rolamentos. Technical report, NSK, 2001.

[157] Shawn Sheng. Gearbox Typical Failure Modes, Detection and Mitigation Methods. Technical report, National Renewable Energy Laboratory, 2014.

[158] Rolling Bearing Damage: Recognition of damage and bearing inspection. Technical Report WL 82 102/2 EA, FAG Kugelfischer, 2003.

[159] Sintomas - Causas - Soluções: Oficina de Rolamentos. Technical report, Schaeffler Group, 2013.

[160] Failure Diagnosis - Guide to troubleshooting wheel bearing failures and malfunctions. Technical Report 9551000 4501639/5.0/9.2006/OD-GB, FAG Kugelfischer, 2006.

[161] Ball & Roller Bearings: Failures, Causes and Countermeasures. Technical Report CAT.NO.B300 1E, JTEKT Corporation, 2006.

[162] Falhas em Rolamentos e Medidas Corretivas. Technical report, NTN.

[163] E.R. Booser and M.M. Khonsari. *Applied Tribology: Bearing Design and Lubrication*. Wiley, 2017.

[164] Bearing failure: causes and cures. Technical report, Barden Precision Bearings.

[165] O diagnóstico Perito SNR: Análise e Preconizações para otimizar a vida dos rolamentos. Technical Report DT 10 BRa, SNR - Industry, 2003.

[166] S.M. Muzakkir, K.P. Lijesh, and H. Hirani. Failure mode and effect analysis of journal bearing. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(16): 37752–37759, 2015.

[167] Failure analysis: gears-shafts-bearings-seals. Technical Report 108-010, Rexnord Industries, 1978.

[168] Aleksandar Vencl, Vlada Gašić, and Blaža Stojanović. Fault tree analysis of most common rolling bearing tribological failures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 174, 2017. doi: 10.1088/1757-899x/174/1/012048.

[169] Himam Saheb, Vijay Annam, and Yogesh Avula. DFMEA of a Roller Mill Gear box. *International Journal of Advancement In Engineering Technology*, 3:83–90, 2016.

[170] Shawn Sheng. Gearbox Reliability Database: Yesterday, Today, and Tomorrow. Technical report, National Renewable Energy Laboratory, 2014.

[171] M.J. Neale. *The Tribology Handbook*. Butterworth-Heinemann, 1995.

[172] W.T. Becker and R.J. Shipley. *ASM Handbook: Volume 11: Failure Analysis and Prevention*. ASM International, 2002.

[173] P.M. Ku. Gear Failure Modes—Importance of Lubrication and Mechanics. *ASLE Transactions*, 19(3):239–249, 1976. doi: 10.1080/05698197608982799.

[174] Manuel Castro. Análise e previsão da capacidade de carga à gripagem de engrenagens cilíndricas do tipo FZG - A. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1996.

[175] B.-R. Höhn and K. Michaelis. Influence of oil temperature on gear failures. *Tribology International*, 37(2):103–109, 2004. doi: 10.1016/S0301-679X(03)00047-1.

[176] Jorge Seabra. *Mecânica do Contacto e Lubrificação: Engrenagens*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2020.

[177] J.R. Davis. *Gear materials, proprirties, and manufacture*. ASM International, 2005.

[178] Gears - Wear and damage to gear teeth - Terminology. Standard ISO 10825:1995(E/F), International Organization for Standardization, 1995.

[179] Gear damage. Technical report, Japan Society of Mechanical Engineers.

[180] Peter Lynwander. *Gear drive systems: design and application*. CRC Press, 2019.

[181] A. Stokes. *Manual Gearbox Design*. Butterworth-Heinemann, 1992.

[182] Fábio Koda. Estudo da fadiga de contato em engrenagens cilíndricas de dentes retos. Master's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

[183] J.L. Otegui. *Failure Analysis Fundamentals and Applications in Mechanical Components*. Springer, 2013.

[184] Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipments. Handbook, Naval Surface Warfare Center, 2011.

[185] Sumit Raut and Laukik Raut. A Review of Various Techniques Used for Shaft Failure Analysis. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 2: 159–171, 2014.

[186] W.H. Skewis. Mechanical Seal Failure Modes. Technical report, Support Systems Technology Corporation.

[187] R.K. Mobley. *Root Cause Failure Analysis*. Newnes, 1999.

[188] Failure of mechanical shaft seals. Technical report, Grundfos.

[189] Failure Analysis Guide Eliminate Potential and Future Problems. Technical report, Systemseals.

[190] Industrial shaft seals. Technical Report SE/P1 18729 EN, SKF Group, 2019.

[191] Dave Heidenreich, Dustin Sadler, Emil Moroz, and Scott Eatherton. The Mitigation Value of Reverse Torsional Damping of Transient Torsional Events in Wind Turbines, Using a Failure Modes and Effects Analysis Approach. Technical report, AeroTorque.

[192] Advanced monitoring, simulation and control of tidal devices in unsteady, highly turbulent realistic tide environments. Grant Agreement 727689, RealTide, 2020.

[193] H.P. Bloch and F.K. Geitner. *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting, Volume 2 - Practical Machinery Management for Process Plants*. Elsevier, 2012.

[194] J.D. Andrews and T.R. Moss. *Reliability and Risk Assessment*. Professional Engineering Publishing, 2002.

[195] H.A. Linstone and M. Turoff. *Delphi Method: Techniques and Applications*. Addison-Wesley, 1975.

[196] T.R. Moss. *The Reliability Data Handbook*. Professional Engineering Publishing, 2005.

[197] M.R. Hallowell and J.A. Gambatese. Qualitative research: Application of the delphi method to CEM research. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(1):99–107, 2010. doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000137.

[198] S. Kermanshachi, B. Rouhanizadeh, and B. Dao. Application of Delphi Method in Identifying, Ranking, and Weighting Project Complexity Indicators for Construction Projects. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, 12(1), 2020. doi: 10.1061/(ASCE)LA.1943-4170.0000338.

[199] R. Boulkedid, H. Abdoul, M. Loustau, O. Sibony, and C. Alberti. Using and reporting the Delphi method for selecting healthcare quality indicators: A systematic review. *PLoS ONE*, 6(6), 2011. doi: 10.1371/journal.pone.0020476.

[200] P. Zarco Montejo, R. Almodóvar González, E. De Higes-Martínez, J.J. Gorgojo-Martínez, C. Guijarro Herraiz, M.J. López Navas, D. Palacios, J.C. Peláez Álvarez, D. Ruíz Genao, B. Piedrafita, S. Gómez, E. Falkenbach, F.J. Rebollo Laserna, and J.L. López Estebaranz. Delphi-based recommendations for the management of cardiovascular comorbidities in patients with psoriatic arthritis and moderate-to-severe psoriasis. *Rheumatology International*, 40(6):969–981, 2020. doi: 10.1007/s00296-020-04573-w.

[201] J. Scheele, H.W. Harmsen van der Vliet–Torij, E.M. Wingelaar-Loomans, and M.J.B.M. Goumans. Defining vulnerability in European pregnant women, a Delphi study. *Midwifery*, 86, 2020. doi: 10.1016/j.midw.2020.102708.

[202] H.T.T. Pham, A.T. Nguyen, T.T.H. Nguyen, and L. Hens. Stakeholder Delphi-perception analysis on impacts and responses of acid rain on agricultural ecosystems in the Vietnamese upland. *Environment, Development and Sustainability*, 22(5): 4467–4493, 2020. doi: 10.1007/s10668-019-00393-6.

[203] J. Skulmoski, F. Hartman, and J. Krahn. The Delphi Method for Graduate Research. *Journal of Information Technology Education*, 6, 2007.

[204] P.A. Gonçalves. *Fiabilidade de Sistemas e Componentes de UAV's*. PhD thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016.

[205] U.G. Gupta and R.E. Clarke. Theory and applications of the Delphi technique: a bibliography (1975-1994). *Technological Forecasting and Social Change*, 53(2):185–211, 1996. doi: 10.1016/S0040-1625(96)00094-7.

[206] Carl S. Byington and David C. Schalcosky. Advances in Real Time Oil Analysis. URL `https://www.machinerylubrication.com/Read/138/real-time-oil-analysis`. Último acesso a: 2020-08-15.

[207] Metallic Contamination Sensor: MCS 1000 Series. Technical report, Hydac, 2020.

[208] PC9001: Online Particle Counter - Affordable, Accurate Analysis. Technical report, Filtertechnik, 2020.

[209] User Manual PC9001: Laser particle counter for oils & fuels. Technical report, Filtertechnik, 2020.

[210] icountPD: Online Particle Detector. Technical report, Parker, 2013.

[211] Metallic Wear Debris Sensor: Real time indication of condition. Technical report, Parker, 2013.

[212] PAMAS S50: Contador de Partículas Online para monitoramento de óleo. Technical report, Pamas, 2019.

[213] WEARSCANNER: Online particle size distribution counter monitors wear debris in oil. Technical report, Prüftechnik, 2020.

[214] Humidity sensor lubcos H_2O. Technical report, Argo-Hytos, 2020.

[215] Operating manual: Oil condition sensors - lubcos H_2O. Technical report, Argo-Hytos, 2020.

Apêndice A

Dados técnicos do óleo Shell Omala S4 GX 320

Technical Data Sheet

Previous Name: **Shell Omala HD**

Shell **Omala** *S4 GX 320*

- *Extra Life and Protection*
- *Special Applications*

Advanced Synthetic Industrial Gear Oil

Shell Omala S4 GX is an advanced synthetic heavy duty industrial gear oil offering outstanding lubrication performance under severe operating conditions, including reduced friction, long service life and high resistance to micro-pitting for optimal gear protection.

DESIGNED TO MEET CHALLENGES

Performance, Features & Benefits

- **Long oil life - maintenance saving**
  Shell Omala S4 GX is formulated using an advanced additive system in combination with specially selected synthetic base fluids to provide outstanding resistance to breakdown over long duration and/or high temperature operation.

  This performance is recognized by Flender AG where a formal approval for 20,000 hours (four years) at 80°C usage as been granted.

  Shell Omala S4 GX can operate successfully at bulk temperatures up to 120°C.

  Shell Omala S4 GX offers the potential to significantly extend service intervals compared to conventional industrial gear oils.
- **Excellent wear and corrosion protection**
  Shell Omala S4 GX is formulated to have excellent load carrying capacity and micro-pitting performance providing long component life even under shock loading conditions. These features provide benefits over mineral oil-based products in terms of gear and bearing component life.

  Shell Omala S4 GX also has excellent corrosion protection, even in the presence of contamination by water and solids.
- **Maintaining system efficiency**
  Shell Omala S4 GX can help maintain or enhance the efficiency of industrial gear systems through improved low temperature performance and lower friction in comparison to mineral oil-based products. This provides better lubrication at low start-up temperatures.

Main Applications



- **Wind turbines and other inaccessible installations**
  Shell Omala S4 GX is particularly recommended for certain systems where extra long life is required, maintenance is infrequent or systems are inaccessible.
- **Enclosed industrial gear systems**
  Recommended for industrial reduction gear systems operating under severe operating conditions, such as high load, very low or elevated temperatures and wide temperature variations.
- **Other applications**
  Shell Omala S4 GX oils are suitable for lubrication of bearings and other components in circulating and splash-lubricated systems.

  For highly loaded worm drives the Shell Omala "W" series oils are recommended. For automotive hypoid gears, the appropriate Shell Spirax Oil should be used.

Specifications, Approvals & Recommendations

- Approved by Siemens MD for Flender gear units and gear motors T7300
- David Brown S1.53.106, except ISO 1000
- Approved for wind turbine gearboxes by:
  Gamesa, Dongfang Wind Turbines, Dalian Heavy Industries and Sinovel
- ISO 12925-1 Type CKD, except ISO 1000
- ANSI/AGMA 9005-E02 (EP), except ISO 1000
- US Steel 224, except ISO 1000
- DIN 51517-3 (CLP), except ISO 1000
- For additional questions and listing of equipment approvals and recommendations, contact your local Shell Technical Helpdesk or the OEM Approvals website.

Typical Physical Characteristics

Properties			Method	Shell Omala S4 GX
Viscosity Grade			ISO 3448	320
Kinematic Viscosity	@40°C	mm²/s		312.7
Kinematic Viscosity	@100°C	mm²/s		35.4
Viscosity Index			ISO 2909	159
Flash Point		°C	ISO 2592 (COC)	252
Pour Point		°C	ISO 3016	-42
Density	@15°C	kg/m³	ISO 12185	883
FZG Load Carrying Test			DIN 51354-2	-
FZG Load Carrying Test		failure load stage	A/8,3/90	>14
FZG Load Carrying Test		failure load stage	A/16,6/90	>14
Timken OK Load		lbs	ASTM D 2782	>85

These characteristics are typical of current production. While future production will conform to Shell's specification, variations in these characteristics may occur.

Health, Safety & Environment

- Guidance on Health and Safety is available on the appropriate Material Safety Data Sheet, which can be obtained from http://www.epc.Shell.com/
- **Protect the Environment**

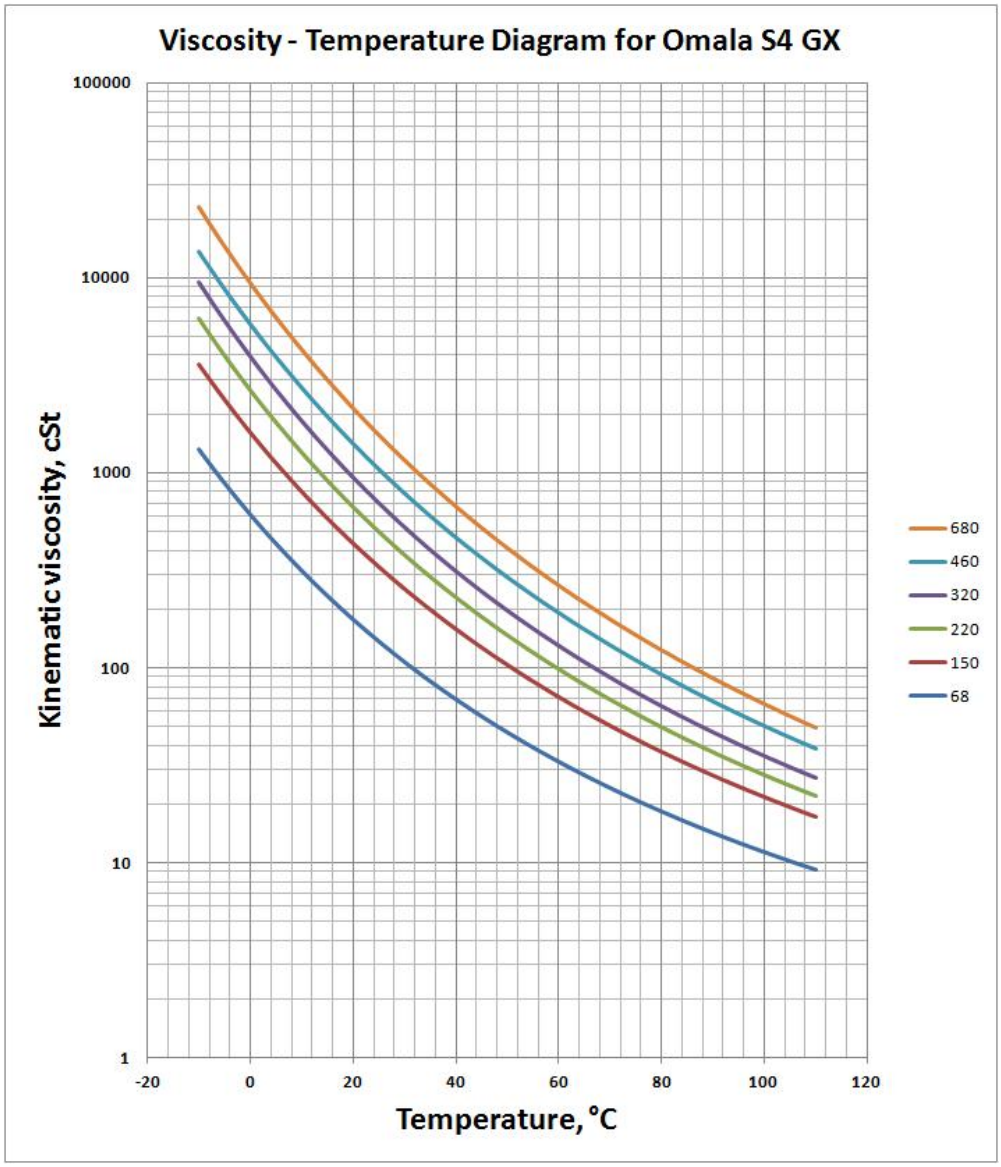
  Take used oil to an authorized collection point. Do not discharge into drains, soil or water.

Additional Information

- **Advice**

  Check compatibility with other products before use.

  Product recommendations on applictions not listed here may be obtained from your Shell representative.


Viscosity - Temperature Diagram for Omala S4 GX
Kinematic viscosity, cSt
100000
10000
1000
100
10
1
-20
0
20
40
60
80
100
120
Temperature, °C
680
460
320
220
150
68

Apêndice B

Tabelas FMECA

Tabela B.1: FMECA engrenagem.

Responsável do Processo: Página 1 de 2
Grupo de Trabalho: Data FMEA (Orig.): 15/04/2020
Líder do Grupo de Trabalho: Elaborado por: Bruno Ribeiro Data FMEA (Rev.): 14/09/2020

COMPONENTE	FUNÇÃO	MODO POTENCIAL DA FALHA	EFEITOS POTENCIAIS DA FALHA	SEV	CLAS	CAUSAS POTENCIAIS DA FALHA	OCO	CONTROLOS ATUAIS	DET	NPR	AÇÕES RECOMENDADAS
1 Engrenagem	Transmitir o movimento de rotação	1 Gripagem a quente	1 Destruição parcial/ completa do flanco do dente; Estrias de desgaste na direção radial do flanco; Coloração/oxidação do flanco (tons de azul, depende do tipo de aço)			1 Cargas elevadas					Diminuir as cargas
						2 Elevadas velocidades de rolamento					Diminuir as velocidades de rolamento
						3 Viscosidade do lubrificante insuficiente					Aumentar a viscosidade do lubrificante
						4 Espessura do filme lubrificante intermédia					Aumentar/diminuir a espessura do filme lubrificante
						5 Elevada temperatura das superfícies					Diminuir a temperatura das superfícies
						6 Ausência de aditivos: Anti-Desgaste e Extrema-Pressão					Adicionar os aditivos: Anti-Desgaste e Extrema-Pressão
		2 Fratura na base do dente	1 Choque; funcionamento intermitente			1 Sobrecarga					Controlar as sobrecargas
		3 Desgaste abrasivo normal	1 Remoção de micropartículas metálicas das superfícies dos dentes das engrenagens; diminuindo progressivamente a sua espessura			1 Entrada de impurezas					Melhorar os sistemas de vedação; Substituição do lubrificante

COMPONENTE	FUNÇÃO	MODO POTENCIAL DA FALHA	EFEITOS POTENCIAIS DA FALHA	SEV	CLAS	CAUSAS POTENCIAIS DA FALHA	OCO	CONTROLOS ATUAIS	DET	NPR	AÇÕES RECOMENDADAS
		4 Gripagem a frio	1 Destruição parcial/ completa do flanco do dente; Estrias de desgaste na direção radial do flanco; Coloração/oxidação do flanco (tons de azul, depende do tipo de aço)			1 Pequenas velocidades de rolamento					Aumentar as velocidades de rolamento
						2 Viscosidade do lubrificante insuficiante					Aumentar a viscosidade do lubrificante
						3 Pequena espessura do filme lubrificante					Aumentar a espessura do filme lubrificante
						4 Baixa temperatura das superfícies					Aumentar a temperatura das superfícies
						5 Elevada rugosidade					Diminuir a rugosidade
		5 Fadiga superficial	1 Iniciação de fissuras de fadiga em profundidade, que se propagam do interior do material para a superfície; Aparecimento no flanco do dente de fendas e crateras de elevada profundidade;			1 Elevada pressão de contacto					Diminuir a pressão de contacto
						2 Elevada espessura do filme lubrificante					Diminuir a espessura do filme lubrificante
						3 Defeitos microestruturais					Usar materiais “mais limpos”
						4 Profundidade insuficiente de tratamento térmico					Melhorar os tratamentos térmicos
		6 Desgaste abrasivo acelerado	1 Remoção acelerada de micropartículas metálicas das superfícies dos dentes das engrenagens; diminuindo progressivamente a sua espessura			1 Lubrificação inadequada					Verificar o lubrificante e o método de lubrificação
						2 Entrada de impurezas					Melhorar os sistemas de vedação; Substituição do lubrificante

Tabela B.2: FMECA veio.

Responsável do Processo:
Grupo de Trabalho:
Líder do Grupo de Trabalho: Elaborado por: Bruno Ribeiro

Página 1 de 1
Data FMEA (Orig.): 15/04/2020
Data FMEA (Rev.): 14/09/2020

COMPONENTE	FUNÇÃO	MODO POTENCIAL DA FALHA	EFEITOS POTENCIAIS DA FALHA	SEV	CLAS	CAUSAS POTENCIAIS DA FALHA	OCO	CONTROLOS ATUAIS	DET	NPR	AÇÕES RECOMENDADAS
1 Veio	Transmitir movimento e energia entre as engrenagens	1 Fadiga	1 Fratura do eixo			1 Velocidade de rotação elevada					Diminuir a velocidade de rotação
						2 Binário de carga elevado					Diminuir o binário de carga
						3 Elevada temperatura					Diminuir a temperatura
						4 Concentração de tensões resultantes da operação					Evitar concentração de tensões
						5 Folga de funcionamento errada					Corrigir a folga
						6 Sobrecargas cíclicas					Evitar sobrecargas cíclicas

Tabela B.3: FMECA vedante.

Responsável do Processo: Página 1 de 1
Grupo de Trabalho: Data FMEA (Orig.): 15/04/2020
Líder do Grupo de Trabalho: Elaborado por: Bruno Ribeiro Data FMEA (Rev.): 14/09/2020

COMPONENTE	FUNÇÃO	MODO POTENCIAL DA FALHA	EFEITOS POTENCIAIS DA FALHA	SEV	CLAS	CAUSAS POTENCIAIS DA FALHA	OCO	CONTROLOS ATUAIS	DET	NPR	AÇÕES RECOMENDADAS
1 Vedante	Garantir a união e a estanquidade	1 Desgaste normal	1 Polimento suave de uma superfície de vedação causada pelo movimento relativo da vedação contra a superfície correspondente			1 Funcionamento					Utilizar vedante de dureza mais elevada
		2 Desgaste abrasivo	1 Vazamento			1 Entrada de impurezas					Melhorar os sistemas de vedação; Substituição do lubrificante
						2 Lubrificação inadequada					Verificar o lubrificante e o método de lubrificação
						3 Elevada rugosidade com a superfície de contacto					Aumentar a espessura do filme lubrificante; baixar a rugosidade
		3 Ataque químico	1 Vazamento			1 Ambiente corrosivo					Vedante duplo; Vedante único com um sistema de descarga externo, utilizando um fluído compatível
						2 Lubrificante inadequado					Usar lubrificante apropriado

Tabela B.4: FMECA parafuso da partição.

Responsável do Processo: Página 1 de 1
Grupo de Trabalho: Data FMEA (Orig.): 15/04/2020
Líder do Grupo de Trabalho: Elaborado por: Bruno Ribeiro Data FMEA (Rev.): 14/09/2020

COMPONENTE	FUNÇÃO	MODO POTENCIAL DA FALHA	EFEITOS POTENCIAIS DA FALHA	SEV	CLAS	CAUSAS POTENCIAIS DA FALHA	OCO	CONTROLOS ATUAIS	DET	NPR	AÇÕES RECOMENDADAS
1 Parafusos da Partição	Fixar as carcaças	1 Corrosão	1 Fuga de lubrificante através das superfícies de junção da caixa			1 Ambiente corrosivo		Visual			Verificar os parafusos e ajustar o binário de aperto

Tabela B.5: FMECA carcaça.

Responsável do Processo: Página 1 de 1
Grupo de Trabalho: Data FMEA (Orig.): 15/04/2020
Líder do Grupo de Trabalho: Elaborado por: Bruno Ribeiro Data FMEA (Rev.): 14/09/2020

COMPONENTE	FUNÇÃO	MODO POTENCIAL DA FALHA	EFEITOS POTENCIAIS DA FALHA	SEV	CLAS	CAUSAS POTENCIAIS DA FALHA	OCO	CONTROLOS ATUAIS	DET	NPR	AÇÕES RECOMENDADAS
1 Carcaça	Acomodar os elementos da caixa redutora	1 Corrosão	1 Vazamento			1 Ambiente corrosivo		Visual			Controlo das condições ambientais
		2 Fratura	1 Vazamento; Outros componentes podem danificar-se			1 Vibrações					Paragem da máquina

Tabela B.6: FMECA chaveta.

Responsável do Processo: Página 1 de 1
Grupo de Trabalho: Data FMEA (Orig.): 15/04/2020
Líder do Grupo de Trabalho: Elaborado por: Bruno Ribeiro Data FMEA (Rev.): 14/09/2020

COMPONENTE	FUNÇÃO	MODO POTENCIAL DA FALHA	EFEITOS POTENCIAIS DA FALHA	SEV	CLAS	CAUSAS POTENCIAIS DA FALHA	OCO	CONTROLOS ATUAIS	DET	NPR	AÇÕES RECOMENDADAS
1 Chaveta	Transmitir o binário do eixo para a engrenagem ou vice-versa	1 Corte	1 Eixo desacoplado; Perda total de energia			1 Arranques e/ou paragens bruscas					Substituição
						2 Funcionamento					Substituição
		2 Esmagamento	1 Eixo desacoplado; Perda total de energia			1 Funcionamento					Substituição

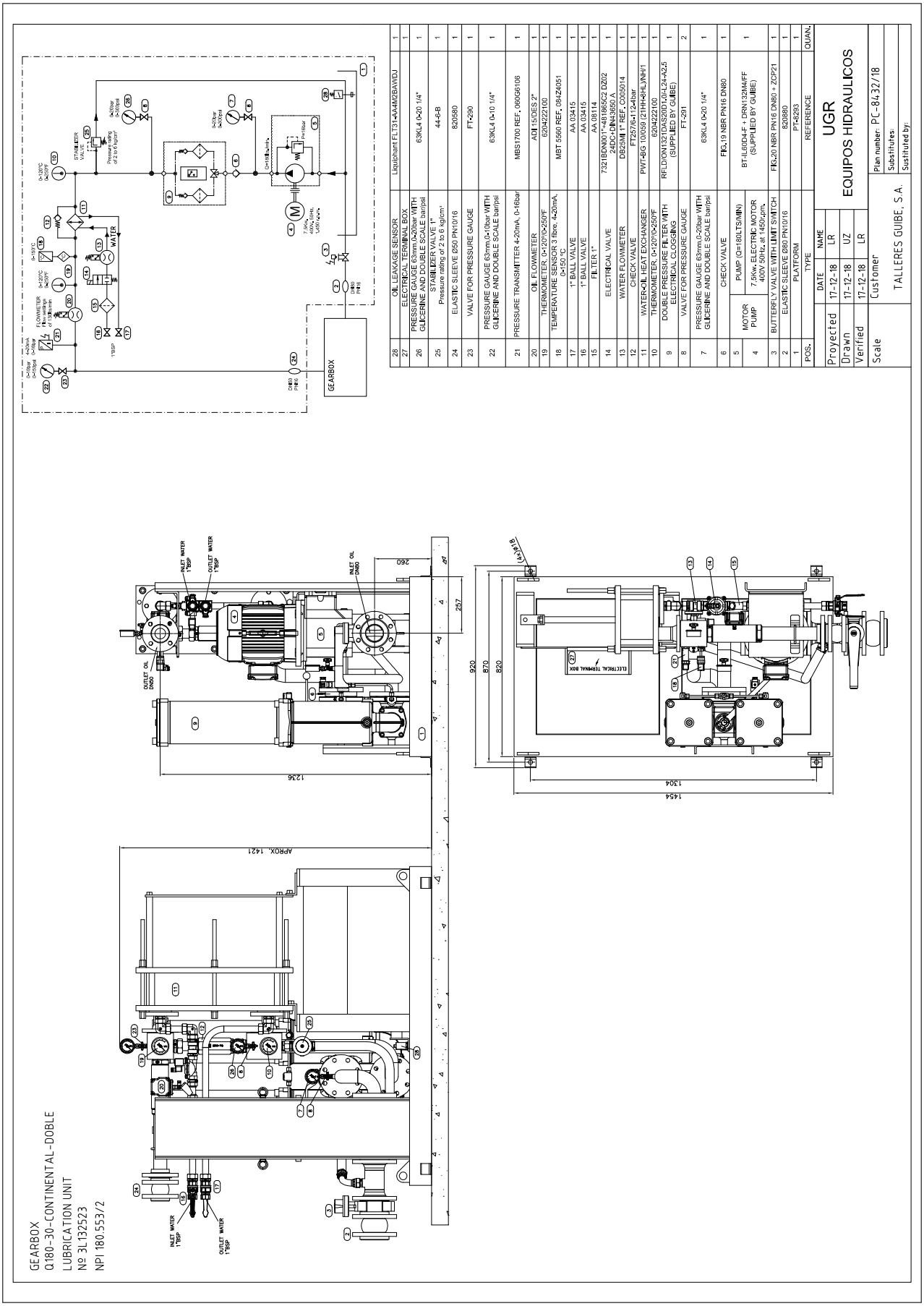
Tabela B.7: FMECA válvula de drenagem.

Responsável do Processo: Página 1 de 1
Grupo de Trabalho: Data FMEA (Orig.): 15/04/2020
Líder do Grupo de Trabalho: Elaborado por: Bruno Ribeiro Data FMEA (Rev.): 14/09/2020

COMPONENTE	FUNÇÃO	MODO POTENCIAL DA FALHA	EFEITOS POTENCIAIS DA FALHA	SEV	CLAS	CAUSAS POTENCIAIS DA FALHA	OCO	CONTROLOS ATUAIS	DET	NPR	AÇÕES RECOMENDADAS
1 Válvula de drenagem	Drenar o lubrificante	1 Não abre	1 Não se consegue realizar a drenagem			1 Micro corrosão		Testar			Substituição

Apêndice C

Unidade de Lubrificação da Caixa Redutora



POS.	TYPE	REFERENCE	QUAN.
1	PLATFORM	P1-8293	1
2	ELASTIC SLEEVE Ø80 PN10/16	820880	1
3	BUTTERFLY VALVE WITH LIMIT SWITCH	FIG.200 NBR PN16 DN80 + ZCP21	1
4	MOTOR PUMP — PUMP (Q=180LTS/MIN)	BT-IL60D4-F + DRN132M4/FF (SUPPLIED BY GUIBE)	1
	MOTOR PUMP — 7,5Kw. ELECTRIC MOTOR 400V 50Hz. at 1450rpm.		
5	CHECK VALVE	FIG.19 NBR PN16 DN80	1
6	PRESSURE GAUGE 63mm.0-25bar WITH GLICERINE AND DOUBLE SCALE bar/psi	63KL4 0-20 1/4"	1
7	PRESSURE TRANSMITTER 4-20mA, 0-16bar	MBS1700 REF. 060G6106	1
8	VALVE FOR PRESSURE GAUGE	FT-291	2
9	DOUBLE PRESSURE FILTER WITH ELECTRICAL CLOGGING	RFLD/DN132/DAS20D1,0/L24-42J5 (SUPPLIED BY GUIBE)	1
10	THERMOMETER, 0-120ºC/0-250ºF	6204222100	1
11	WATER-OIL HEAT EXCHANGER	PW7-BG 10/059 (21HH-8HL)NH/1	1
12	CHECK VALVE	FT257/6-1124bar	1
13	WATER FLOWMETER	DB25MI 1" REF. C005014	1
14	ELECTRICAL VALVE	7321BDN001"-481865C2 D202 24DC+DIN43650 A	1
15	FILTER 1"	AA 08114	1
16	1" BALL VALVE	AA 03415	1
17	1" BALL VALVE	AA 03415	1
18	TEMPERATURE SENSOR 3 fibres, 4-20mA. 0-150 ºC	MBT 5560 REF. 084Z4051	1
19	THERMOMETER, 0-120ºC/0-250ºF	6204222100	1
20	OIL FLOWMETER	ADI 15/DES 2"	1
21	PRESSURE TRANSMITTER 4-20mA, 0-16bar	MBS1700 REF. 060G6106	1
22	PRESSURE GAUGE 63mm.0-10bar WITH GLICERINE AND DOUBLE SCALE bar/psi	63KL4 0-10 1/4"	1
23	VALVE FOR PRESSURE GAUGE	FT-290	1
24	ELASTIC SLEEVE Ø60 PN10/16	820680	1
25	STABILIZER VALVE 1" Pressure rating of 2 to 6 kg/cm²	44-6-B	1
26	PRESSURE GAUGE 63mm.0-250bar WITH GLICERINE AND DOUBLE SCALE bar/psi	63KL4 0-20 1/4"	1
27	ELECTRONIC LEAKAGE CONTROL BOX		1
28	OIL LEAKAGE SENSOR	Liquishant FLT31-A44M26AWDJ	1

Apêndice D

Catálogos Contadores de Partículas

D.1 Contadores HYDAC

D.1.1 MCS 1000

HYDAC INTERNATIONAL



MetallicContamination Sensor
MCS 1000 Series

Description

The MetallicContamination Sensor MCS 1000 monitors metallic particle contamination in lubrication fluid. The particles are detected by inductive measurement whereby a coil system is the core element of the sensor. It detects metallic particles (ferromagnetic Fe and non-ferromagnetic nFe) in the > 70 µm size range.

The MCS 1000 continuously monitors the condition of the system and provides information on any early-stage damage.

The sensor is therefore a reliable tool for condition-based maintenance.

As an option the MCS 1000 series can be supplied with an Ethernet interface. This means that the sensors can easily be connected to existing networks.

Certified by Germanischer Lloyd Industrial Service

GL

GL Wind Order No. 4800/08/41043/254

Advantages

- Detection of early-stage damage, for example, in a gearbox, .
- Prevents costly turbine downtime
- The perfect complement to optical sensors
- Measurement of metallic particles (ferromagnetic Fe and non-ferromagnetic nFe) > 70 µm
- Condition monitoring systems in wind power turbines which have already been certified by GL do not lose their certification if the MCS 1000 is built into the system after certification, as the component itself is certified.

Technical specifications

Hydraulic data	**MCS 15xx**	**MCS 14xx**	**MCS 13xx**
Flow rate	10 to 200 l/min	2 to 40 l/min	0.4 to 8 l/min
Operating pressure	Maximum 20 bar		
Fluid temperature range	-40 to +85°C		
Inlet/outlet	Flange connection, SAE 4" to ISO 6162-1	Flange connection, SAE ¾" to ISO 6162-1	Flange connection, SAE ½" to ISO 6162-1
Electrical data			
Supply voltage	9 to 36 V DC, residual ripple < 10%		
Power consumption	Max. 5 W		
Electrical data			
2 configurable switch outputs (n-switching Power MOSFET, normally open)	1 x ferromagnetic particles (Fe) 1 x non ferromagnetic particles (nFe) or 1 x ferromagnetic (Fe) + non ferromagnetic (nFe) particles 1 x status signal		
Switching logic	Active Low or Active High		
Length of switching pulse	can be set from 5 to 200 ms		
Switch outputs	max. 1.5A		
RS485 interface	2 wire, half duplex		
HSI (**H**YDAC **S**ensor **I**nterface)	1 wire, half duplex		
Ethernet Interface	10 Base-T / 100 Base-Tx		
General data			
Environmental temperature	-40 to +70°C		
Diameter sensor cross-section	1"	½"	¼"
Protection class to DIN 40050	IP 67		
Weight	≈ 3.5 kg	≈ 2.5 kg	≈ 3.0 kg
Dimensions (L x W x H)	83 x 162 x 140 mm	83 x 120 x 120 mm	83 x 120 x 120 mm
Vibration 10 - 58 Hz 58 - 500 Hz	0.75 mm (amplitude) 10 g (acceleration)		
Shock	40 g		
Detection limits			
Ferromagnetic (Fe) particles	> 200 µm (particle with volume equivalent to that of a sphere of given Ø)	> 100 µm	> 70 µm
non-ferromagnetic (nFe) particles	> 550 µm (particle with volume equivalent to that of a sphere of given Ø)	> 300 µm	> 200 µm
Particle rate	> 25/s		

E 7.619.4/09.16

Items supplied

– MCS 1000 series
– O-rings (NBR and FPM)
– Installation and Maintenance Instructions

Accessories

– SAE 4" flange adapter set, for pipe or hose connection, 42L according to ISO 8431-1
Consisting of:
2x flange adapters
2x O-rings
8x hex. head screws
8x washers
8x spring washers
Part No.: 3435426
– SAE ¾" flange adapter set, for pipe or hose connection, ½" according to ISO 8431-1
Consisting of:
2x flange adapters
2x O-rings
8x hex. head screws
Part No.: 3588249
– Flange adapter plate, SAE 4" – SAE 1 ½"
Part No.: 3442518
– Female connector with 2 m cable, screened, 8-pole, M12x1,
Part No.: 3281220
– Female connector with 5 m cable, screened, 8-pole, M12x1,
Part No.: 3281239
– Extension cable 5 m, female connector 8-pole, M12x1 / male connector 8-pole, M12x1,
Part No.: 3281240
– Female connector with screw terminal, 8-pole, M12x1,
Part No.: 3281243

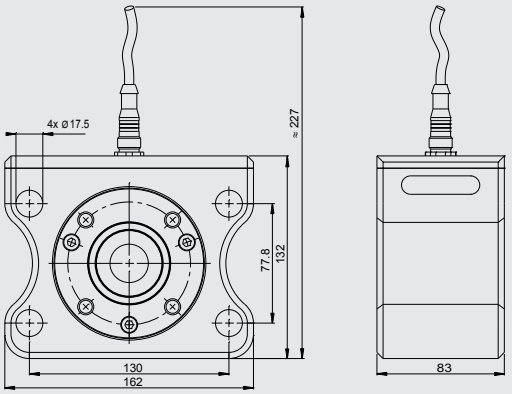
Model code

MCS 1 5 1 0 - 5 - 0 / 000

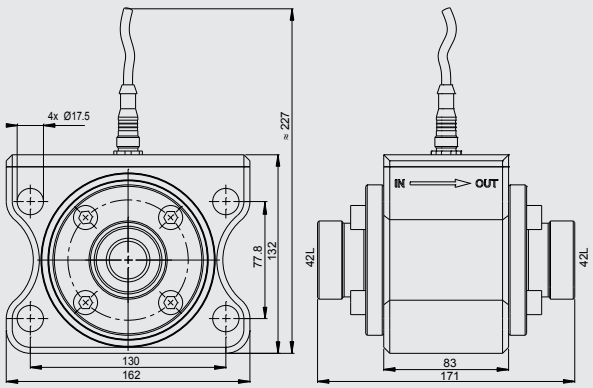
Type
MCS = MetallicContamination Sensor
Series
1 = 1000 Series
Contamination / Sensor cross section
3 = particles > 70 µm / ¼"
4 = particles > 100 µm / ½"
5 = particles > 200 µm / 1"
Signal technology
1 = 2x switch outputs/RS485 (HSI protocol)
2 = 2x switch outputs/RS485 (Modbus RTU)
7 = 2x switch outputs/RS485 (HSI protocol) ethernet (HSI TCP/IP/Modbus TCP)
Media
0 = mineral and synthetic oils (particularly those used in wind energy sector)
Hydraulic connection
1 = flange connection, SAE ½" to ISO 6162-1
2 = flange connection, SAE ¾" to ISO 6162-1
5 = flange connection, SAE 4" to ISO 6162-1
Electrical connection
0 = M12x1, 8-pole
1 = M12x1, 8-pole and ethernet M12x1, 4-pole, coding D to IEC61076-2-101
Modification number
000 = standard
TTV = external O-rings in low temperature FPM (Viton®)

Dimensions for MCS 15xx (in mm)

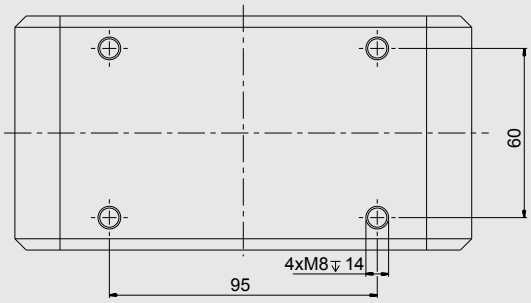
Flange connection, SAE 4" to ISO 6162-1



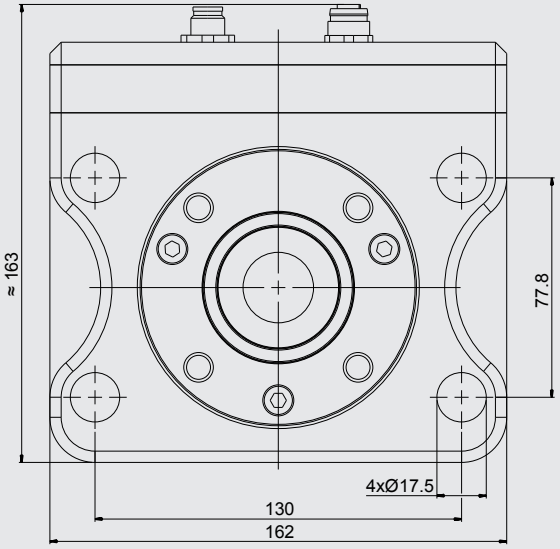
MCS with accessory flange adaptor
for pipe or hose connection 42L to ISO8431-1

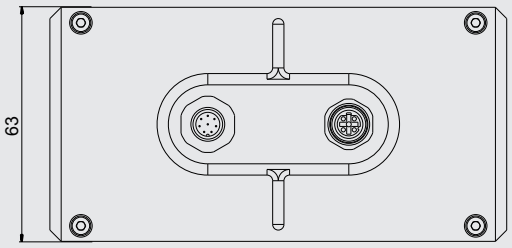


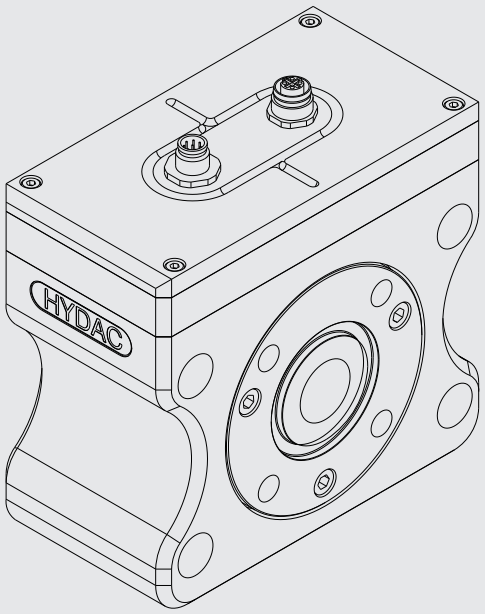
Mounting hole pattern



Dimensions with Ethernet connection for MCS 15xx (in mm)

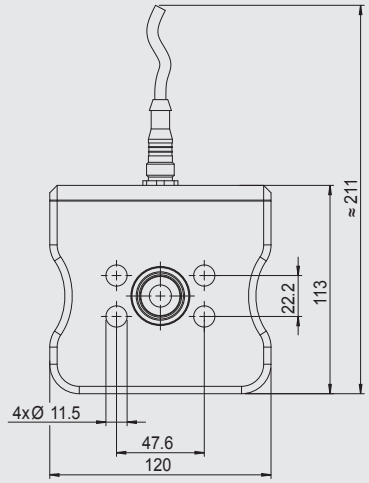




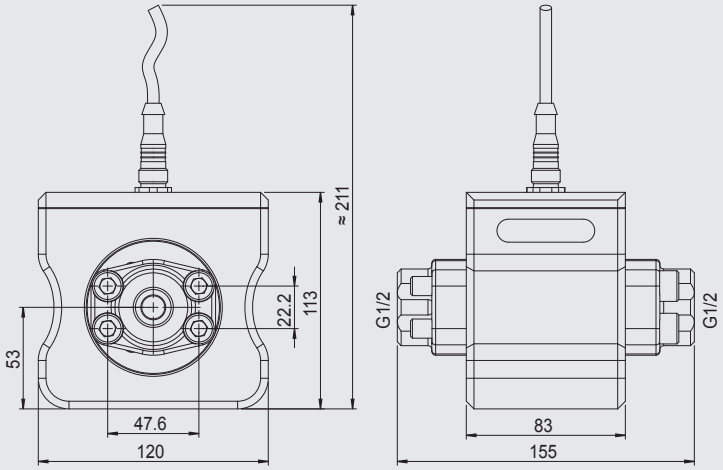


Dimensions for MCS 14xx (in mm)

Flange connection, SAE ¾" to ISO 6162-1



MCS with accessory flange adaptor
for pipe or hose connection ½" to ISO8431-1



Certified by Germanischer Lloyd Industrial Service

The Metallic Contamination Sensor was certified in February 2010 as an "add on" for condition monitoring systems in wind power turbines.
The certification was carried out by **Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH.**

GL Renewables certification

GL is one of the leading certification authorities in the wind energy sector, performing tests, certification procedures and appraisals for wind power turbines and their components.

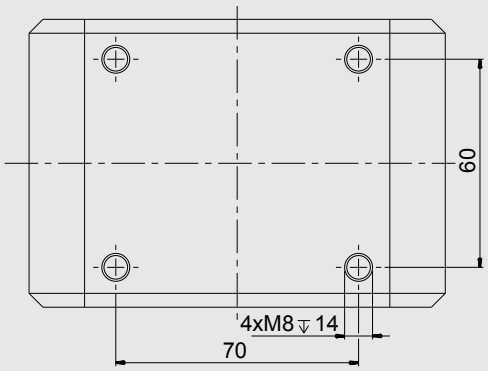
GL Wind Order No. 4800/08/41043/254

What is the basis of the certification?

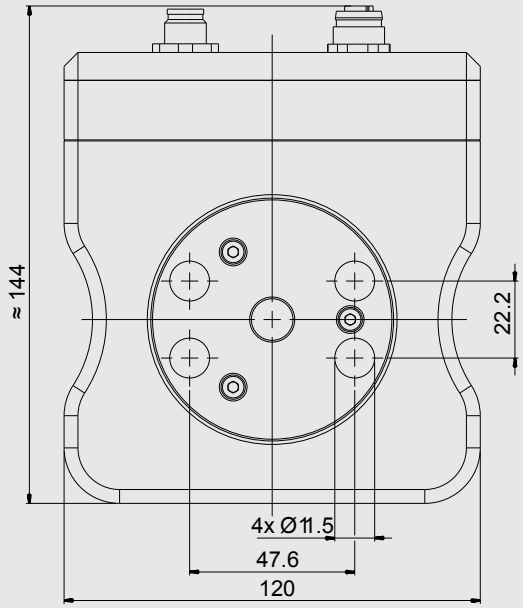
The Guideline for the Certification of Condition Monitoring Systems (CMS) for Wind Turbines, Edition 2007

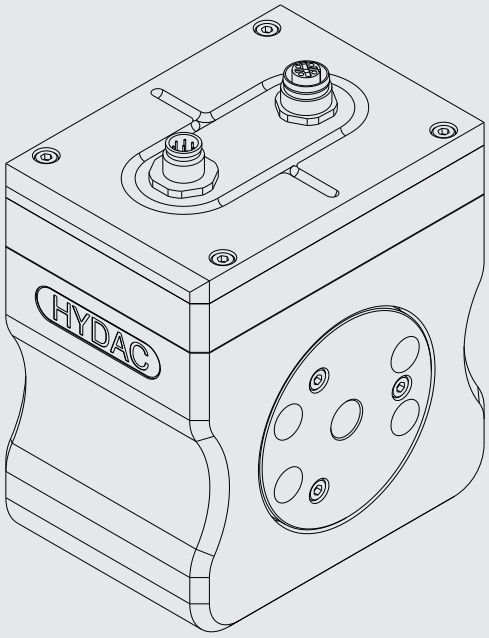
This guideline states that the sensors must be capable of distinguishing between ferromagnetic and non-ferromagnetic particles and that installation in the cooling filtration circuit must be upstream of the filter.

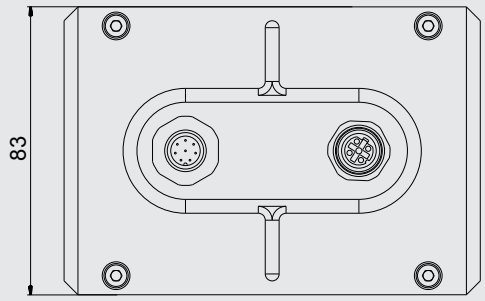
Mounting hole pattern



Dimensions with Ethernet connection for MCS 14xx (in mm)

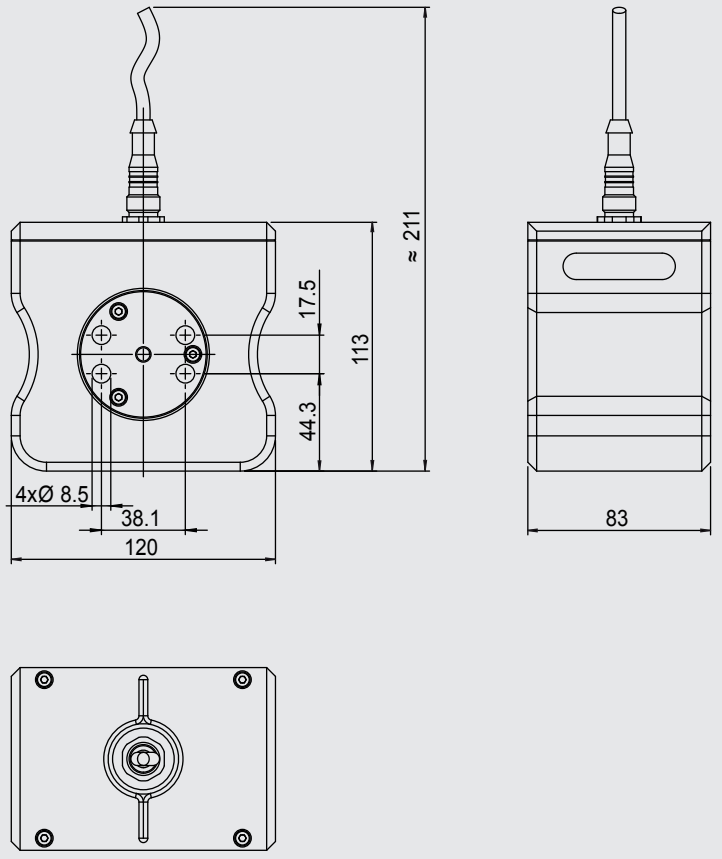




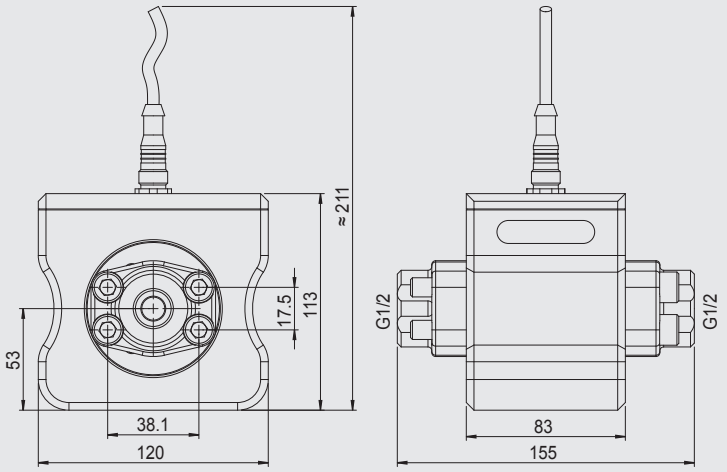


Dimensions MCS 13xx (in mm)

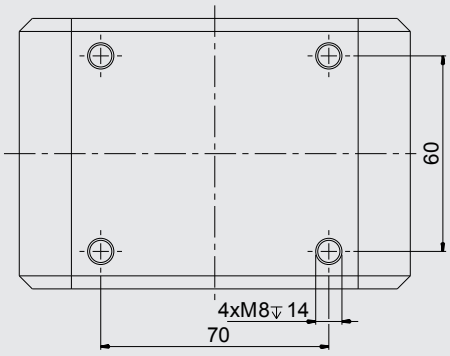
Flange connection, SAE ½" to ISO 6162-1



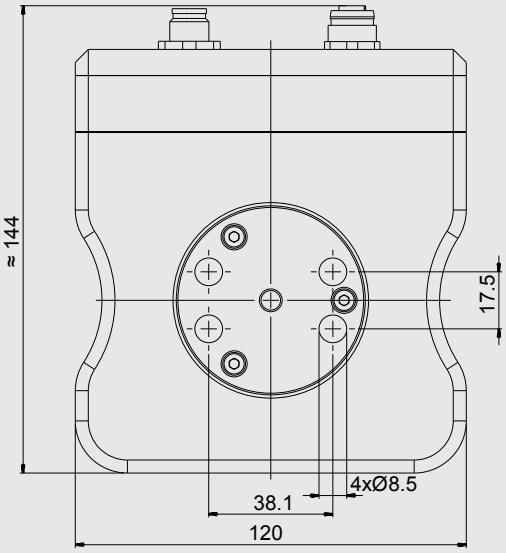
MCS with accessory flange adaptor
for pipe or hose connection ½" to ISO8431-1

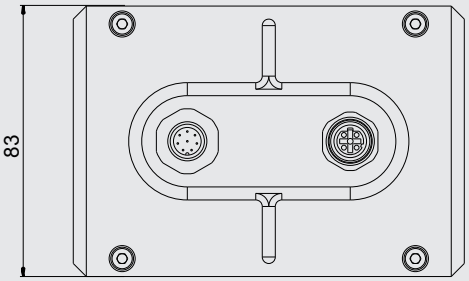


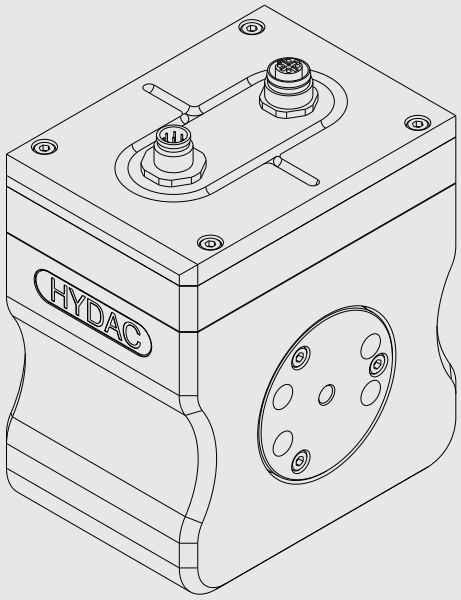
Mounting hole pattern



Dimensions with Ethernet for MCS 13xx (in mm)







Note

The information in this brochure relates to the operating conditions and applications described.

For applications and operating conditions not described, please contact the relevant technical department.

Subject to technical modifications.

HYDAC FILTER SYSTEMS GMBH
Justus-von-Liebig-Str.
D-66280 Sulzbach / Saar
Tel.:+49 (0) 6897/509-01
Fax:+49 (0) 6897/509-9046
Internet: www.hydac.com
E-mail: filtersystems@hydac.com

E 7.619.4/09.16

D.2 Contadores FILTERTECHNIK

D.2.1 PC 9001

Oil Analaysis and Polishing Equipment

Filtertechnik

PC9001

Online Particle Counter - Affordable, Accurate Analysis



Filtertechnik brings you the latest technology for contamination control. The PC9001 particle counter comes with archiving and trending software providing a cost effective analysis solution and a must have for service engineers.



HOW CLEAN IS YOUR OIL?

Oil Analaysis and Polishing Equipment

Filtertechnik

Introduction

Perfect for proactive maintenance and on-line monitoring, the PC9001 is a continuous particle counter with instant LED readout, computer interface and trending software. It is simple to use, low cost and can be used as an alarm to notify you of any changes in contamination levels. It is also ideal for plotting ISO cleanliness trends with accuracy at +/- 0.5 an ISO code, the PC9001 utilises the exact same laser particle counting technology found in more expensive laboratory particle counting equipment. The PC9001 can be used to trigger alarms or operation of filtration systems.



THE PC9001 CAN BE INSTALLED ON ANY OF OUR FUEL/OIL POLISHING UNITS

The PC9001 provides early warning sign for:

- Rise in contamination
- Component wear
- Filter and seal failure
- Water ingress
- Oil oxidation
- Cavitation



Features

- Particle counting with LED readout
- Computer software for archiving data and trends
- Can be installed on all of our Fuel or Oil Polishing Units
- Cost effective contamination control
- Accuracy is +/- 0.5 of an ISO code
- Also available as a portable system in our Particle Pal

Benefits

- Low cost and compact
- Highly accurate
- Robust design
- Ideal for fluid cleanliness trending
- Alarm indication with relay for controlling systems
- Real time analysis of fluid cleanliness - ISO, SAE & NAS class readout
- Easy to install
- 500 bar pressure



ALSO AVAILABLE AS A PORTABLE SYSTEM FOR REAL TIME RESULTS IN MINUTES

Oil Analaysis and Polishing Equipment

Filtertechnik

PC9001- TECHNICAL SPECIFICATION

Model	PC9001
Dimensions	8.9 cm (W) 10.7 cm (D) 8.9 cm (H)
Enclosure	IP 66
Fitting connections	SAE -4; SAE -8
Power requirements	9 to 33 VDC, 150 mA
Storage temperature	-40 to 85°C (-40 to 185°F)
Operating temperature	-10 to 60°C (-14 to 140°F)
Altitude limit	2000 m (6562 ft)
Overvoltage category	I
Pollution degree	4
Protection class	III
Light source	Laser diode, Class 1
Particle size/channel	4,6, 14 and 21 μm (ISO MTD)
Storage/operating humidity	97% relative humidity, non-condensing
Fluid compatibility	Hydraulic and lubrication oils, mineral, synthetic (phosphate ester compatible) diesel fuels
Fluid viscosity	2 to 424 cSt[1]
Reports	ISO 4406, NAS and SAE cleanliness code
Wetted materials	Brass, aluminium (anodised), steel, stainless steel, sapphire, Aflas®
Performance verification	Optional validation certificate available (ISO MTD at 2.8 mg/L concentration)
Reproducibility	±0.5 ISO code (minimum concentration ISO MTD 2.8 mg/L, maximum ISO code is 29)
Weight	746 grams (2lb)
Serial interface	RS32 and RS485, 9600 Baud, 8 data bits, no parity, 1 stop bit
Communication protocol	MODBUS RTU
Flow rate for PC9001-31 & PC9001-61	50 to 500 ml/min (0.01 to 0.1 gal/min)
Flow rate for PC9001-21 & PC9001-51	3.8 to 45.4 L/min (1 to 12 gal/min)
Sample temperature	0 to 60°C (32 to 140°F)

* Technical Specification could change at any time

Filtertechnik Ltd, 1 Central Park, Lenton Lane, Nottingham, NG7 2NR. United Kingdom.
t: +44 (0)115 9003 600 e:sales@filtertechnik.co.uk www.filtertechnik.co.uk

D.3 Contadores PARKER

D.3.1 IcountPD





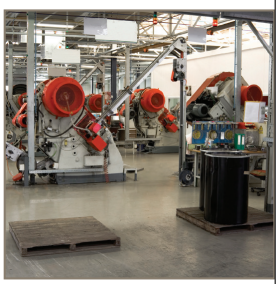
aerospace
climate control
electromechanical
filtration
fluid & gas handling
hydraulics
pneumatics
process control
sealing & shielding





icountPD

Online Particle Detector



Parker

ENGINEERING YOUR SUCCESS.

31

icountPD

The icountPD from Parker represents the most up-to-date technology in solid particle detection.



The design dynamics, attention to detail, and small size of the permanently mounted, on-line particle detector brings a truly innovative product to all industry. The laser based, leading-edge technology is a cost effective market solution to fluid management and contamination control.

3 Versions Available

Standard icountPD is designed for test stand, flushing skids, filter carts and other industrial applications.

icountPDR is designed for mobile equipment or any outside use other than hazardous environment.

icountPDZ is intended for applications that require a Zone II safety such as off-shore platforms or any other hazardous environment.

For Zone I applications the standard icountPD can be used within a NEMA7 enclosure.



icountPDR

Features and benefits of the icountPD include:

- Independent monitoring of system contamination trends.
- Early warning LED or digital display indicators for Low, Medium and High contamination levels.
- Moisture % RH LED indicator (optional).
- Cost effective solution in prolonging fluid life and reducing machine downtime.
- Visual indicators with power and alarm output warnings.
- Continuous performance for dependable analysis.
- Hydraulic, phosphate ester & fuel fluid compatible construction.
- Self diagnostic software.
- Fully integrated PC/PLC integration technology such as:

  RS232 and 0-5 Volt, 4-20mA, and CANBUS J1939.

Typical Applications

Mobile Equipment
- Earth Moving Machinery
- Harvesting
- Forestry
- Agriculture

Power Generation
- Wind Turbines
- Gearboxes
- Lubrication Systems

Industrial Equipment
- Production Plants
- Fluid Transfers
- Pulp & Paper
- Refineries

Maintenance
- Test Rigs
- Flushing Stands

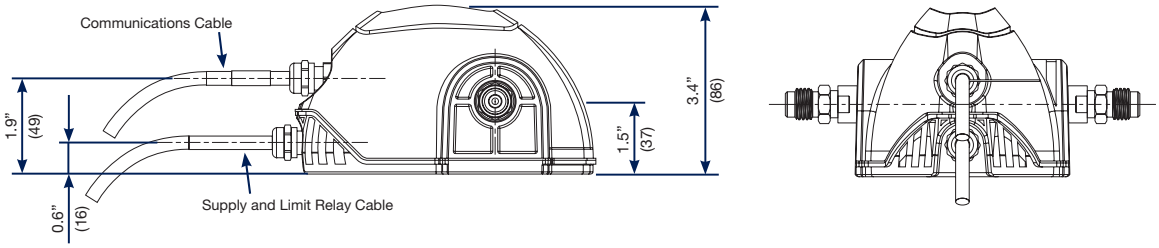


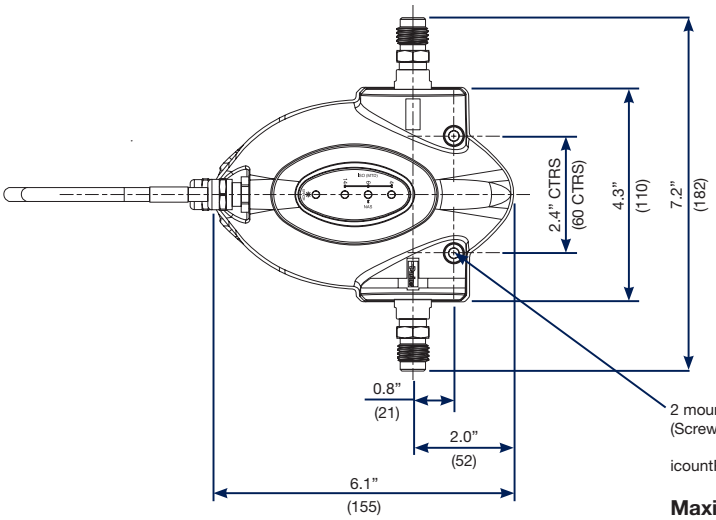
icountPD/icountPDR/icountPDZ

Diagnostic self check start-up time	5 seconds
Measurement period	5 to 180 seconds
Reporting interval through RS232	0 to 3600 seconds
Digital LED display update time	Every second
Limit relay output	Changes occur +/- 1 ISO code at set limit (Hysteresis ON) or customer set (Hysteresis OFF)
4-20mA output signal	Continuous
Principle of operation	Laser diode optical detection of actual particulates
Reporting codes	ISO 7 – 21, NAS 0 – 12, (AS 00 – 12 contact Parker) Icount will also report less than ISO 7, subject to the statistical uncertainty defined in ISO4406:1999, which is shown in the RS232, reporting results as appropriate e.g “>6”
Calibration	By recognized on-line methods, confirmed by the relevant International Standards Organization procedures
Calibration recommendation	12 months (24 months for icountPDZ)
Performance	+/- 1 ISO Code (dependant on stability of flow)
Reproducibility / Repeatability	Better than 1 ISO Code
Power requirement	Regulated 9 to 40Vdc
Maximum current draw	150mA
Hydraulic connection	icountPD: M16 x 2 hydraulic test points (5/8” BSF for aggressive version) icountPD Z2: Size: 066, Connection: EO 24 cone end
Flow range through the device	40 to 140 ml/min (optimum flow = 60ml/min)
Online flow range via System 20 Inline Sensors	Size 0 = 1.59 to 6.6 gpm - (optimum flow = 3.96 gpm) Size 1 = 6.34 to 26.4 gpm - (optimum flow = 18.5 gpm) Size 2 = 44.9 to 100 gpm - (optimum flow = 66 gpm)
Required differential pressure across Inline Sensors	5.8 psi (0.4 bar) minimum
Viscosity range	10 to 500 cSt, 1 to 500 cSt
Temperature (icountPD and icountPDR) Temperature (icountPDZ)	Operating environment: -4°F to +140°F (-20°C to +60°C) Storage: -40°F to +176°F (-40°C to +80°C) Operating fluid: +32°F to +185°F (0°C to +85°C) Operating environment: -22°F to +140°F (-30°C to +60°C) Storage: -40°F to +176°F (-40°C to +80°C) Operating fluid: +41°F to +176°F (+5°C to +80°C)
Working pressure	30 to 6,000 PSI (2 to 420 bar)
Moisture sensor calibration	±5% RH (over compensated temperature range of +10°C to +80°C)
Operating humidity range	5% RH to 100% RH
Moisture sensor stability	±0.2% RH typical at 50% RH in one year
Certification	IP66 rated (icountPD), IP69K (icountPDZ) EMC/RFI –EN61000-6-2:2001(icountPD, PDR), EN6100-6-2:2005 (icountPDZ) EN61000-6-3:2001(icountPD, PDR), EN61000-6-3:2007 (icountPDZ)
Materials	Stainless Steel case construction (icountPDZ) Stainless Steel hydraulic block (icountPD and icountPDR) Fluorocarbon seals
Dimensions	icountPD: 7.2” x 6.1” x 3.4” (182mm x 155mm x 86mm) icountPDR: 4.52” x 7.01” x 4.53” (114.7mm x 178.8mm x 115mm) icountPDZ: 10.2” x 4.49” x 4.33” (260mm x 114mm x 110mm)
Weight	icountPD: 2.9 lbs. (1.3 kg), icountPDZ: 5.73 lbs. (2.6 kg)
Default Settings	See table on page 39

icountPD

Dimensions / Installation Details





2 mounting locations to suit M5 socket head cap screw.
(Screw pack supplied with icountPD)

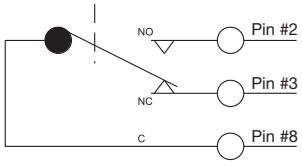
icountPD flange thickness = 0.4" (10mm)

Maximum Torque 5Nm

dimensions in inch (mm)

***Limit Relay Wiring Instructions**

NORMALLY OPEN
NORMALLY CLOSED
COMMON

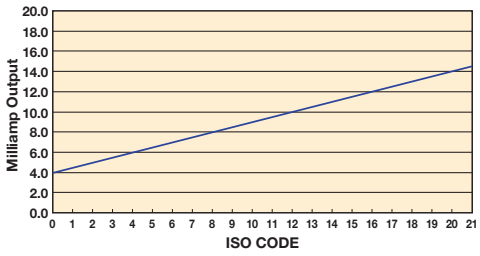


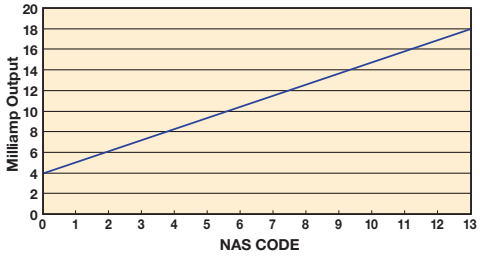
icountPD

Variable mA Output Settings

The following table can be used to equate the analog output for channels A, B, and C independently.

Example: ISO code 12 is equal to 10mA.





mA	ISO
4.0	0
4.5	1
5.0	2
5.5	3
6.0	4
6.5	5
7.0	6
7.5	7
8.0	8
8.5	9
9.0	10
9.5	11
10.0	12
10.5	13
11.0	14
11.5	15
12.0	16
12.5	17
13.0	18
13.5	19
14.0	20
14.5	21
15.0	**
15.5	**
16.0	**
16.5	**
17.0	**
17.5	**
18.0	**
18.5	**
19.0	OVERRANGE
19.5	OVERRANGE
20.0	ERROR

mA	NAS
4	00
5	0
6	1
7	2
8	3
9	4
10	5
11	6
12	7
13	8
14	9
15	10
16	11
17	12
18	**
19	**
20	ERROR

4-20mA output settings

ISO Setting

mA current = (ISO Code / 2) +4
eg. 10mA = (ISO 12 / 2) +4
or
ISO Code = (mA current - 4) *2
eg. ISO 12 = (10mA -4) *2

NAS Setting

mA current = NAS Code +5
eg. 15mA = NAS 10 +5
or
NAS Code = mA current -5
eg. NAS 10 = 15mA – 5

Variable Voltage Output Settings

The variable voltage output option has the capability of two different voltage ranges: a 0-5Vdc range as standard, and a user-selectable 0-3Vdc range.

The full list of commands on how to change the voltage output is available from Parker.

The following tables can be used to relate the analog output to an ISO or NAS code.

For example, in a 0-5Vdc range, ISO code 16 is equal to an output of 3.5Vdc. In a 0-3Vdc range, ISO code 8 is equal to an output of 1.0Vdc.

Table relating ISO codes to voltage output

ISO	Err	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0-5Vdc	<0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.5
0-3Vdc	<0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3

ISO	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	Err
0-5Vdc	2.7	2.9	3.1	3.3	3.5	3.7	3.9	4.1	4.3	4.5	4.7	>4.8
0-3Vdc	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	>2.45

Table relating NAS codes to voltage output

ISO	Err	00	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Err
0-5Vdc	<0.4	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.9	4.2	4.5	>4.6
0-3Vdc	<0.2	N.S.	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.5	2.7	>2.8

icountPD

Display Parameters (ISO 4406/NAS 1638)

Digital display indication

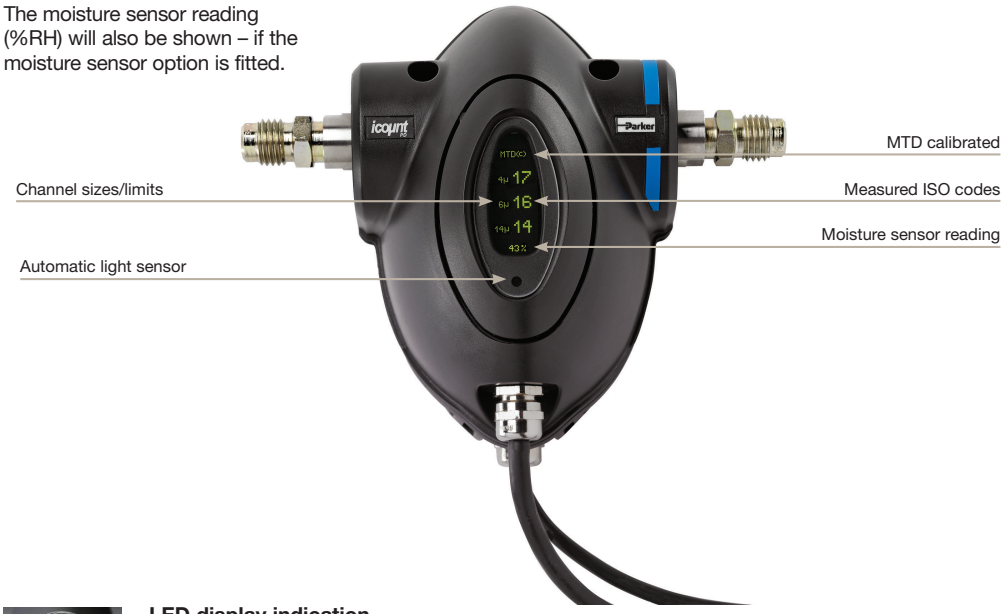
The digital display will show the actual measured codes, the channel (µ) size and the user definable limits. Visible display of the channel size and user definable limits will alternate.

The moisture sensor reading (%RH) will also be shown – if the moisture sensor option is fitted.

The order of trigger for both of the codes and moisture sensor option is:

- Solid digit(s) = code(s) that are at or below the set point (limit)
- Flashing digit(s) = code(s) that are above the set point (limit)

The display for ISO4406 and NAS1638 are identical. The ISO display is shown below.





LED display indication

The LED display uses 3 sets of LED for the indication of ISO 4406 and NAS1638 code figures. Individual code lights will trigger based on the customer settings.

The order of trigger will be:

- Solid green = one ISO code, or better, below the set point (limit)
- Blinking green = ISO code at the set point (limit)
- Solid red = one ISO code above the set point (limit)
- Blinking red = two ISO codes, or more, above the set point (limit)

Moisture sensor output settings

The moisture sensor is an option that can be included when specifying the icountPD. The moisture sensor reports on the saturation levels of the fluid passing through the icountPD sensing cell. The output is a linear scale, reporting within the range of 5% saturation to 100% saturation.

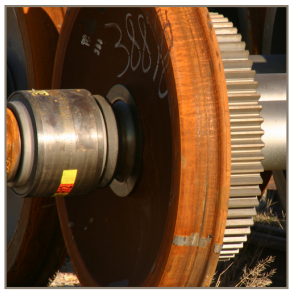
Saturation	4-20mA	0-3Vdc	0-5Vdc
5%	4.8	0.15	0.25
25%	8	0.75	1.25
50%	12	1.50	2.50
75%	16	2.25	3.75
100%	20	3.00	5.00

D.3.2 Metallic Wear Debris Sensor





aerospace
climate control
electromechanical
filtration
fluid & gas handling
hydraulics
pneumatics
process control
sealing & shielding





Metallic Wear Debris Sensor

Real time indication of condition



Parker

ENGINEERING YOUR SUCCESS.

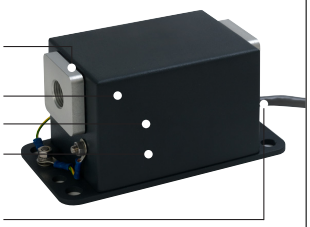
The Parker Kittiwake Metallic Wear Debris Sensor goes beyond the scope of normal wear debris sensors to offer even smaller size resolution. With an unbeatable detection range, the sensor provides a debris count for both ferrous and non-ferrous metals.

It's no secret that particles result from wear. It is imperative to know, not just the number of particles which pass through your system, but also the size and metallic composition. The Parker Kittiwake Metallic Wear Debris Sensor goes beyond normal protection systems, allowing you to monitor in real time and take immediate action on the first indication of change, thereby preventing all types of failure.

The Parker Kittiwake Metallic Wear Debris Sensor can be mounted within almost any lubrication system, on any type of machine. By using proven inductive coil technology, combined with smart algorithms to provide a particle size distribution count, the sensor measures ferrous and non-ferrous metals resulting from the wear debris within the lubricant. This puts the user in control. The severity of the problem increases with an escalation in the production of larger wear debris particles.

With both digital and analogue outputs, the sensor can be easily integrated into existing condition monitoring and operating control systems, putting the user in contol. Whether it's checking the health of the machine or alerting to changing wear patterns, the sensor provides instant information, complementing existing laboratory oil analysis programmes and helping the user make informed maintenance planning decisions.





Specification

Ambient Temperature:	-20 to 70ºC (-4 to 158ºF)
Analogue Outputs:	2 x opto isolated 4 - 20 mA, 1 x alarm contacts (0.1 A max)
Communications:	Modbus over RS485 and TCP / IP*
Connections:	1/2"BSPP female
Detection:	> 40 micron (0.04 mm) [0.00157 inch] ferrous metal > 135 micron (0.135 mm) [0.0531 inch] non-ferrous metal
Output:	Simultaneous quantification of metallurgical composition and size category of particles in the fluid
Fluid Compatibility:	Petroleum, synthetic oils and water / oil emulsions
Fluid Temperature:	-20 to 85ºC (-4 to 185ºF)
Flow Rate:	0.3 - 1.9 ms-1
Sensor Bore:	Diameter 10 mm, length 120 mm
Max Fluid Pressure:	20 bar (290 psi)
Max Fluid Viscosity:	500 cSt
Power Supply:	18 - 30 V DC
Protection:	IP67
Weight:	3 kg

*Contact Parker Kittiwake for enquiries about CAN

Ordering Information

Product Code	Description
FGK19567PA	Metallic Wear Debris Sensor

All sensors come complete with software for data downloading and trending. Contact Kittiwake for information about the wide range of installation accessories and alternative options that are available to suit your specific application.

Typical Applications

- Wind Turbines
- Mud Pumps
- Large Gearboxes Bearings

© 2013 Parker Hannifin Corporation

MAK19755PA Issue 1

Parker Kittiwake
Hydraulic Filter Division Europe
3 - 6 Thorgate Road Littlehampton
West Sussex BN17 7LU United Kingdom
Tel: +44 (0)1903 731470
Fax: +44 (0)1903 731480
Email: kittiwakesales@parker.com
Web: www.kittiwake.com

D.4 Contador PAMAS

D.4.1 PAMAS S50

PAMAS
Partikelmess- und Analysesysteme



PAMAS S50
Contador de Partículas Online para monitoramento de óleo

Contador de partículas online fixo de alta resolução para monitoramento de óleo

Aplicaciones:

- **Contador de partículas online fixo de alta reso lução para monitoramento de óleo**
- **Óleo lubrifi cante**
- **Teste de engrenagens**
- **Limpeza de peças**

- baixo custo, alta performance, contador de partículas online a laser com oito canais
- fácil integração às necessidades industriais
- Display LED mostrando a classe de contamina-ção de acordo com a ISO 4406, nos tamanhos > 4 µm(c), > 6 µm(c) e > 14 µm(c)
- Os sensores volumétricosPAMAS medem 100% do fl uxo de amostra e garantem maior precisão e reprodutibili dade.
- O número de partículas e a distri buição de ta-manho dos 8 canais são indicados em tempo real ao PC ou PLC (controlador lógico programável). O software de análise (opcional) salva os result ados e mostra tudo em tabelas e gráfi cos. Isto permite visualizar facilmente as tendências e eventos que possam ocorrer.
- Devido sua precisão, opções de alarme e monit-oramento de tendências, o PAMAS S50 reduzo risco de falhas e assegura a confi ança no sistema que está sendo controlado

REV 12/2019

IN THE WORLD OF PARTICLES PAMAS COUNTS

PAMAS S50
Detecta falhas em estágios iniciais

O **PAMAS S50** mede o grau de limpeza de óleos sintéticos e minerais em diferentes ambientes industriais. Sua construção robusta o torna resistente a influências mecânicas, ambientais e elétricas.

Alerta em caso de abrasão:
Inicio de falhas em sistemas de óleos hidráulico e de lubrificação resultam no aparecimento prematuro de partículas grandes. Devido aos oito canais de tamanho, o contador de partículas online **PAMAS S50** está apto a detectar partículas maiores e alertas imediatos em caso de abrasão ou de falha mecânica. Avarias na produção podem ser evitadas com antecedência.

Software:
A PAMAS oferece dois diferentes softwares para análise de medições de resultados:

- **PAMAS POV (PAMAS Online Visualisation):** Software para visualização online dos resultados e monitoramento da tendência por longo período
- **PAMAS PCT (PAMAS Component Test):** Software para monitoramento online da limpeza de peças e de seus testes



Size µm (c)	Particles / 100 ml
> 4	29497
> 6	7090
> 10	2393
> 14	960
> 21	383
> 25	190
> 38	133
> 70	12

Além de fornecer o código ISO, o PAMAS S50 mede o número de partículas em oito canais de tamanhos diferentes e dá um alerta inicial no caso de falhas em máquinas ocasionadas pela presença de grandes partículas (i.e. desgaste e abrasão).

Amostragem com e sem pressão:
Se a aplicação possue pressão própria, o contador pode funcionar sem bomba interna. O **PAMAS S50** determina constantemente o fluxo que passa pelo sensor obtendo precisão nos resultados, independente da pressão de entrada. O fluxo poderá variar na faixa entre 5 e 50 ml/min.

Para aplicações sem pressão, o PAMAS S50 pode ser equipado com uma bomba adicional (PAMAS S50 P). Uma bomba de pistão de cerâmica muito resistente controla o fluxo de 25 ml/min em uma faixa de pressão entre 0 e 6 bar.



PAMAS S50 P com bomba integrada para aplicações sem pressão

Dados Técnicos:

Contador:
8 canais de diferentes tamanhos:
> 4 µm(c), > 6 µm(c),
> 10 µm(c), > 14 µm(c),
> 21 µm(c), > 25 µm(c),
> 38 µm(c) e > 70 µm(c)

Viscosidade:
até 1000 cSt (dependendo da pressão do sistema)

Temperatura máxima do fluido:
60°C, em temperatura ambiente de 20°C

Faixa de Pressão:
- sem bomba: 0,2 - 15 bar
- com bomba adicional: 0 - 6 bar

Transferência de Dados:
- equipamento padrão: RS 485 interface
- equipamento opcional: interface analógica 4-20 mA. Transmissão de dados em paralelo para os tamanhos de 4, 6, 14 e 70 µm(c) ou envio de dados serial para oito canais de tamanhos.

Sensor Volumétrico: PAMAS HX
Faixa de Calibração:
4-70 µm(c) de acordo com a ISO 11171

Conc. máxima de partículas: 24.000 p/ml em um fluxo de 25 ml/min e erro de coincidência = 7,8%. O sensor mede o código triplo de 0/0/0 a 22/22/22 de acordocom a ISO 4406.

Dimensões:
- sem bomba: 220 mm x 120 mm x 120 mm
- com bomba: 230 mm x 200 mm x 180 mm

Peso:
- sem bomba: 3,7 kg
- com bomba: 5,0 kg

Classe de proteção:
IP 64

Management System ISO 9001:2015
TÜVRheinland ZERTIFIZIERT
www.tuv.com ID 9105038017

PAMAS HEAD OFFICE Dieselstraße 10, D-71277 Rutesheim, Phone: +49 7152 99 63 0, Fax: +49 7152 99 63-32, Email: info@pamas.de
PAMAS USA 1408 South Denver Avenue, Tulsa, OK 74119 USA, Phone: +1 918 743 6762, Fax: +1 918 743 6917, Email: clay.bielo@pamas.de
PAMAS BENELUX Mechelen Campus, Schaliënhoevedreef 20T, B-2800 Mechelen, Phone: +32 15 28 20 10, Mobile: +32 477 42 48 62, Email: paul.pollmann@pamas.de
PAMAS FRANCE Route du Tailleur 210/136, F-40170 Saint-Julien-en-Born, Mobile +33 6 25 33 20 41, Email: eric.colon@pamas.fr
PAMAS LATIN AMERICA Curitiba-Paraná, Brazil, Phone/Fax: +55 41 3022 5445, Mobile: +55 41 999 72 21 73, Email: marcelo.aiub@pamas.de
PAMAS INDIA No. 203, I floor, Oxford House, #15 Rustam Bagh Main Road, Bangalore 560017, India, Phone: +91 80 41 15 00 39, Email: info@pamas.in
PAMAS HISPANIA Calle Zubilleta No. 13 1°B, ES-48991 Algorta, Mobile: +34 67 75 39 699, Email: julian.malaina@pamas.de
PAMAS UK Sci-Tech Daresbury, Keckwick Lane, Daresbury, Cheshire WA4 4FS, Mobile: +44 79 17 71 33 66, Email: graeme.oakes@pamas.de

Visite-nos em nosso website: www.pamas.de/pt

® Registered trademarks are properties of their individual owners. All specifications are subject to change without notice.

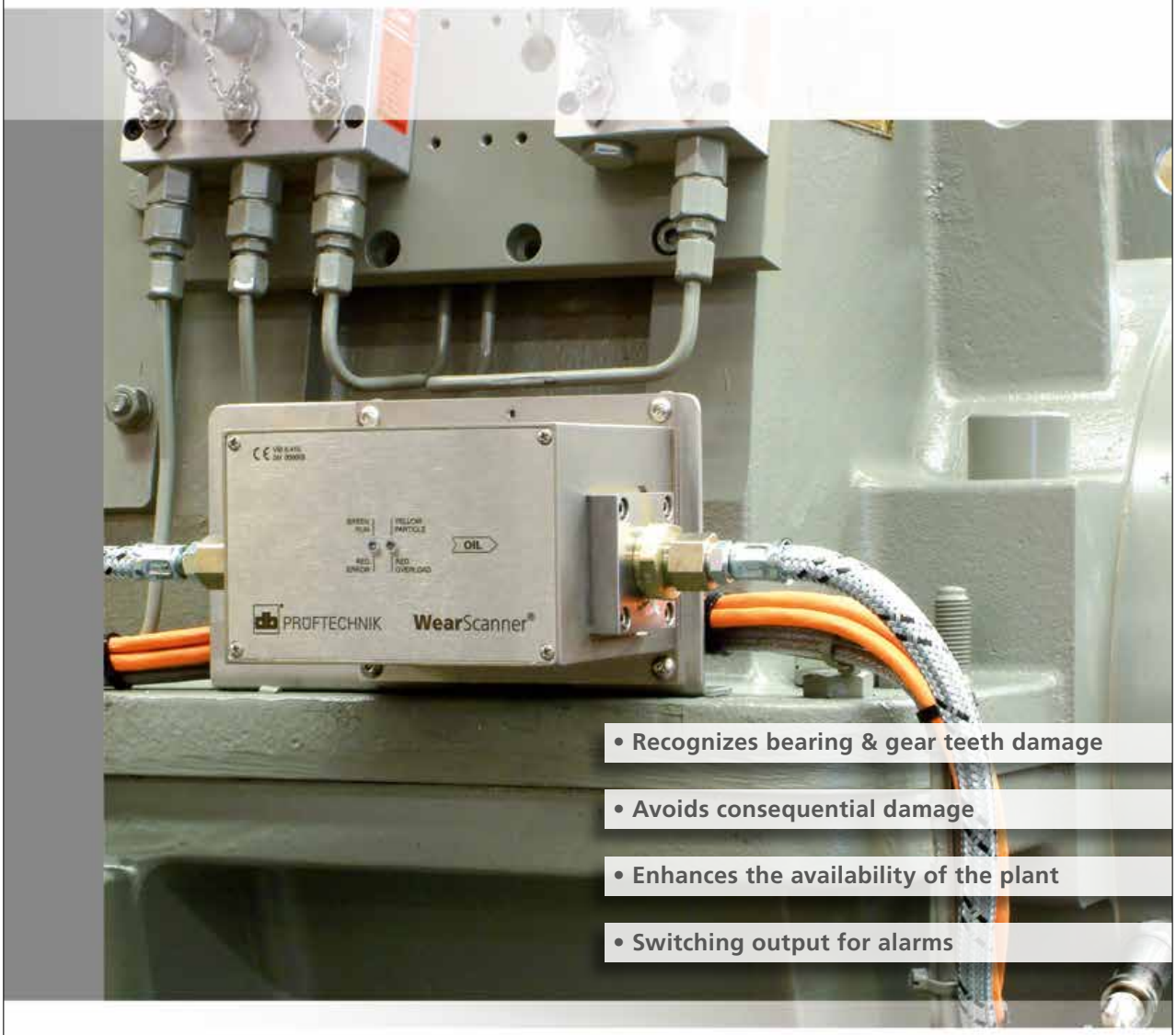
D.5 Contador PRUFTECHNIK

D.5.1 WEARSCANNER

PRÜFTECHNIK

WEARSCANNER®

Online particle size distribution counter monitors wear debris in oil



- Recognizes bearing & gear teeth damage
- Avoids consequential damage
- Enhances the availability of the plant
- Switching output for alarms

Early recognition of bearing and gearbox damage with WEARSCANNER®

Several hundred liters of oil circulate within a gearbox. In large machines and oil tanks it may even be several thousand. The function of the oil is to lubricate, clean and cool. Contaminants in the oil are indicators of incipient damage. However, they can also lead to premature failure by disrupting the thin lubricating film in roller bearings, pumps, valves, crank shafts and gear meshes.
WEARSCANNER® is an intelligent sensor that detects electrically conductive particles, counting them in real-time and classifying them by size according to ISO 16232. The non-intrusive sensor can be mounted upstream from the bypass oil filter in large machines, for example.

It automatically transfers the measured data to the plant control system via ModBus and/or straight to the operator or service center via online CMS. Changes in the quantity and size of the detected particles observed during trend monitoring enable the early detection of progressive damage to gear teeth or roller bearings.
WEARSCANNER® uses a new patented method for detecting particles that is based on the eddy current principle and works independently of oil temperature, flow rate, viscosity, air and water content and oil color (darkening). In this way, it is also able to detect very slow-moving particles.

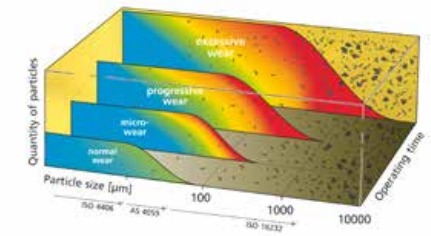
Particle size classes according to ISO 16232

							Size classes covered by WEARSCANNER®			
Class	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Size	5-15µm	15-25µm	25-50µm	50-100µm	100-150µm	150-200µm	200-400µm	400-600µm	600-1000µm	>1000µm



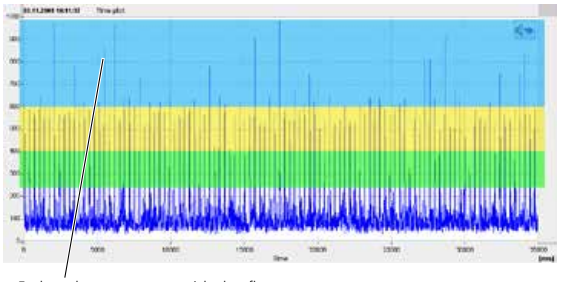
WEARSCANNER®

Size and distribution of particles



General rule: The larger the particles, the greater the damage.

How WEARSCANNER® works



- Each peak represents a particle that flows through the sensor tube.
- The amplitude indicates the size of the particle.
- The peaks are counted in set time intervals – and the number of peaks per time interval is transmitted via ModBus TCP.
- The size categories – three in this case – are configured for each particular situation.
- The time resolution and scan rate can be selected.
- The sensitivity of the WEARSCANNER® can be adapted by adjusting the gain, power and filter to the machine application.

Technical details

Fitting dimensions
1/2 "- other sizes available upon request
Measuring method
eddy current, differential coil principle
Particles
ferritic or non-ferritic
Particle size class
up to 8 size classes can be set
Flow velocity
0.01 m/s – 5 m/s (0.1 - 40 l/min)
Oil type
mineral, synthetic or biodegradable
Oil pressure
max. 16 bar

Temperature range
-20°C – 80°C
Signal processing
particle distribution counter with integral average determination and classification
Display
LED 1: green = system ready, red = fault
LED 2: yellow = particles passing through, red = overload
Interfaces
TCP/IP, Ethernet
Protocols
Modbus TCP
Power supply
21 V – 30 V

Internal memory
64 MB (~ 150 days)
Maintenance
no moving parts, maintenance-free
Self-monitoring
integrated
Lightning protection
integrated
Casing material
stainless steel 1.4308 (seawater-proof)
Dimensions
120 x 80 x 80 mm
Weight
3.5 kg

© Copyright 2015 by PRÜFTECHNIK Dieter Busch AG. ISO 9001:2008 certified. VIB 9.826.02.15.EN

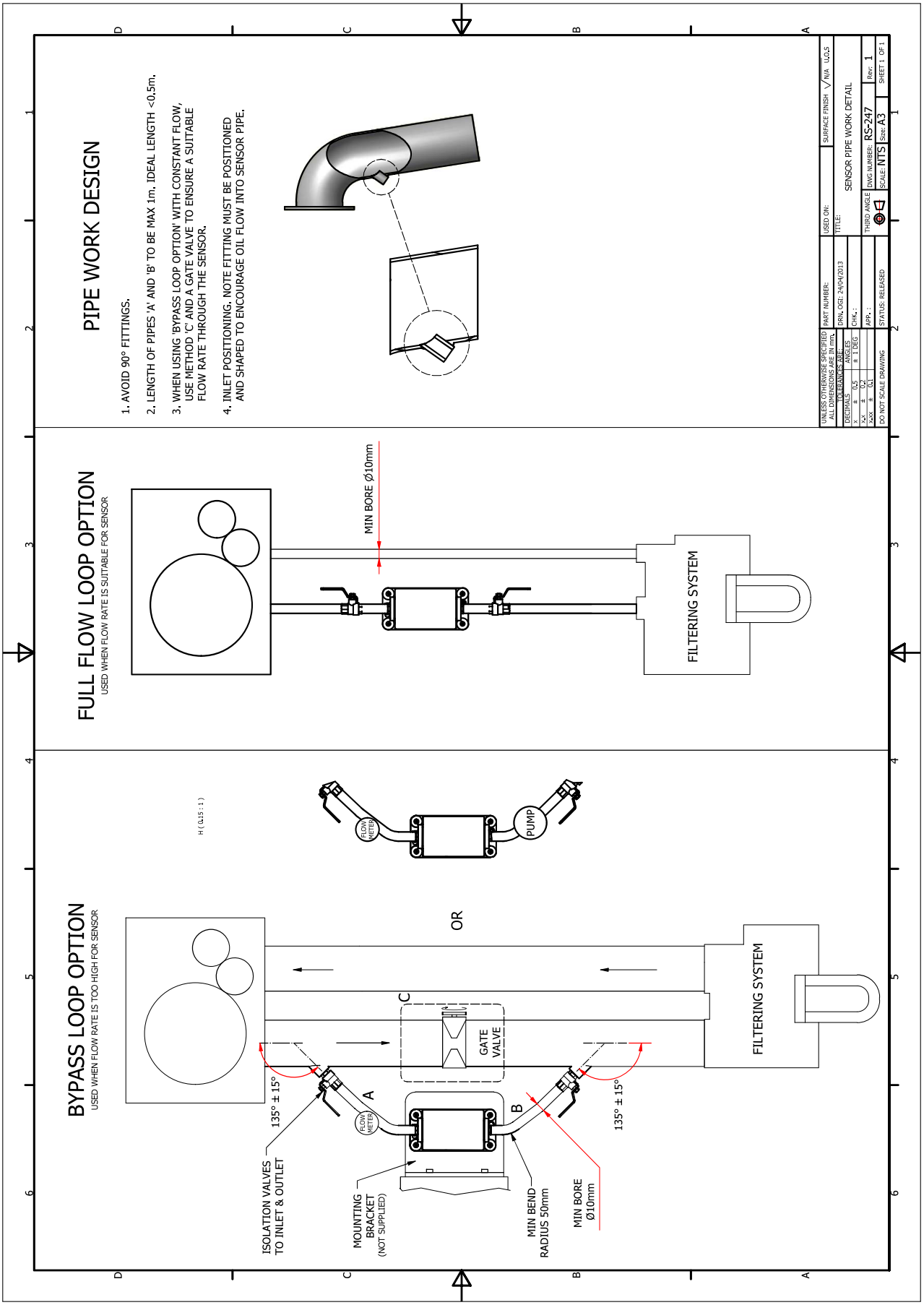
PRÜFTECHNIK
PROVEN QUALITY
▸ Made in Germany
▸ Global Presence
▸ Qualified Support
▸ Quality Service

PRÜFTECHNIK
Condition Monitoring GmbH
Oskar-Messter-Str. 19-21
85737 Ismaning, Germany
Tel.: +49 89 99616-0
Fax: +49 89 99616-300
eMail: info@pruftechnik.com
www.pruftechnik.com

A member of the PRÜFTECHNIK group

Apêndice E

Diferentes posições do Contador de Partículas


PIPE WORK DESIGN
1. AVOID 90° FITTINGS.
2. LENGTH OF PIPES 'A' AND 'B' TO BE MAX 1m, IDEAL LENGTH <0.5m.
3. WHEN USING 'BYPASS LOOP OPTION' WITH CONSTANT FLOW, USE METHOD 'C' AND A GATE VALVE TO ENSURE A SUITABLE FLOW RATE THROUGH THE SENSOR.
4. INLET POSITIONING. NOTE FITTING MUST BE POSITIONED AND SHAPED TO ENCOURAGE OIL FLOW INTO SENSOR PIPE.
FULL FLOW LOOP OPTION
USED WHEN FLOW RATE IS SUITABLE FOR SENSOR
MIN BORE Ø10mm
FILTERING SYSTEM
BYPASS LOOP OPTION
USED WHEN FLOW RATE IS TOO HIGH FOR SENSOR
H (0.15 : 1)
FLOW METER
PUMP
OR
C
GATE VALVE
A
B
135° ± 15°
ISOLATION VALVES TO INLET & OUTLET
MOUNTING BRACKET (NOT SUPPLIED)
MIN BEND RADIUS 50mm
MIN BORE Ø10mm
FILTERING SYSTEM
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED ALL DIMENSIONS ARE IN mm.
DECIMALS: MACHINED ANGLES
PART NUMBER:
DRN. OGI: 24/04/2013
CHK.:
APP.:
STATUS: RELEASED
DO NOT SCALE DRAWING
USED ON:
TITLE:
SENSOR PIPE WORK DETAIL
SURFACE FINISH √N/A
THIRD ANGLE
DWG NUMBER: RS-247
SCALE: NTS
Size: A3
Rev: 1
SHEET 1 OF 1

Apêndice F

Catálogo Sensor Humidade

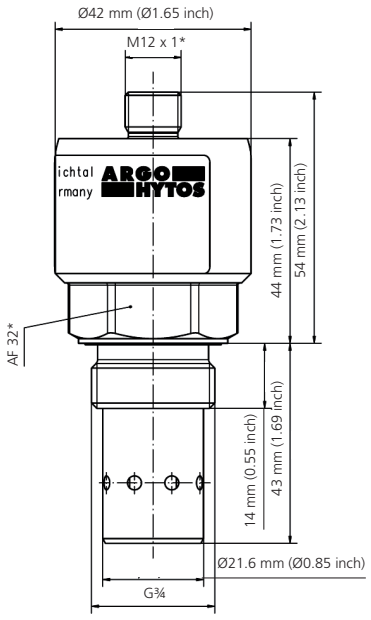
Humidity Sensor

LubCos H_2O

Continuous Oil Condition Monitoring



LubCos H_2O



* mm

Dimensions

Description

Application area

Water is not desired in hydraulic fluids and lubricants. High concentration of water can cause severe disturbance in operation and damage.

Performance features

The LubCos H_2O measures the relative humidity of the oil and thus directly displays the saturation degree in the water:

- 0%: Absolutely dry oil.
- 100%: The oil is completely saturated with water. Additional water will not be dissolved anymore and will present itself as free water.

In contrast to the humidity analysis from laboratories, where the absolute water content is defined in ppm (parts per million), the saturation limit of the oil can be determined by relative humidity measurement. The advantage of the relative humidity over the absolute water content is, that it is not necessary to know the oil or its saturation limit in order to determine if there is free or dissolved water.

Example:

- Mineral oils (e.g. HLP) have a comparatively low water absorption capacity. 500 ppm may signify that the oil is over-saturated and that free water exists.
- Ester oils (e.g. HEES) have a relatively high water capacity. 500 ppm may show that the oil is just saturated by 15%.

Please also note the characteristics of the relative humidity with different temperatures: Warm oil can dissolve more water than cold oil. Therefore, the relative humidity of the oil increases in case of no further water supply. Hot, relatively dry oil, may suddenly keep free water if the ambient temperature cools down.

The LubCos H_2O points out the current saturation of the oil with water, independent from oil type and temperature and additionally assures operation of systems by direct warning.

Measuring principle

The sensor records the relative oil humidity and oil temperature. Through an oil specific calibration it is possible to calculate the absolute humidity up to the saturation limit.

The measuring values are given by RS 232 and the analogue outputs.

Design characteristics

The sensor is provided with a G¾ thread and can be integrated in the tank or via adapter in lines.
Communication with the sensor either takes place over a serial interface or over two analog outputs (4 ... 20 mA).

Software

A free software for data recording and evaluation of the measured values can be downloaded from our website at www.argo-hytos.com > Products > Sensors & Measurements > Software.

Technical data

Sensor data	Size	Unit
Max. operating pressure	50 (725)	bar (psi)
Operating conditions		
Temperature[1]	-40 ... +105 (-40 ... +221	°C °F)
Rel. humidity[1]	0 ... 100	% r.H. (non-condensing)
Compatible fluids	mineral oils (H, HL, HLP, HLPD, HVLP), synthetic esters (HETG, HEPG, HEES, HEPR), polyalkylenglycols (PAG), zinc and ash-free oils (ZAF), polyalphaolefins (PAO)	
Wetted materials	aluminum, HNBR, polyurethane resin, epoxy resin, chemical nickel/gold (ENIG), soldering tin (Sn60Pb40,Sn96,5Ag3CuO,5NiGe), aluminum oxide, glass (DuPont QQ550)	
Protection class[2]	IP67	
Power supply[3])	9 ... 33	V
Power input	max. 60	mA
Output		
Power output (2x)[4] Accuracy power output[5] Interface	4 ... 20 ± 2 RS 232	mA % -
Connections		
Threaded connection Tightening torque of threaded connection Electrical connection Tightening torque M12-connector	G¾ 45 ±4.5 M12 x 1, 8-pole 0.1	inch Nm - Nm
Measuring range		
Rel. humidity Temperature	0 ... 100 -20 ... +85 (-4 ... +185	% °C °F)
Measuring accuracy		
Rel. humidity Temperature	1 0.1	% r.H. K
Measuring accuracy[6]		
Rel. humidity (10 ... 90%)[7] Rel. humidity (<10%, >90%)[7] Temperature	±3 ±5 ±2	% r.H. % r.H. K
Response time humidity measurement (0 to 100%)	<1	min
Weight	115	g

[1] Outside the specified measuring range, there are possibly no plausible measuring values to be expected
[2] With screwed on connector
[3] Automatic switch off at U <8 V and U >36 V, with load-dump impulses over 50V an external protection must be provided
[4] Outputs IOut1 and IOut2 are freely configurable (see interfaces and communication commands)
[5] In relation to the analogue current signal (4 ... 20 mA)
[6] Works calibration
[7] Calibrated to air at room temperature

Order code

LubCos H_2O	SCSO 300-1000

Accessories	
Screw-in block for mounting in a return line, connection G¾	SCSO 100-5070
Complete data cable set, 5 m (16 ft) length	SCSO 100-5030
Data cable with open ends, 5 m (16 ft) length	SCSO 100-5020
Contact box for connection of a data cable	SCSO 100-5010
USB adapter - RS 232 serial	PPCO 100-5420
Power supply	SCSO 100-5080
Ethernet - RS 232 gateway	SCSO 100-5100
Display and storage device LubMon Visu	SCS0 900-1000

Apêndice G

Plano de Lubrificação

Tabela G.1: Plano de lubrificação do Misturador - Corpo.

Operação		Procedimento	Período (semanas)	Tempo exec. (min)	Mão-de-obra		Parada	Tipo de lubrificante	Quantidade	Comentários
Nº	Descrição				Qualificação	nº				
7	Reabastecer a massa lubrificante da bomba de massa	-	1	30	Mecânico	1	-	EP1	até repor nível máximo	
8	Verificar nível de óleo do sistema de lubrificação dos rolamentos do misturador	Verificar se o óleo alcança a linha de referência	1	10	Mecânico	1	X	-	-	
9	Verificar os filtros do óleo do sistema de lubrificação dos rolamentos do misturador	Ver tabela 6.29	4	30	Mecânico	1	-	-	-	
10	Limpar filtros do óleo do sistema de lubrificação dos rolamentos do misturador	-	12*	60	Mecânico	1	-	-	-	*1ª limpeza: imediatamente após a primeira inicialização da operação trocas seguintes: 1 - 6 meses Os filtros com materiais filtrantes, como fibra de vidro ou papel, não podem ser limpos, logo é necessário substituí-los. Os filtros com materiais filtrantes, como uma malha de arame, podem ser limpos e usados novamente.
11	Verificar o óleo do sistema de lubrificação dos rolamentos do misturador	-	6*	30	Mecânico	1	X	-	-	*1 000 h ou a cada 3 meses, se não fizer nesse período 1 000 h
12	Substituir o óleo do sistema de lubrificação dos rolamentos do misturador	Ver tabela 6.29	17*	240	Mecânico	1	X	VG 46	63 L	*1ª troca: imediatamente após a primeira inicialização da operação trocas seguintes: 1 000 - 4 000 h ou de 6 - 24 meses

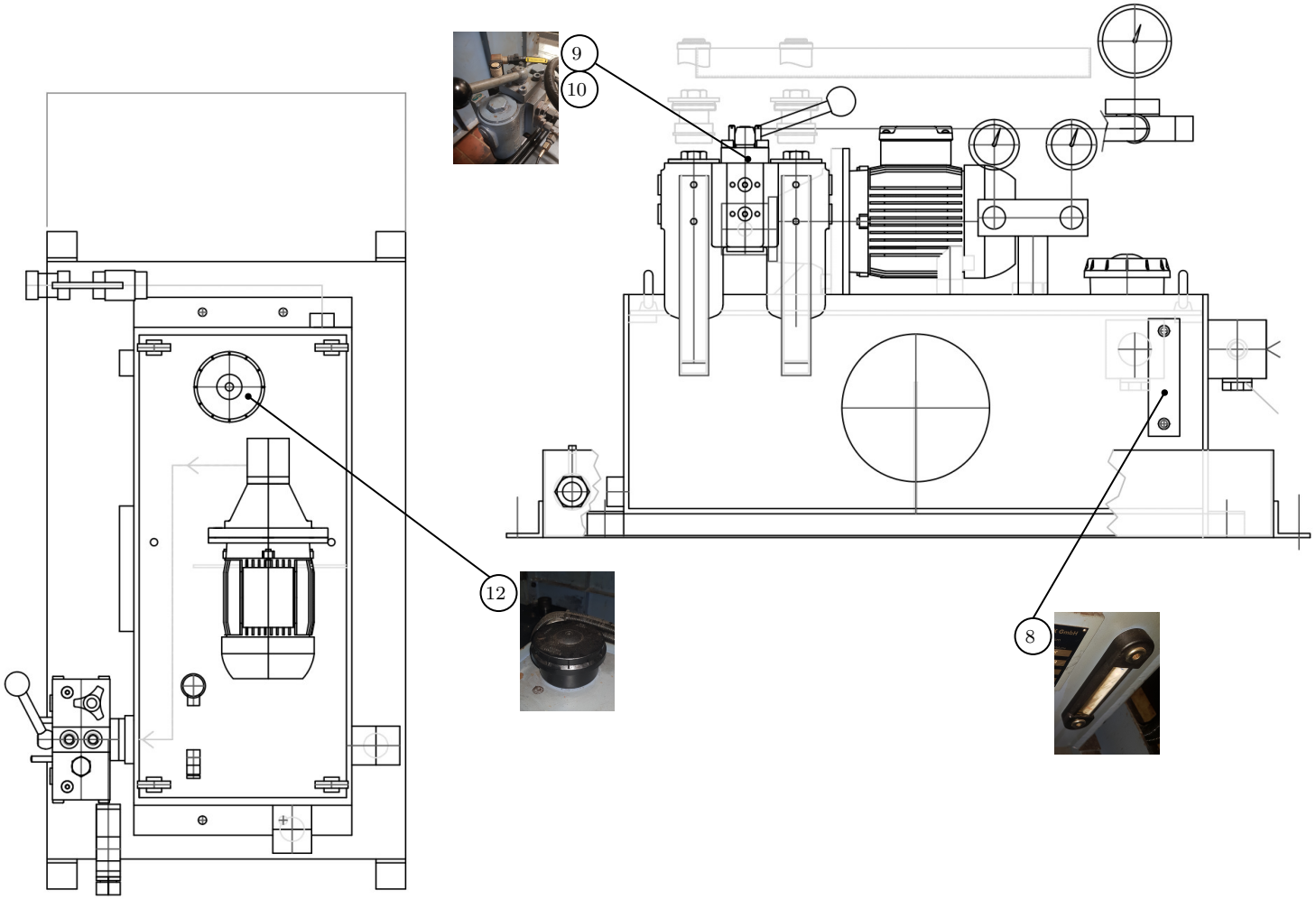


Figura G.1: Identificação das operações 8, 9, 10 e 11.

Tabela G.2: Plano de lubrificação do Motor - misturador.

Operação		Procedimento	Período (semanas)	Tempo exec. (min)	Mão-de-obra		Parada	Tipo de lubrificante	Quantidade	Comentários
Nº	Descrição				Qualificação	nº				
13	Substituir a massa lubrificante dos rolamentos do motor principal	-	17*	30	Mecânico	1	X	EPL2	120 g	*1ª troca de óleo: 500 h trocas seguintes: 3 000 h

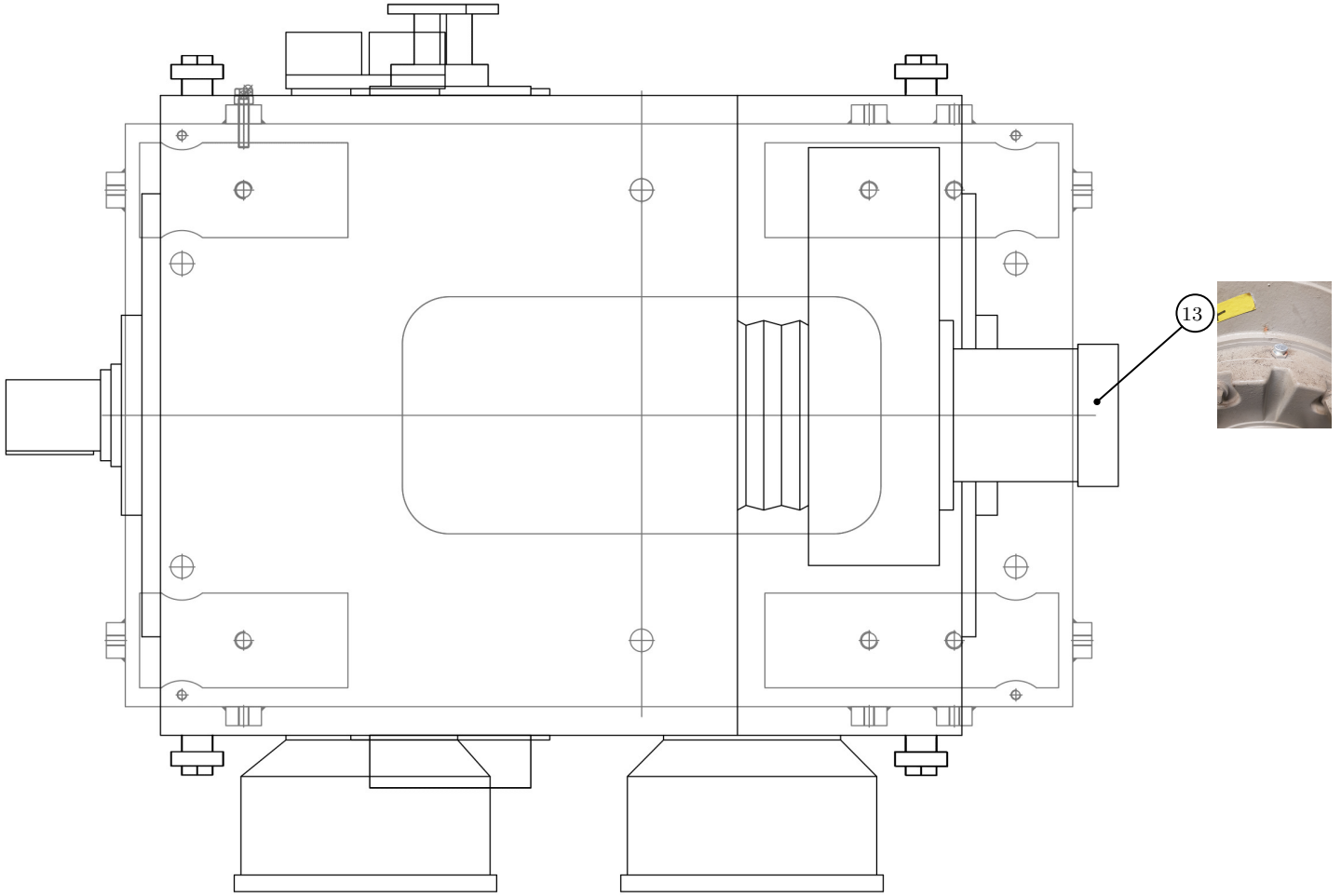


Figura G.2: Identificação da operação 13.