



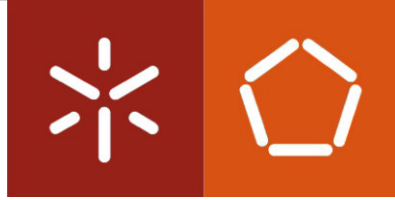
Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Humberto Nuno Teixeira

**Apoio à implementação da manutenção
condicionada em empresas industriais**

junho de 2022



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Humberto Nuno Teixeira

**Apoio à implementação da manutenção
condicionada em empresas industriais**

Tese de Doutoramento
Programa Doutoral em Engenharia Industrial e de Sistemas

Trabalho efetuado sob a orientação da
Professora Doutora Isabel Silva Lopes
e da
Professora Doutora Ana Cristina Silva Braga

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Durante a realização deste trabalho, recebi o contributo e o incentivo de várias pessoas. A todos expresso aqui o meu apreço e o meu agradecimento sincero.

Em primeiro lugar, agradeço à Professora Isabel Silva Lopes. A sua orientação e a sua disponibilidade foram fundamentais para a elaboração desta tese.

Gostaria ainda de agradecer às pessoas que fizeram parte da equipa que colaborou comigo na realização do caso de estudo, pelos conhecimentos partilhados, pelo empenho e pela atitude cordial e construtiva que demonstraram.

Por fim, deixo um agradecimento especial à minha mãe, à minha irmã e ao meu cunhado pelo incentivo que sempre me deram, sobretudo nos períodos mais difíceis.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

Neste trabalho, é proposta uma metodologia destinada a apoiar a implementação da manutenção condicionada a diferentes tipos de equipamentos. Para permitir a implementação da manutenção condicionada de uma forma organizada e progressiva, são fornecidas orientações para selecionar e priorizar modos de falha, definir os parâmetros a monitorizar, selecionar sensores a instalar no equipamento, e analisar o impacto dos modos de falha nos valores dos parâmetros monitorizados.

Tendo em conta que a aplicação da manutenção condicionada nem sempre é tecnicamente possível e financeiramente viável, a metodologia fornece orientações para selecionar a política de manutenção mais adequada, com base em informação associada ao modo de falha, nomeadamente o comportamento da função de risco, o impacto no processo produtivo, a natureza da falha funcional (evidente ou oculta) e os custos associados às políticas aplicáveis. Assim, a metodologia proposta também poderá ser utilizada para definir o plano de manutenção de diferentes tipos de máquinas.

Com vista a assegurar a abrangência da metodologia, a análise da literatura focou-se em três áreas: gestão de ativos, gestão da manutenção e manutenção condicionada. Esta análise permitiu concluir que existe um número reduzido de abordagens de apoio à implementação da manutenção condicionada. Verificou-se ainda que as abordagens existentes não propõem métodos de análise de custos e não é evidente que a sua aplicação contribua para reduzir a dependência do apoio de técnicos especialistas.

O desenvolvimento da metodologia iniciou-se com a definição de requisitos e especificações, destinadas a dotar a metodologia de características relevantes e distintivas. Esta informação foi depois utilizada para definir a estrutura da metodologia, e os seus métodos e procedimentos. Os métodos e os procedimentos propostos são descritos de forma simples e estruturada, utilizando termos de referência das áreas do conhecimento abordadas.

A metodologia fornece um conjunto de ferramentas gráficas para apoiar a tomada de decisão e formulários específicos para facilitar a recolha e a análise de dados. A sua aplicação é demonstrada num caso de estudo realizado numa empresa industrial que produz dispositivos eletrónicos. No âmbito do estudo, foram selecionadas políticas de manutenção para as duas máquinas mais críticas de uma linha de produção, tendo em conta a informação associada aos modos de falha com impacto mais significativo, e foi analisada a viabilidade da aplicação da manutenção condicionada a dois componentes que têm modos de falha definidos como prioritários, recorrendo a sensores instalados no equipamento.

Palavras-Chave: Gestão da manutenção, Gestão de dados, Manutenção condicionada, Manutenção preventiva.

ABSTRACT

This work proposes a methodology for supporting the implementation of Condition-Based Maintenance (CBM) to different types of equipment. To enable the implementation of CBM in an organized and progressive manner, guidelines are provided for selecting and prioritizing failure modes, defining the parameters to monitor, selecting sensors to install on the equipment, and analyzing the failure modes impact on the values of the monitored parameters.

Considering that the application of CBM it is not always technically possible and financially feasible, the methodology provides guidelines for selecting the most appropriate maintenance policy, based on information associated with the failure mode, namely the hazard rate behavior, the impact on the production process, the nature of the functional failure (evident or hidden) and the costs associated with the applicable policies. Thus, the proposed methodology can also be used to define the maintenance plan of different types of machines.

To ensure the comprehensiveness of the methodology, the literature analysis was focused on three areas: asset management, maintenance management and CBM. This analysis allowed to conclude that there exists a small number of approaches for supporting CBM implementation. It was also noted that the existing approaches do not propose cost analysis methods and it is not evident that their application contributes to reduce the dependence on the support of technical experts.

The development of the methodology started with the definition of requirements and specifications aimed at endowing the methodology with relevant and distinctive characteristics. This information was then used to define the structure of the methodology and its methods and procedures. The proposed methods and procedures are described in a simple and structured way, using standard terms of the areas of knowledge addressed.

The methodology provides a set of graphical tools for supporting decision-making and specific forms to facilitate data collection and analysis. Its application is demonstrated in a case study performed in an industrial company which produces electronic devices. In the context of the study, maintenance policies were selected for the two most critical machines of a production line, considering the information associated with the failure modes which have the most significant impact, and the feasibility of the application of CBM to two components that have priority failure modes was analyzed using sensors installed on the equipment.

Keywords: Condition-Based Maintenance (CBM), Data management, Maintenance management, Preventive maintenance.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE	vii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS	xviii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS	4
1.3. METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO	5
1.4. ESTRUTURA DA TESE	6
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA	8
2.1. GESTÃO DE ATIVOS	8
2.1.1. Conceito de ativo	8
2.1.2. Processo de gestão de ativos	9
2.1.3. Ciclo de vida de um ativo físico	16
2.1.4. Sistemas de gestão	20
2.1.5. Gestão de informação	23
2.1.6. Análise crítica da literatura	28
2.2. GESTÃO DA MANUTENÇÃO	29
2.2.1. Definição e objetivos da função manutenção	30
2.2.2. Evolução da função manutenção	32
2.2.3. Gestão estratégica da manutenção	34
2.2.4. O conceito de falha	39
2.2.5. Função de risco	43
2.2.6. Medição do desempenho operacional da função manutenção	47
2.2.7. Custos da manutenção	53
2.2.8. Tipos de manutenção	58

2.2.9. Políticas de manutenção e modelos matemáticos associados	62
2.2.10. Metodologias de gestão da manutenção	70
2.2.11. Análise crítica da literatura	84
2.3. MANUTENÇÃO CONDICIONADA.....	85
2.3.1. O conceito de manutenção condicionada	86
2.3.2. Vantagens da implementação da manutenção condicionada.....	94
2.3.3. Processo de manutenção condicionada.....	96
2.3.4. Modelos de diagnóstico e de prognóstico	106
2.3.5. Abordagens para apoiar a implementação da manutenção condicionada.....	116
2.3.6. Análise crítica da literatura.....	130
CAPÍTULO 3 – REQUISITOS E ESPECIFICAÇÕES DA METODOLOGIA	133
3.1. REQUISITOS.....	134
3.2. ESPECIFICAÇÕES.....	136
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA DE SELEÇÃO DA POLÍTICA E DE APOIO À IMPLEMENTAÇÃO DA MANUTENÇÃO CONDICIONADA.....	138
4.1. ESTRUTURA DA METODOLOGIA.....	138
4.2. MÉTODO PARA RANKING DOS EQUIPAMENTOS	143
4.3. MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO MULTICRITÉRIO DOS COMPONENTES DO EQUIPAMENTO.....	145
4.4. PROCEDIMENTO PARA DEFINIR A CRITICIDADE DOS MODOS DE FALHA	147
4.5. SELEÇÃO DA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO	154
4.5.1. Função de risco não crescente.....	155
4.5.2. Função de risco crescente	156
4.6. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA SISTEMÁTICA.....	161
4.7. ANÁLISE DE CUSTOS DE MANUTENÇÃO	163
4.7.1. Estimativa do custo da política de MC	163
4.7.2. Estimativa do custo da política de MPS	165
4.7.3. Comparação do custo da MPC com o custo da política de manutenção atual.....	167
4.7.4. Análise de custo-benefício das ações de melhoria.....	170
4.8. ABORDAGEM DE APOIO À IMPLEMENTAÇÃO DA MPC.....	171
4.8.1. Procedimento para identificar os modos de falha prioritários	171
4.8.2. Procedimento para definir os dispositivos de medição de dados	176
4.8.3. Procedimento para analisar o impacto dos modos de falha em parâmetros do equipamento/processo	176
CAPÍTULO 5 – IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA	186

5.1. PROCESSO E EQUIPAMENTOS	186
5.2. GESTÃO DOS DADOS DE MANUTENÇÃO	189
5.3. RANKING DE EQUIPAMENTOS.....	190
5.4. MÁQUINA DE IMPRESSÃO DE PASTA EKRA SERIO 5000.....	191
5.4.1. Classificação multicritério dos componentes do equipamento	192
5.4.2. Definição da criticidade dos modos de falha	196
5.4.3. Atribuição da política de manutenção	212
5.4.4. Estimativa dos custos de manutenção: componentes com modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores	223
5.4.5. Identificação dos modos de falha prioritários para a implementação da MPC	228
5.4.6. Definição dos dispositivos de medição de dados.....	243
5.4.7. Análise do impacto do modo de falha no parâmetro monitorizado	246
5.4.8. Comparação do custo da TD com o custo da política atual	249
5.4.9. Análise da viabilidade da TD utilizando sensores	251
5.4.10. Análise de custo-benefício da ação de melhoria	251
5.5. MÁQUINA DE SOLDADURA REHM VXP	252
5.5.1. Classificação multicritério dos componentes do equipamento	254
5.5.2. Definição da criticidade dos modos de falha	259
5.5.3. Atribuição da política de manutenção	265
5.5.4. Definição dos parâmetros da política de MPS	268
5.5.5. Estimativa dos custos de manutenção: componentes com modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores	269
5.5.6. Identificação dos modos de falha prioritários para a implementação da MPC	274
5.5.7. Definição dos dispositivos de medição de dados.....	284
5.5.8. Análise do impacto dos modos de falha no parâmetro monitorizado	287
5.5.9. Comparação do custo da MPC com o custo da política atual	289
5.5.10. Análise da viabilidade da MPC utilizando sensores	291
5.6. SÍNTESE DOS RESULTADOS DA IMPLEMENTAÇÃO	292
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO.....	301
6.1. CONCLUSÕES	301
6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO	307
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	309
APÊNDICE I – MODELOS DE GESTÃO DE ATIVOS.....	328

APÊNDICE II – CATEGORIAS E SUBCATEGORIAS DOS MODELOS DE PROGNÓSTICO	335
APÊNDICE III – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	341
APÊNDICE IV – ETAPAS DA ANÁLISE DOS DADOS DE FALHA E MODELOS MATEMÁTICOS ASSOCIADOS ÀS POLÍTICAS DE MPS.....	346
APÊNDICE V – MÉTODO DE SELEÇÃO DE SENSORES.....	353
APÊNDICE VI – LISTA DE CRITÉRIOS PARA APOIAR A SELEÇÃO DE SENSORES	358
APÊNDICE VII – POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO ATUAIS E POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO PROPOSTAS.....	360
APÊNDICE VIII – CONSUMOS POR MÁQUINA DOS COMPONENTES QUE TÊM ASSOCIADOS MODOS DE FALHA CANDIDATOS À APLICAÇÃO DA MPC	368
APÊNDICE IX – REGISTO DE FALHAS DO CMMS.....	374

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fases da concepção da metodologia desenvolvida.....	5
Figura 2 – Componentes básicas de um ativo (adaptado de Amadi-Echendu et al., 2010).	9
Figura 3 – Relações entre conceitos (adaptado de ISO 55000:2014).....	12
Figura 4 – Exemplo de variações na descrição das etapas do ciclo de vida dos ativos físicos (adaptado de IAM, 2015).	17
Figura 5 – Perfil de custos do ciclo de vida de um sistema (adaptado de Fedele, 2011).	18
Figura 6 – A gestão de ativos físicos como sistema de apoio às atividades de uma organização (adaptado de Hastings, 2015).	20
Figura 7 – Representação dos níveis de gestão de ativos (adaptado de Mehairjan, 2017).	21
Figura 8 – Evolução da gestão da manutenção e do pensamento corporativo (adaptado de IBM, 2007 e Gunasekaran & Sandhu, 2010).	33
Figura 9 – Inter-relação entre manutenção e produção (adaptado de Al-Turki, 2012).	36
Figura 10 – Associação entre questões técnicas e comerciais (adaptado de Kobbacy & Murthy, 2008).	38
Figura 11 – Mecanismo de desgaste (a) e mecanismo de sobrecarga (b) (adaptado de Jiang, 2015).	40
Figura 12 – Curva da banheira (adaptado de Nowlan & Heap, 2013).	44
Figura 13 – Os seis padrões de falha (adaptado de Hashemian, 2010).	45
Figura 14 – Função densidade de probabilidade (a) e função taxa instantânea de falhas (b) da distribuição de Weibull (adaptado de Barringer, 2013).	47
Figura 15 – Eficácia de custos de um sistema complexo (adaptado de Birolini, 2014).	55
Figura 16 – Custo global da manutenção em função dos recursos investidos (adaptado de Pascual & Kumar, 2016).	58
Figura 17 – Modelo conceptual representativo do impacto da abordagem de manutenção nos lucros das empresas (adaptado de Alsayouf, 2007).	58
Figura 18 – Tipos e subtipos de manutenção (adaptado de EN 13306:2017).	59
Figura 19 – Reparação mínima, reparação geral e renovação (adaptado de Gold, 2013).	64
Figura 20 – Tendência determinística nos custos de operação (adaptado de Gold, 2013).	67
Figura 21 – Tempo ótimo de substituição (adaptado de Gold, 2013).	68
Figura 22 – Representação dos oito pilares do TPM (adaptado de Andersson <i>et al.</i> 2015).	80
Figura 23 – Representação das seis grandes perdas de produção (adaptado de Ahuja & Khamba, 2008c).	83

Figura 24 – Curva P-F (adaptado de Moubray, 1997).	88
Figura 25 – Relação entre a RUL, a fiabilidade e o custo de manutenção (adaptado de Peng <i>et al.</i> , 2010).	90
Figura 26 – Relação entre o RCM, CBM e CBM+ (adaptado de Niu <i>et al.</i> , 2010).	91
Figura 27 – Escala evolutiva da função manutenção (adaptado de Guillén, Crespo, Macchi, <i>et al.</i> , 2016 e Guillén, Crespo, Gómez, <i>et al.</i> , 2016).....	92
Figura 28 – Análise do valor associado a diferentes tipos de manutenção (adaptado de Haddad <i>et al.</i> , 2012 e Guillén, Crespo, Macchi, <i>et al.</i> , 2016).....	93
Figura 29 – Blocos de processamento e de transmissão de informação da norma ISO 13374 (adaptado de ISO 13374:2003).	97
Figura 30 – Etapas do processo de manutenção condicionada (adaptado de Jardine <i>et al.</i> , 2006).....	98
Figura 31 – Representação gráfica do cálculo da RUL e do respetivo IC (adaptado de Baur <i>et al.</i> , 2020).	106
Figura 32 – Principais funções da OSA-EAI (a) e integração da OSA-CBM com a OSA-EAI (b) (MIMOSA, 2006).....	118
Figura 33 – Visão geral da arquitetura genérica CBM+ (DoD, 2008).	119
Figura 34 – Elementos da arquitetura do sistema de manutenção condicionada (ADS-79D-HDBK, 2013).	120
Figura 35 – Fluxograma do sistema de manutenção condicionada (Niu <i>et al.</i> , 2010).	121
Figura 36 – Blocos da estrutura para a manutenção condicionada (Guillén, Crespo, Gómez, <i>et al.</i> , 2016).	122
Figura 37 – Hierarquia de classes do modelo <i>OntoProg</i> (Nuñez & Borsato, 2018).	123
Figura 38 – Representação da estrutura da metodologia.	139
Figura 39 – Matriz de combinações.	146
Figura 40 – Identificação das combinações correspondentes aos componentes críticos.	147
Figura 41 – Árvore de decisão relativa aos modos de falha com função de risco não crescente (AD1).	156
Figura 42 – Árvore de decisão relativa aos modos de falha com função de risco crescente (AD2). ...	159
Figura 43 – Árvore de decisão relativa aos modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores (AD3).....	160
Figura 44 – Representação do procedimento para a atribuição da política de MPS (AD4).	162
Figura 45 – Etapas do procedimento para analisar o impacto dos modos de falha em parâmetros do equipamento/processo.....	178

Figura 46 – Fluxograma do processo produtivo da linha SMD.....	187
Figura 47 – Máquina de impressão de pasta Ekra Serio 5000.....	192
Figura 48 – Extrato do segundo e do terceiro ramos da árvore de decisão AD2.	213
Figura 49 – Sistema de Limpeza da máquina Ekra Serio 5000.....	241
Figura 50 – “válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417” (a), êmbolo da válvula (b) e esquema de funcionamento da válvula quando o êmbolo se encontra na posição A (c).....	242
Figura 51 – Matrizes relativas aos requisitos de desempenho (a), requisitos físicos (b) e requisitos comerciais (c) dos sensores de proximidade.	245
Figura 52 – Sensores de proximidade instalados no cilindro do Sistema de Limpeza.	245
Figura 53 – Extrato do ficheiro de dados (válvula do Sistema de Limpeza).	246
Figura 54 – Representação da “frequência média de comutação”: primeira válvula (a) e segunda válvula (b).....	248
Figura 55 – Representação da “frequência média de comutação”: válvula do novo modelo.	252
Figura 56 – Máquina de soldadura Rehm VXP.	253
Figura 57 – Sistema de Transporte.....	283
Figura 58 – Matrizes relativas aos requisitos de desempenho (a), requisitos físicos (b) e requisitos comerciais (c) dos potenciômetros lineares.	286
Figura 59 – Potenciômetro linear “Novotechnik TX2 0050-716-002-101”.....	287
Figura 60 – Extrato do ficheiro de dados (correntes laterais).....	288
Figura 61 – Representação gráfica da “distância entre a posição instantânea do tensor e a posição estendido”.....	288
Figura 62 – Modelo conceptual de gestão de ativos do IAM e o alinhamento das 39 disciplinas de gestão de ativos com os grupos temáticos (IAM, 2015).	330
Figura 63 – Escala de maturidade referente à norma ISO 55001 (IAM, 2015).	331
Figura 64 – Gráfico radar (IAM, 2015).	332
Figura 65 – Modelo funcional do sistema de gestão de ativos (El-akruti & Dwight, 2013).	333
Figura 66 – Hierarquia do processo de gestão de ativos (Wijnia & Croon, 2014).	334
Figura 67 – Modelo de decisão baseado no risco para a gestão de ativos (Komljenovic <i>et al.</i> , 2016).	334
Figura 68 – Exemplo das matrizes relativas aos requisitos de desempenho (a), requisitos físicos e ambientais (b) e requisitos comerciais (c).	355

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ativos fixos e ativos correntes (adaptado de Hastings, 2010).....	9
Tabela 2 – Pilares de competência que suportam a função de gestão de ativos e os itens associados (adaptado de Brown & Humphrey, 2005).....	14
Tabela 3 – Benefícios associados à gestão de ativos (adaptado de ISO 55000:2014).	15
Tabela 4 – Categorias de custos associadas à vida útil de um ativo (adaptado de Fedele, 2011).....	18
Tabela 5 – Perspetivas a considerar na gestão do ciclo de vida (adaptado de Okano, 2001).	19
Tabela 6 – Critérios para aferir a qualidade dos dados dos ativos (adaptado de IAM, 2015).....	25
Tabela 7 – Características dos sistemas de informação utilizados em cada um dos domínios da gestão de ativos (adaptado de Koronios <i>et al.</i> , 2007).	26
Tabela 8 – Atividades genéricas realizadas no nível estratégico, tático e operacional de gestão da manutenção (Adaptado de Murthy <i>et al.</i> , 2002 e Kobbacy & Murthy, 2008).	34
Tabela 9 – Dimensões estratégicas da gestão da manutenção (adaptado de Tsang, 2002).	38
Tabela 10 – Conceitos utilizados na classificação das falhas.	41
Tabela 11 – Descrição e expressão de cálculo dos indicadores MTBF, MTTF e MTBM.	50
Tabela 12 – Descrição e fórmula de cálculo dos indicadores MDT e MTTR.	51
Tabela 13 – Requisitos qualitativos relacionados com a manutibilidade (adaptado de Jiang, 2015)....	52
Tabela 14 – Exemplos de custos visíveis e de custos ocultos da função manutenção (adaptado de Wienker <i>et al.</i> , 2016).	56
Tabela 15 – Critérios considerados na seleção de políticas de manutenção (adaptado de Wang <i>et al.</i> , 2007).....	70
Tabela 16 – As sete perguntas do RCM e os respetivos elementos.	74
Tabela 17 – Etapas para a implementação do RCM (adaptado de Jardine & Tsang, 2013).	75
Tabela 18 – Descrição dos oito pilares do TPM (adaptado de Agustiady & Cudney, 2018).	80
Tabela 19 – Técnicas de monitorização da condição (adaptado de Smith & Mobley, 2007 e Ahmad & Kamaruddin, 2012a).	86
Tabela 20 – Definição do conceito de manutenção condicionada.	87
Tabela 21 – Categorias de dados de monitorização da condição (adaptado de Jardine <i>et al.</i> , 2006 e Ahmad & Kamaruddin, 2012b).	99
Tabela 22 – Técnicas de análise de dados de ondas (adaptado de Jardine <i>et al.</i> , 2006).	101

Tabela 23 – Principais categorias e subcategorias dos modelos de prognóstico (adaptado de Sikorska <i>et al.</i> , 2011).	108
Tabela 24 – Classificação dos modelos estatísticos baseados em dados (adaptado de Si <i>et al.</i> , 2011).	109
Tabela 25 – Classificação dos modelos de prognóstico baseados em dados (adaptado de Diez-Olivan <i>et al.</i> , 2019).	113
Tabela 26 – Vantagens e desvantagens dos modelos físicos.	115
Tabela 27 – Metodologias e procedimentos para a implementação da manutenção condicionada e do PHM.	124
Tabela 28 – Definição de especificações com base nos requisitos definidos previamente.	136
Tabela 29 – Níveis dos critérios para classificar a criticidade dos componentes.	145
Tabela 30 – Categorias e subcategorias relativas aos modos de falha dos componentes críticos.	149
Tabela 31 – Exemplo da aplicação do formulário F1.	153
Tabela 32 – Exemplo da aplicação do formulário F2.	155
Tabela 33 – Políticas de MPS recomendadas e os respetivos critérios de decisão.	161
Tabela 34 – Etapas do procedimento para identificar os modos de falha prioritários para a implementação da MPC e respetivas fontes de informação.	172
Tabela 35 – Exemplo genérico do formulário F3.	172
Tabela 36 – Exemplo genérico do formulário F4.	173
Tabela 37 – Exemplo genérico do formulário F5.	174
Tabela 38 – Ranking das máquinas da linha SMD18.	191
Tabela 39 – Subconjuntos da máquina Ekra Serio 5000.	193
Tabela 40 – Datas de entrada em funcionamento e período de atividade das máquinas Ekra Serio 5000, até 31/12/2020.	194
Tabela 41 – Formulário “F1 – Informação relativa aos componentes críticos” (máquinas Ekra Serio 5000).	198
Tabela 42 – Quantidade de modos de falha por categoria e por subcategoria (máquinas Ekra Serio 5000).	210
Tabela 43 – Matriz de seleção da política de manutenção.	214
Tabela 44 – Níveis dos critérios de seleção da política de manutenção.	214
Tabela 45 – Formulário “F2 – Política de manutenção” (máquinas Ekra Serio 5000).	216

Tabela 46 – Custo de falha dos componentes que têm modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores (máquinas Ekra Serio 5000).....	224
Tabela 47 – Custo da política de manutenção atual dos componentes que têm modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores (máquinas Ekra Serio 5000).....	227
Tabela 48 – Formulário “F3 – Parâmetros mensuráveis com os sensores existentes” (máquinas Ekra Serio 5000).....	228
Tabela 49 – Formulário “F4 – Parâmetros a analisar e disponibilidade de sensores” (máquinas Ekra Serio 5000).....	230
Tabela 50 – Formulário “F5 – Relação entre os parâmetros e os modos de falha” (máquinas Ekra Serio 5000).....	234
Tabela 51 – Lista de prioridades (máquinas Ekra Serio 5000).....	238
Tabela 52 – Critérios de seleção e características dos sensores de proximidade.....	244
Tabela 53 – Custo do protótipo do sistema de monitorização (válvula do Sistema de Limpeza).	249
Tabela 54 – Ganho resultante da aplicação da TD (válvula do Sistema de Limpeza).....	250
Tabela 55 – Ganho anual médio resultante da aplicação da ação de melhoria (válvula do Sistema de Limpeza).	252
Tabela 56 – Subconjuntos da máquina Rehm VXP.	254
Tabela 57 – Parâmetros do processo medidos na máquina Rehm VXP.....	255
Tabela 58 – Datas de entrada em funcionamento e período de atividade das máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT, até 31/03/2021.....	256
Tabela 59 – Associação dos componentes aos subconjuntos (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).....	257
Tabela 60 – Formulário “F1 – Informação relativa aos componentes críticos” (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).....	260
Tabela 61 – Quantidade de modos de falha por categoria e por subcategoria (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).....	263
Tabela 62 – Formulário “F2 – Política de manutenção” (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).....	266
Tabela 63 – Custo de falha dos componentes que têm modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).	270
Tabela 64 – Custo da política de manutenção atual dos componentes que têm modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).	273

Tabela 65 – Formulário “F3 – Parâmetros mensuráveis com os sensores existentes” (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).....	274
Tabela 66 – Formulário “F4 – Parâmetros a analisar e disponibilidade de sensores” (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).....	275
Tabela 67 – Formulário “F5 – Relação entre os parâmetros e os modos de falha” (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).....	278
Tabela 68 – Lista de prioridades (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).....	281
Tabela 69 – Critérios de seleção e características dos potenciômetros lineares.	285
Tabela 70 – Custo dos protótipos do sistema de MPC (correntes laterais).	290
Tabela 71 – Custos considerados na comparação do custo da MPC com o custo da política atual... ..	291
Tabela 72 – Número de vezes que as políticas consideradas nas árvores de decisão AD1 e AD2 foram atribuídas (maquinas Ekra Serio 5000).	295
Tabela 73 – Número de vezes que as políticas consideradas na árvore de decisão AD2 foram atribuídas (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).....	297
Tabela 74 – Resultados da aplicação da metodologia.....	298
Tabela 75 – Descrição das principais categorias e subcategorias dos modelos de prognóstico (adaptado de Sikorska <i>et al.</i> , 2011).....	336
Tabela 76 – Critérios para apoiar a seleção de sensores.	359
Tabela 77 – Consumo unitário e consumo médio anual por máquina (máquinas Ekra Serio 5000)..	369
Tabela 78 – Consumo unitário e consumo médio anual por máquina (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).....	371

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

AHP – *Analytic Hierarchy Process*

BCM – *Business Centered Maintenance*

CBM – *Condition-Based Maintenance*

CBM+ – *Condition-Based Maintenance Plus*

CIB – *Centre of Industrial Management*

CIBOCOF – *Centrum voor Industrieel Beleid Onderhouds Concept Ontwikkelings Framework*

CIS – *Customer Integrated System*

CLP – *Controlador Lógico Programável*

CMMS – *Computerized Maintenance Management System*

CPS – *Cyber-Physical Systems*

EAM – *Enterprise Asset Management System*

EKF – *Extended Kalman Filters*

ESD – *Electrostatic Discharges*

ETA – *Event Tree Analysis*

FIFO – *First In First Out*

FMEA – *Failure Mode and Effects Analysis*

FMECA – *Failure Mode Effects and Criticality Analysis*

FMSA – *Failure Mode and Symptoms Analysis*

FTA – *Fault Tree Analysis*

FV – *Fim de Vida*

GAMM – *Graphical Analysis for Maintenance Management*

GFMAM – *Global Forum on Maintenance & Asset Management*

GHKF – *Gauss-Hermite Quadrature Kalman Filters*

GIS – *Geographic Information System*

IAM – *Institute of Asset Management*

IC – *Intervalo de Confiança*

IID – *Independientemente e Identicamente Distribuídos*

IoT – *Internet of Things*

ISO – *International Organization for Standardization*

JIPM – *Japan Institute of Plant Management*

JIT – *Just In Time*

KDD – *Knowledge Discovery in Databases*

k-NN – *k-Nearest Neighbors*

LCC – *Life Cycle Costing*

LIFO – *Last In First Out*

MC – *Manutenção Corretiva*

MCKF – *Monte-Carlo Kalman Filters*

MDT – *Mean Downtime*

MF – *Modo de Falha*

MIMOSA – *Machinery Information Management Open Systems Alliance*

MPC – *Manutenção Preventiva Condicionada*

MPS – *Manutenção Preventiva Sistemática*

MTBF – *Mean Time Between Failures*

MTBM – *Mean Time Between Maintenance*

MTTF – *Mean Time to Failure*

MTTR – *Mean Time to Repair*

NPM – *Número de Prioridade de Monitorização*

OEE – *Overall Equipment Effectiveness*

OMS – *Organization Management Service*

OPE – *Overall Plant Effectiveness*

OSA-CBM – *Open Systems Architecture for Condition-Based Maintenance*

OSA-EAI – *Open Systems Architecture for Enterprise Application Integration*

PAS – *Publicly Available Specification*

PCBs – *Printed Circuit Boards*

PDCA – *Plan-Do-Check-Act*

PHM – *Prognostics and Health Management*

QFD – *Quality Function Deployment*

RAMS – *Reliability, Availability, Maintainability & Safety*

RAMS+I – *Reliability, Availability, Maintainability, Safety & Inspectability*

RAMSSHEEP – *Reliability, Availability, Maintainability, Safety, Supportability, Health, Environment, Economics & Politics*

RBCM – *Risk Based Centered Maintenance*

RBD – *Reliability Block Diagram*

RCM – *Reliability Centered Maintenance*

RERMG – *Reliability Engineering and Risk Management Group*

ROCOF – *Rate of Occurrence of Failures*

ROI – *Return on Investment*

RP – *Reliability Prediction*

RUL – *Remaining Useful Life*

SAP – *Systems Applications and Products*

SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition*

SCM – *Supply Chain Management*

SMD – *Surface Mount Device*

SMT – *Surface Mount Technology*

SVM – *Support Vector Machine*

SVR – *Support Vector Regression*

SWRL – *Semantic Web Rule Language*

TD – *Tarefa de Detecção*

TI – *Tarefa de Inspeção*

TPM – *Total Productive Maintenance*

TQM – *Total Quality Management*

TQMain – *Total Quality Maintenance*

UKF – *Unscented Kalman Filters*

UML – *Unified Modelling Language*

VAL – *Valor Atualizado Líquido*

VBM – *Vibration-Based Maintenance*

VDM – *Value Driven Maintenance*

Neste capítulo, é efetuado o enquadramento teórico do tema da tese, salientando a sua relevância no contexto atual. Posteriormente, são apresentados os objetivos do trabalho de investigação, e são realizadas descrições da metodologia de investigação utilizada na conceção do trabalho e da estrutura da tese.

1.1. Enquadramento

As empresas industriais encontram-se cada vez mais dependentes da disponibilidade e do desempenho dos seus equipamentos para permanecerem competitivas. Esta circunstância requer a definição de ações de manutenção precisas e oportunas em alinhamento com os objetivos organizacionais. Por outro lado, nos últimos anos, a necessidade de contribuir para alcançar metas globais de sustentabilidade tornou-se premente em todos os setores de atividade, obrigando as organizações a redefinirem as suas estratégias operacionais para obterem ganhos de eficiência.

Os sistemas produtivos atuais são constituídos por equipamentos de elevada complexidade, que dispõem de várias funções. A maioria destes equipamentos são formados por uma grande variedade de componentes interativos e por diversos dispositivos eletrónicos. Por isso, a ocorrência da falha de um componente causa, frequentemente, a paragem súbita do equipamento e de todo o sistema produtivo no qual este se encontra inserido (Rezaeianjouybari & Shang, 2020).

A substituição dos componentes do equipamento somente após a ocorrência da falha permite maximizar o seu tempo de utilização. Contudo, muitas vezes, a falha tem um impacto adverso na segurança, no ambiente, ou origina perdas financeiras elevadas. Por exemplo, devido a danos causados noutros componentes e a intervenções demoradas para reparar o equipamento. Por isso, esta estratégia só é conveniente quando os custos associados à falha são baixos e as consequências da falha são aceitáveis.

No entanto, deve salientar-se que os custos de falha geralmente são difíceis de estimar. Além do custo de aquisição de peças sobressalentes e do custo de mão de obra, também existem frequentemente custos indiretos ou ocultos, que advêm de perdas de qualidade, perdas de produtividade, incumprimento de prazos de entrega, etc. (Wienker *et al.*, 2016).

Também é importante ter em conta que os efeitos da falha nem sempre são perceptíveis de imediato. Esta situação verifica-se sobretudo quando o componente que falha é redundante ou não contribui diretamente para a função principal do equipamento. Assim, as falhas ocultas requerem a definição de um método de deteção que permita evitar ou minimizar as suas consequências.

Para não incorrer em custos motivados pela falha opta-se frequentemente pela substituição preventiva dos componentes em intervalos predefinidos, com base no tempo de vida ou em parâmetros relacionados com o uso (ex.: tempo de operação, número de operações, distâncias percorridas, etc.). Em geral, esta estratégia é recomendada quando o risco de falha é crescente, como é o caso dos componentes sujeitos a fenómenos de desgaste. Porém, a substituição predeterminada do componente, sem considerar o seu estado de degradação, resulta no desperdício de uma porção do seu tempo de vida útil. Embora esta estratégia de manutenção possa ser vantajosa financeiramente, a sua aplicação é questionável do ponto de vista ambiental.

A manutenção condicionada é uma estratégia de manutenção preventiva que considera informação sobre a condição do equipamento para recomendar ações de manutenção apropriadas. O seu principal objetivo é prevenir falhas funcionais ou uma diminuição significativa do desempenho do equipamento. Por este motivo, a manutenção condicionada assume uma grande relevância quando as consequências da falha são críticas. A aplicação da manutenção condicionada permite evitar as perdas decorrentes da falha inesperada dos componentes e a sua substituição prematura, contribuindo assim para o cumprimento de metas de sustentabilidade (Kumar *et al.*, 2018).

Segundo Ingemarsdotter *et al.* (2021), a manutenção condicionada é uma estratégia fundamental para apoiar a transição para uma economia circular. Porém, estes autores também salientam que a implementação da manutenção condicionada nas empresas ainda é limitada, apesar dos seus benefícios serem conhecidos. Isto deve-se, em grande medida, à ausência de competências técnicas e organizacionais apropriadas e aos elevados custos de investimento.

Em geral, a manutenção condicionada assenta numa vasta gama de recursos e técnicas para detetar desvios relativamente às condições normais de operação, diagnosticar falhas potenciais, ou prever a condição futura de um ativo. Considera-se que a manutenção condicionada é viável quando existe pelo menos um parâmetro mensurável que indique a possibilidade de falha com a antecedência necessária para efetuar uma intervenção no componente em questão, antes que a perda de função se verifique (Pintelon & Parodi-Herz, 2008). Para obter informação útil para a tomada de decisão de manutenção, devem ser recolhidos dados relevantes e analisados de forma adequada. Assim, esta estratégia de

manutenção requer a identificação e aplicação de dispositivos e de técnicas de aquisição, processamento e análise de dados. A utilização de técnicas similares também poderá ser vantajosa para apoiar a detecção de falhas ocultas (Hashemian, 2010).

Os recentes avanços no domínio dos *Cyber-Physical Systems* (CPS), da *Internet of Things* (IoT), da computação em nuvem e da análise de *Big Data* possibilitam a tomada de decisões em tempo real, com base em informação extraída de dados abundantes adquiridos a partir de várias fontes distintas. Os CPS representam a interação entre o espaço físico (dispositivos de aquisição de dados) e o ciberespaço (algoritmos), a IoT é a tecnologia que permite que esta interação possa ser ubíqua e realizada em tempo real, e a computação em nuvem torna a informação extraída dos dados imediatamente acessível para uma grande quantidade de utilizadores (Nuñez & Borsato, 2017). Contudo, só é possível obter informação credível se os dados recolhidos estiverem organizados de forma adequada e se a sua integridade for assegurada (van Staden & Boute, 2021).

As decisões de manutenção condicionada geralmente resultam de uma análise que envolve a combinação entre dados de eventos e dados de parâmetros monitorizados (Jardine *et al.*, 2006). Por este motivo, é necessário manter registos de falha e registos de todas as ações de manutenção do equipamento. Estes registos devem ser uniformizados e organizados numa estrutura comum (Nuñez & Borsato, 2018), que permita a sua combinação automática com os dados dos parâmetros monitorizados (Tsang *et al.*, 2006). Assim, devem ser definidas estruturas de dados e aplicações de *software* que possibilitem a aplicação direta de algoritmos baseadas em dados, para avaliar o impacto da degradação progressiva do componente nos valores dos parâmetros medidos por sensores. No entanto, para permitir a tomada de decisão de manutenção em tempo real, também é necessário que a informação resultante da análise de dados seja apresentada de uma forma organizada e fácil de interpretar (Lee *et al.*, 2014, 2015).

Cada aplicação da manutenção condicionada, deve ser definida tendo em conta a natureza do modo de falha considerado e de acordo com a configuração do equipamento. Por este motivo, é fundamental definir critérios técnicos e financeiros que permitam selecionar os modos de falha a considerar na aplicação da manutenção condicionada, e obter informação que possibilite a definição dos parâmetros a monitorizar e dos respetivos dispositivos de medição. Além disso, deve assegurar-se que as pessoas envolvidas na definição do processo de manutenção condicionada e do sistema físico que lhe serve de suporte (ex.: rede de sensores, tecnologias de informação e de comunicação) têm as competências técnicas adequadas.

A implementação da manutenção condicionada é uma tarefa complexa, devido à sua natureza interdisciplinar, independentemente das características do equipamento (Guillén, Crespo, Gómez, *et al.*, 2016). Por isso, para assegurar uma relação de custo-benefício favorável, a manutenção condicionada deve ser abordada de uma forma sistemática e organizada, considerando as questões técnicas, financeiras e organizacionais envolvidas (Al-Najjar, 2012; Rastegari & Bengtsson, 2014).

1.2. Objetivos

Este trabalho teve como principal objetivo desenvolver uma metodologia abrangente que fornecesse uma abordagem sistemática para apoiar a implementação da manutenção condicionada de uma forma progressiva e eficiente em empresas de diferentes setores de atividade. Pretendeu-se que a metodologia definida recorresse a ferramentas e métodos simples, com vista a tornar a implementação da manutenção condicionada acessível para empresas onde existe uma experiência reduzida neste domínio.

Tendo em conta que a implementação da manutenção condicionada nem sempre é viável, pretendeu-se que a metodologia também apoiasse a seleção de políticas de manutenção preventiva sistemática específicas. Por conseguinte, procurou-se definir uma metodologia de planeamento para orientar a realização das seguintes atividades:

- Priorizar o equipamento e classificar a criticidade dos seus componentes, com base em critérios operacionais e financeiros relevantes;
- Analisar os modos de falha potenciais dos componentes do equipamento e definir a sua criticidade;
- Atribuir a política de manutenção mais adequada a cada modo de falha;
- Comparar o custo associado à aplicação da manutenção condicionada com o custo de outras políticas de manutenção aplicáveis ao mesmo modo de falha, a fim de identificar a política mais vantajosa financeiramente;
- Associar os parâmetros a monitorizar aos modos de falha para os quais se pretende testar a viabilidade técnica da manutenção condicionada, considerando os sistemas de monitorização existentes no equipamento e a informação resultante da análise dos modos de falha;
- Priorizar os modos de falha para os quais se pretende testar a viabilidade técnica da manutenção condicionada;
- Realizar o levantamento e a seleção dos dispositivos de medição a instalar no equipamento para suprir as necessidades existentes, tendo em conta os parâmetros que se pretende monitorizar;

- Avaliar a aplicabilidade e a eficácia da manutenção condicionada, utilizando os dados dos parâmetros monitorizados em tempo real e os dados do histórico de falhas do equipamento.

Atualmente, os processos industriais envolvem uma grande variedade de equipamentos, constituídos por diferentes tipos de componentes, que podem apresentar mecanismos de falha de elevada complexidade (ex.: processos físicos, químicos, etc.). Além disso, durante o tempo de vida útil do equipamento, podem ser geradas grandes quantidades de dados relacionados com as falhas ocorridas e com as ações de manutenção realizadas. Para analisar com rigor o impacto dos diferentes eventos nos valores dos parâmetros monitorizados no âmbito da manutenção condicionada, é necessário assegurar que estes dados são registados e organizados de forma apropriada. Esta circunstância exige que a implementação da manutenção condicionada seja abordada como um processo gradual e evolutivo, que requer competências específicas e necessita de ser adaptado de acordo com a realidade e os objetivos da organização. Por isso, considera-se que é fundamental que esta investigação possa dar resposta à pergunta:

“Como facilitar a implementação da manutenção condicionada em ambiente industrial?”

1.3. Metodologia de investigação

A conceção da metodologia de seleção da política de manutenção e de apoio à implementação da manutenção condicionada envolveu cinco fases, identificadas na Figura 1 e descritas em seguida.

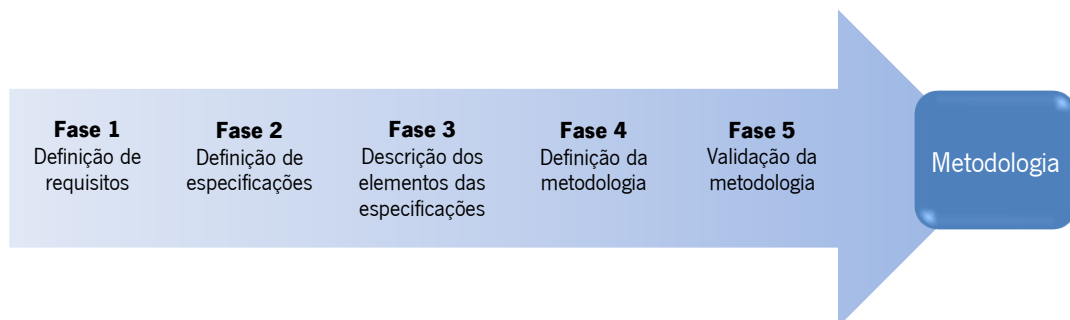


Figura 1 – Fases da conceção da metodologia desenvolvida.

Na Fase 1, definiram-se os requisitos relativos à metodologia (secção 3.1). Os requisitos foram estabelecidos tendo em conta os objetivos da tese e a análise de diversas fontes relacionadas com o tema, sobretudo artigos científicos e normas internacionais. Nesta fase, foi dada particular atenção às lacunas existentes na literatura, de forma a dotar a metodologia de características relevantes e diferenciadoras.

A Fase 2 envolveu a conversão dos requisitos em especificações (secção 3.2). Cada requisito deu origem a uma ou mais especificações. As especificações identificam os métodos e os procedimentos requeridos para satisfazer os requisitos.

Na Fase 3, descreveram-se os elementos que compõem as especificações. Estes elementos constituem características básicas que se pretendeu incluir nos métodos e nos procedimentos definidos. Para efetuar uma caracterização mais rigorosa e alinhada com os termos e conceitos de referência das áreas de conhecimento abordadas, realizou-se um estudo aprofundado da literatura relacionada. A análise da literatura também permitiu identificar métodos e ferramentas apropriados para serem integrados na metodologia.

A Fase 4 contemplou a definição da estrutura da metodologia e a definição dos métodos e dos procedimentos que compõem a metodologia, de acordo com os elementos das especificações. Nesta fase, os métodos e os procedimentos propostos foram descritos detalhadamente, identificando o modo como se relacionam. As descrições foram elaboradas com vista a orientar a aplicação da metodologia de uma forma organizada e eficiente.

Por fim, na Fase 5, foi efetuada a validação da metodologia. Esta fase envolveu a aplicação da metodologia aos equipamentos de uma linha de produção. A implementação permitiu aperfeiçoar os métodos e os procedimentos da metodologia, e demonstrar a sua relevância. O estudo foi realizado no âmbito de um projeto de investigação em parceria com uma empresa industrial e teve o apoio dos Fundos Europeus Estruturais e de Investimento na componente FEDER, através do Programa Competitividade Operacional e Internacionalização.

1.4. Estrutura da tese

A estrutura da tese está organizada em seis capítulos. No capítulo 1, é realizado o enquadramento teórico do tema da tese e descrevem-se os principais objetivos da investigação, a metodologia de investigação adotada e a estrutura da tese.

O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura. Este capítulo é constituído por três secções principais. Na primeira, é abordada a “Gestão de Ativos”. Neste âmbito, aborda-se o conceito de ativo, o processo de gestão de ativos, o ciclo de vida de um ativo físico, os sistemas de gestão e a gestão de informação. A segunda secção é dedicada à “Gestão da Manutenção”. Os principais temas contemplados na secção são: a definição e os objetivos da função manutenção, a gestão estratégica da manutenção, o conceito

de falha e a função de risco, os custos da manutenção, os tipos e as políticas de manutenção, e as metodologias de gestão da manutenção. Na terceira secção, é aprofundado o estudo da “Manutenção Condicionada”, sobretudo o conceito e o processo de manutenção condicionada, os modelos de diagnóstico e de prognóstico de falhas, e as abordagens destinadas a apoiar a implementação da manutenção condicionada.

No capítulo 3, são apresentados os requisitos e as especificações referentes à metodologia de seleção da política de manutenção e de apoio à implementação da manutenção condicionada.

O capítulo 4 descreve detalhadamente a estrutura e os métodos e procedimentos da metodologia de seleção da política de manutenção e de apoio à implementação da manutenção condicionada, desenvolvida no âmbito da tese.

No capítulo 5, é abordada a implementação da metodologia. Este capítulo tem início com uma breve descrição do processo produtivo e dos equipamentos da empresa onde decorreu o estudo, e com a caracterização da gestão dos dados de manutenção na empresa. Posteriormente, são efetuadas descrições detalhadas da implementação dos métodos e dos procedimentos da metodologia aos equipamentos analisados. No final deste capítulo, é apresentada uma síntese dos resultados da implementação da metodologia.

O capítulo 6 apresenta as principais conclusões da tese e sugestões para trabalho futuro.

No final do documento, encontram-se todas as referências bibliográficas relativas às publicações consultadas para a elaboração da tese e os apêndices.

REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Gestão de ativos

Devido à crescente competição, as empresas são muitas vezes obrigadas a estender o tempo de vida de infraestruturas, equipamentos e componentes essenciais para o cumprimento dos objetivos organizacionais (Bharadwaj *et al.*, 2012). Por este motivo, é fundamental assegurar a integridade e a sustentabilidade destes sistemas ao longo da sua vida útil. A tomada de decisões de gestão eficazes neste contexto requer informação sobre o desempenho, a condição e a criticidade dos vários elementos do sistema, competências técnicas e de gestão, e meios tecnológicos apropriados.

2.1.1. Conceito de ativo

O sucesso de uma organização depende em grande medida da sua capacidade para utilizar os seus ativos de um modo eficiente (Lin *et al.*, 2008; Lin *et al.*, 2007). De acordo com a norma ISO 55000:2014, um ativo é um item, coisa ou entidade que tem valor potencial ou real para uma organização. Para alcançar a melhor rentabilidade dos ativos, é necessário obter informação rigorosa sobre os mesmos e adotar as melhores práticas durante todas as etapas do seu ciclo de vida (Koronios *et al.*, 2005; Lin *et al.*, 2008).

Em contabilidade, um ativo é visto como um recurso económico tangível ou intangível pertencente a uma entidade empresarial ou indivíduo, cujo custo no momento de aquisição pode ser medido em termos monetários e ser apresentado no balanço de uma empresa (Tholana, 2016). Enquanto os ativos tangíveis são bens físicos, por exemplo equipamento, inventário ou propriedades. Os ativos intangíveis são bens que não têm existência física, nomeadamente marcas, cabeçalhos e títulos de publicações, *software*, licenças e *franchises*, direitos de autor, patentes e outros direitos de propriedade industrial, receitas, fórmulas, modelos, projetos, protótipos, etc. (Chareonsuk & Chansangavej, 2008).

No âmbito da gestão financeira, os ativos também podem ser classificados como ativos fixos ou correntes. Um ativo fixo é um item que tem valor durante um período superior a um ano (Hastings, 2010). Geralmente, os ativos fixos são utilizados pelas organizações para fins produtivos e podem ser tangíveis ou intangíveis. O valor destes ativos depende da procura futura, alterações tecnológicas e da adequação das várias ações de manutenção (Tsang *et al.*, 1999). No ano de aquisição, os ativos fixos

não podem ser considerados para efeitos fiscais. Por exemplo, a compra de um equipamento é habitualmente entendida como a conversão de um ativo (dinheiro) noutra ativo (o equipamento). Posteriormente, a sua depreciação passa a representar uma despesa durante a vida útil do ativo (Hastings, 2010). Os ativos correntes são bens e direitos convertíveis em dinheiro no período de um ano e não estão sujeitos a depreciação. Estes permitem explorar os ativos físicos e executar as atividades organizacionais (Palanivelu, 2013). Na Tabela 1, são apresentados exemplos de ativos fixos e de ativos correntes.

Tabela 1 – Ativos fixos e ativos correntes (adaptado de Hastings, 2010).

Ativos fixos	Ativos correntes
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Terras ▪ Edifícios ▪ Veículos ▪ Instalações fabris ▪ Maquinaria ▪ Peças de substituição em stock por um período superior a um ano 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dinheiro ▪ Créditos ▪ Inventário: <ul style="list-style-type: none"> - Materiais - Material em processo - Produtos acabados - Consumíveis

O valor de um ativo poderá variar entre diferentes organizações e entre os seus *stakeholders*, e deve considerar riscos e passivos (ISO 55000:2014). A Figura 2 apresenta as componentes básicas de um ativo.

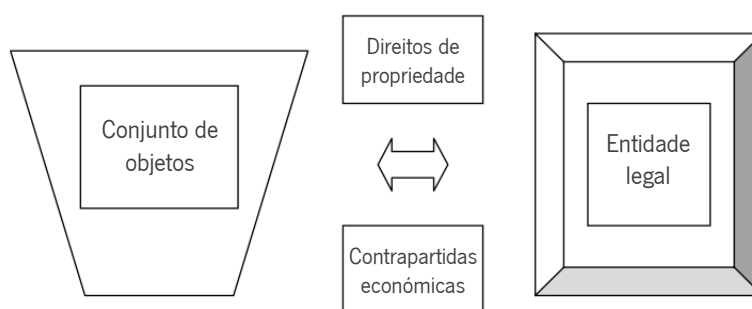


Figura 2 – Componentes básicas de um ativo (adaptado de Amadi-Echendu *et al.*, 2010).

2.1.2. Processo de gestão de ativos

A expressão “gestão de ativos” teve origem na área financeira. Neste contexto, os investidores procuram identificar um risco aceitável e utilizam técnicas de gestão de ativos com a finalidade de alcançar o retorno mais elevado possível, sem ultrapassar o nível de risco estabelecido (Brown & Humphrey, 2005). Mais tarde, a expressão passou a ser utilizada pelos profissionais de manutenção e vendedores de *software* especializado, no sentido de dar mais ênfase e credibilidade às suas atividades, e representando

uma estratégia de manutenção mais alinhada com os objetivos empresariais. Além disso, no domínio da gestão de infraestruturas e de instalações industriais, o conceito de gestão de ativos também foi adotado pelos seus responsáveis e colaboradores, procurando traduzir uma função destinada à preservação e utilização sustentável dos ativos físicos (Woodhouse, 2007).

Segundo a norma ISO 55000:2014 (*Asset management – Overview, principles and terminology*), a gestão de ativos é a atividade coordenada de uma organização para realizar valor a partir dos ativos. A norma refere ainda que a realização de valor envolve um balanceamento dos custos, riscos, oportunidades e ganhos de desempenho relacionados com os ativos. O objetivo é alcançar a melhor combinação entre todos os elementos enumerados. Esta é uma definição genérica e abrangente que se aplica à gestão de ativos de diferentes naturezas. No entanto, também existem na literatura definições mais específicas destinadas a explicar o conceito de gestão de ativos físicos ou ativos de engenharia. Uma das definições mais completas é dada pela *Publicly Available Specification PAS 55-1:2008 – Specification for the optimized management of physical assets*. Esta especificação refere que a gestão de ativos físicos consiste em atividades e práticas sistemáticas e coordenadas através das quais uma organização gere de modo otimizado e sustentável os seus ativos e sistemas de ativos, e os desempenhos, riscos e despesas que lhe estão associados durante os respetivos ciclos de vida, com o objetivo de desenvolver o seu plano estratégico organizacional.

O *Asset Management Council of Australia* considera que a gestão de ativos consiste na gestão do ciclo de vida de ativos físicos para alcançar os resultados estabelecidos pela empresa. No âmbito de um estudo sobre abordagens de investigação relacionadas com a gestão de ativos na indústria do petróleo, Kusumawardhani, Gundersen, *et al.* (2017) definem a gestão de ativos como o desenvolvimento, implementação e execução de um plano coordenado juntamente com o controlo de gestão e atividades organizacionais, para assegurar que o ativo físico está a desempenhar a sua função de um modo seguro, eficaz e eficiente durante todo o seu ciclo de vida, de modo a alcançar os objetivos organizacionais. Esta definição evidencia o carácter transversal da gestão de ativos no contexto organizacional.

De acordo com Wittwer *et al.* (2002), a gestão de ativos é um processo sistemático de manutenção, atualização e operação de ativos físico de modo rentável. Estes autores salientam ainda que a gestão de ativos é uma ferramenta de tomada de decisão que pode ser utilizada para executar um planeamento de curto e de longo prazo. Brown & Spare (2004) entendem que a gestão de ativos é uma filosofia de negócio concebida para alinhar objetivos corporativos com decisões relacionadas com a utilização dos

seus ativos. Por outro lado, Tywoniaka *et al.* (2008) consideram que se trata do processo ou ciclo ao qual os ativos são submetidos para criar um produto ou fornecer um serviço com nível ótimo.

Segundo Hastings (2010), a gestão de ativos físicos envolve um conjunto de atividades, destinadas a cumprir um dado objetivo organizacional, que se enquadram nos seguintes tópicos:

- Identificação dos ativos necessários;
- Identificação dos objetivos de financiamento;
- Adquisição de ativos;
- Fornecimento de sistemas de apoio logístico e de manutenção para ativos;
- Eliminação ou renovação de ativos.

A gestão de ativos traduz os objetivos da organização em decisões relacionadas com os ativos, planos e atividades, utilizando uma abordagem baseada no risco (ISO 55000:2014). Deste modo, a função de gestão de ativos deve ser capaz de proporcionar continuamente respostas para as seguintes questões relacionadas com os ativos (Hastings, 2015):

- Funciona?
- É seguro?
- Apoia o objetivo do negócio?

De acordo com Woodhouse (2007), a gestão de ativos físicos representa a melhor combinação entre a preservação e a exploração dos ativos otimizada ao longo do ciclo de vida, tendo em conta investimentos iniciais, alienações e renovações ou modificações. Na opinião do autor, a preservação dos ativos abrange a gestão da manutenção e a gestão do risco, ao passo que a exploração dos ativos contempla a sua utilização para alcançar objetivos corporativos ou ganhos de desempenho.

Segundo El-akruti & Dwight (2013), existem dois aspetos principais na gestão de ativos: a gestão do ciclo de vida dos ativos físicos e o controlo do sistema holístico de atividades relacionadas com os ativos orientadas para concretizar a estratégia organizacional. As atividades de gestão de ativos precisam de ser estabelecidas entre muitas outras atividades e níveis organizacionais e ao longo de todas as etapas do ciclo de vida (El-akruti & Dwight, 2013). Por isso, é necessário reunir e integrar conhecimentos provenientes de diversas áreas (Amadi-Echendu *et al.*, 2010; Burnett & Vlok, 2014; IAM, 2015; Kusumawardhani, Gundersen, *et al.*, 2017).

Os diferentes tipos de ativos pertencentes a uma organização são habitualmente interdependentes e a gestão ótima dos ativos físicos também envolve gerir pessoas, informação, finanças, desempenho e

atividades (Zhang & Dudzic, 2006). Embora os ativos possam ser valiosos para uma organização individualmente, é geralmente quando estão integrados num sistema de ativos que estes permitem gerar valor (IAM, 2015). As organizações podem optar por gerir os seus ativos em grupo ou individualmente. A criação de grupos de ativos pode ser efetuada em função do tipo de ativos, sistema de ativos ou portefólio de ativos.

Um sistema de ativos é geralmente constituído por um conjunto de ativos que interagem ou que estão interrelacionados. Quando um conjunto de ativos está abrangido no âmbito do mesmo sistema de gestão de ativos, diz-se que forma um portefólio de ativos (ISO 55000:2014). Um sistema de gestão de ativos é vital, sobretudo para as organizações que estão mais dependentes dos seus ativos físicos. Este proporciona uma abordagem sistemática para coordenar e otimizar a diversidade e complexidade de um portefólio de ativos em conformidade com os objetivos e prioridades da organização (BSI, 2008b). Além disso, permite transmitir a estratégia da empresa e o desempenho na gestão de ativos para toda a organização (Volkova & Kornienko, 2014). A Figura 3 mostra a relação entre os conceitos de gestão de ativos, sistema de gestão de ativos e portefólio de ativos.



Figura 3 – Relações entre conceitos (adaptado de ISO 55000:2014).

A implementação eficaz da gestão de ativos requer uma abordagem disciplinada que permita a uma organização maximizar valor e concretizar os seus objetivos estratégicos, com base na gestão dos seus ativos (BSI, 2008a). No entanto, as iniciativas de gestão de ativos físicos são muitas vezes restringidas pelos recursos disponíveis (Petersdorff & Vlok, 2014).

Wittwer *et al.* (2002) apresentam um ciclo básico para um programa de gestão de ativos físicos constituído por nove etapas, nomeadamente:

1. Inventariar os ativos.
2. Realizar a avaliação da condição dos ativos.
3. Desenvolver e aplicar normas de desempenho.
4. Avaliar os ativos tendo em conta as normas utilizadas.
5. Analisar as alternativas que podem ser seguidas para manter ou atualizar os ativos.
6. Tomar decisões sobre a alocação de recursos.
7. Implementar o plano de investimento.
8. Desenvolver e utilizar medidas de desempenho dos ativos.
9. Recolher informação de resposta e realizar ajustamentos quando necessário.

Uma gestão de ativos bem-sucedida exige uma clara compreensão dos ativos que são necessários para sustentar fisicamente o negócio e assegurar a sua rentabilidade (Hastings, 2010), de modo a permitir que os recursos necessários possam ser alocados eficazmente a todas as áreas relevantes (Petersdorff & Vlok, 2014). No sentido de melhorar o desempenho de um ativo físico, devem ser identificadas as políticas de manutenção e de provisão de recursos de manutenção mais apropriadas (Cahyo *et al.*, 2015).

A gestão da manutenção e uma rigorosa e eficaz tomada decisão, são essenciais para uma gestão de ativos bem-sucedida (Burnett & Vlok, 2014). No entanto, é necessário ter em consideração as prioridades conflitantes relacionadas com a utilização e a manutenção dos ativos (BSI, 2008b). Além disso, o ciclo de vida completo de um ativo deve ser contemplado quando se define a estratégia e se tomam decisões de gestão de ativos (IBM, 2007). Segundo Cahyo *et al.* (2015), a definição de uma política de provisão de recursos de manutenção é um processo iterativo ao longo do tempo de vida do ativo. Assim, tendo em conta que as empresas industriais dependem significativamente dos seus equipamentos para obter vantagens competitivas, estas empresas devem desenvolver um plano de longo prazo para a função manutenção que considere a visão, missão e objetivos da organização, e potenciais alterações tecnológicas (Al-Turki, 2012).

Devido à sua natureza holística, as atividades e responsabilidades de gestão de ativos envolvem todos os níveis de uma organização (Hastings, 2010). A gestão de ativos é um processo que estabelece a ligação entre os proprietários dos ativos, gestores dos ativos e fornecedores de serviços relacionados com os ativos, de modo a permitir que todas as decisões que implicam custos estejam alinhadas com os objetivos corporativos, apoiados em dados associados aos ativos (Brown & Humphrey, 2005).

Segundo Brown & Humphrey (2005), a função de gestão de ativos assenta em três pilares de competência: gestão, engenharia e informação. As iniciativas com origem num dos pilares devem ter sempre em consideração e estar sincronizadas com os outros dois. Na Tabela 2, são apresentados os principais itens que compõem cada um dos pilares.

Tabela 2 – Pilares de competência que suportam a função de gestão de ativos e os itens associados (adaptado de Brown & Humphrey, 2005).

Gestão de Ativos		
Gestão	Engenharia	Informação
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estratégia empresarial ▪ Estratégia regulamentar ▪ Gestão de desempenho ▪ Conceção de processos ▪ Planeamento de recursos ▪ Análise de decisões ▪ Riscos financeiros 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Planeamento ▪ Conceção ▪ Operações ▪ Manutenção ▪ Fiabilidade ▪ Proteção ▪ Condição do equipamento ▪ Riscos técnicos 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Arquitetura do sistema ▪ Inteligência empresarial ▪ Gestão do conhecimento ▪ Registo de ativos ▪ Sistemas de gestão da informação: <ul style="list-style-type: none"> - <i>Enterprise Asset Management System (EAM)</i>; - <i>Customer Integrated System (CIS)</i>; - <i>Geographic Information System (GIS)</i>; - <i>Computerized Maintenance Management System (CMMS)</i> - <i>Supply Chain Management (SCM)</i>; - <i>Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)</i>; - <i>Organization Management Service (OMS)</i>.

Os benefícios de uma gestão de ativos bem-sucedida, orientada para a realização de valor em todo ciclo de vida, foram comprovados em muitas indústrias e ambientes (BSI, 2014). No entanto, compete a cada organização determinar o que considera valor e decidir como gerir ativos, para obter o melhor valor total (IAM, 2015). O que constitui valor irá depender dos objetivos organizacionais, da natureza e do propósito da organização e das necessidades e expectativas dos seus *stakeholders* (ISO 55000:2014). A Tabela 3 descreve alguns dos benefícios da implementação da gestão de ativos.

Tabela 3 – Benefícios associados à gestão de ativos (adaptado de ISO 55000:2014).

Benefício	Descrição
Melhoria do desempenho financeiro	A melhoria do retorno do investimento em ativos e a redução de custos podem ser alcançados, enquanto se preserva o valor dos ativos e sem sacrificar a concretização dos objetivos organizacionais de curto ou longo prazo.
Decisões de gestão de ativos informadas	Permite à organização melhorar a sua tomada de decisão e balancear eficazmente custos, riscos, oportunidades e desempenho.
Gestão do risco	A redução de perdas financeiras, melhoria da saúde e segurança, boa vontade e reputação, minimização do impacto ambiental e social, pode resultar na redução de encargos, tais como prémios de seguro, multas e sanções.
Melhoria de serviços e resultados	Assegurar o pleno desempenho dos ativos pode proporcionar melhores serviços ou produtos que consistentemente satisfazem ou excedem as expectativas dos clientes ou <i>stakeholders</i> .
Responsabilidade social demonstrada	Melhorar a capacidade da organização para, por exemplo reduzir emissões, conservar recursos e adaptar-se às alterações climáticas, permite demonstrar práticas de negócio socialmente responsáveis e éticas.
Conformidade demonstrada	Estar explicitamente em conformidade com requisitos legais, estatutários e regulamentares, e aderir a normas de gestão de ativos, políticas e processos, pode permitir a demonstração de conformidade.
Reputação melhorada	Com base na melhoria da satisfação do cliente, e da compreensão e confiança dos <i>stakeholders</i> .
Melhoria da sustentabilidade organizacional	Gerir eficazmente os efeitos, as despesas e o desempenho de curto e longo prazo, pode melhorar a sustentabilidade das operações e da organização.
Melhoria da eficácia e eficiência	Rever e melhorar os processos, os procedimentos e o desempenho dos ativos pode melhorar a eficácia e eficiência e a capacidade de alcançar os objetivos organizacionais.

Os fatores humanos, tais como a cultura e a motivação também devem receber particular atenção no âmbito da gestão de ativos (BSI, 2008a; IAM, 2015; Reid & Xerri, 2013). A falta de compreensão em relação aos benefícios das iniciativas de gestão de ativos pode condicionar a sua influência e sustentabilidade. Por isso, o planeamento realizado no âmbito da gestão de ativos deve procurar alinhar as visões dos funcionários sobre as áreas deficitárias e gerir as suas expectativas acerca dos proveitos da boa aplicação da gestão de ativos (Petersdorff & Vlok, 2014). Deste modo, as organizações que utilizam ativos físicos no âmbito da sua atividade deverão reconhecer que uma gestão ineficiente dos ativos intangíveis poderá ter um profundo impacto no seu desempenho global (BSI, 2008b).

O processo de gestão de ativos exige que grandes quantidades de dados, relativos a diferentes departamentos de uma organização, sejam recolhidos e mantidos durante longos períodos de tempo, de modo a identificar tendências a longo prazo (Koronios *et al.*, 2005; Lin *et al.*, 2008). Os dados são elementos fundamentais para construir modelos de decisão para apoiar uma gestão de ativos baseada em evidências. No entanto, é essencial que os dados utilizados tenham a qualidade exigida para que as decisões mais corretas possam ser tomadas (Jardine & Tsang, 2013).

2.1.3. Ciclo de vida de um ativo físico

A gestão do ciclo de vida de um ativo físico ou de um sistema de ativos é essencial para proporcionar uma manutenção eficiente e garantir viabilidade económica a longo prazo (Giglio *et al.*, 2018). Este processo depende em grande medida da informação e conhecimento existentes sobre os ativos, e dos recursos financeiros disponibilizados (Mehairjan, 2017). A identificação de melhorias ao longo das etapas que constituem o ciclo de vida deve ser realizada com a contribuição de todos os intervenientes (Design *et al.*, 2013). O objetivo consiste em minimizar o custo total aplicando as políticas mais apropriadas em cada uma das etapas (Tywoniaka *et al.*, 2008).

Durante o ciclo de vida de um ativo, deve ser efetuada uma gestão que considere os níveis estratégico e operacional, com vista à satisfação de todas as partes interessadas. A vertente estratégica envolve a compreensão dos tipos de ativos que estão a ser geridos, a definição dos objetivos que devem ser alcançados no âmbito da utilização dos ativos e a avaliação das dificuldades que o gestor de ativos terá de enfrentar no cumprimento das suas responsabilidades. Enquanto a vertente operacional contempla a monitorização da condição e a manutenção dos ativos (Amadi-Echendu *et al.*, 2010).

O ciclo de vida de um ativo físico é geralmente composto por diversas etapas interdependentes e pode abranger um intervalo de tempo bastante longo (Lin *et al.*, 2007). Segundo Hastings (2010), o período de vida de um item deve corresponder à sua vida económica. Ou seja, a duração que minimiza os seus custos por unidade de tempo. As etapas do ciclo de vida vão desde a identificação da oportunidade de desenvolvimento e definição de requisitos para um ativo específico até à sua desativação e eliminação. No entanto, a designação, o número de etapas e as atividades incluídas em cada etapa podem variar em função do setor da indústria (IAM, 2015). De acordo com Fedele (2011), o ciclo de vida de um sistema pode ser dividido nas seguintes fases:

1. Planeamento, desenvolvimento e fabrico
2. Vida útil
3. Desmantelamento

Além do utilizador do ativo, cada uma das fases envolve habitualmente a participação de diversos fornecedores de produtos e de serviços. A entidade que pretende explorar um dado ativo físico pode, por exemplo, adquirir um ativo já existente no mercado, encomendar uma solução personalizada ou desenvolvê-la internamente, ou ainda recorrer ao aluguer. Além disso, durante o período de utilização do ativo é geralmente necessário adquirir peças sobressalentes. Pode ainda ter de se recorrer à subcontratação de serviços especializados para a sua conceção, instalação, manutenção, desativação e eliminação. A Figura 4 mostra três possíveis representações do ciclo de vida dos ativos físicos.

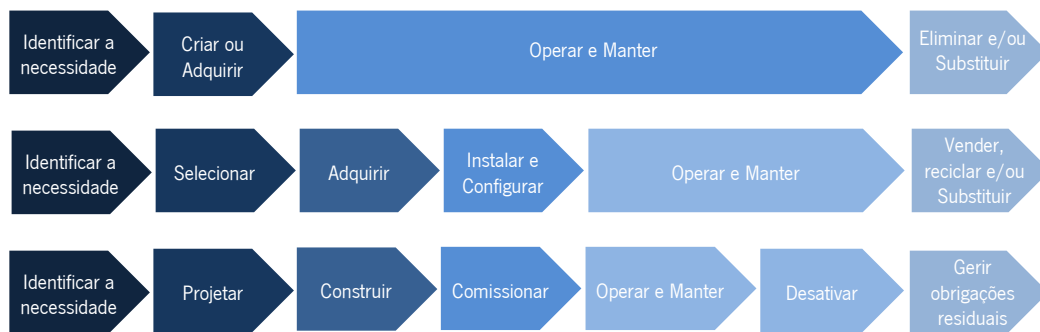


Figura 4 – Exemplo de variações na descrição das etapas do ciclo de vida dos ativos físicos (adaptado de IAM, 2015).

A análise do custo do ciclo de vida ou *Life Cycle Costing* (LCC) é uma técnica que visa minimizar o custo necessário para obter um determinado nível de resultado relacionado com o ativo (Sherif & Kolarik, 1981). Para esse efeito, são quantificadas diferentes opções para determinar a melhor configuração para um ativo específico. Este conceito começou a ser formalmente adotado em 1965, quando o *Logistics Management Institute* dos Estados Unidos o referiu num documento militar. Posteriormente, a partir da década de 1970 a sua aplicação estendeu-se a outros setores de atividade, conjugando competências de engenharia, contabilidade, matemática e estatística (Okano, 2001).

O custo do ciclo de vida é calculado em termos de valor presente e corresponde à soma de todos os custos associados à posse e operação de um sistema durante um período específico (Sénéchal, 2016). Geralmente, consideram-se todos os custos desde que a aquisição começa a ser ponderada até ao momento em que o ativo é retirado de serviço para ser eliminado ou para reafecção (Woodward, 1997). Na análise do custo do ciclo de vida, podem ser aplicadas diversas ferramentas, nomeadamente previsão, análise de custo-benefício, elaboração de *cash flows*, aplicação de descontos, análise de sensibilidade, estimativa de custos, teoria de probabilidade, etc. (Okano, 2001).

A avaliação de configurações alternativas começa com o início do processo de tomada de decisão e é sucessivamente aperfeiçoada e estendida durante a conceção e desenvolvimento até que uma configuração operacional seja alcançada. Os dados obtidos nesta fase permitem definir um perfil de

custos representativo do período correspondente ao ciclo de vida previsto. A Figura 5 exemplifica o perfil de custos do ciclo de vida de um sistema (Fedele, 2011).

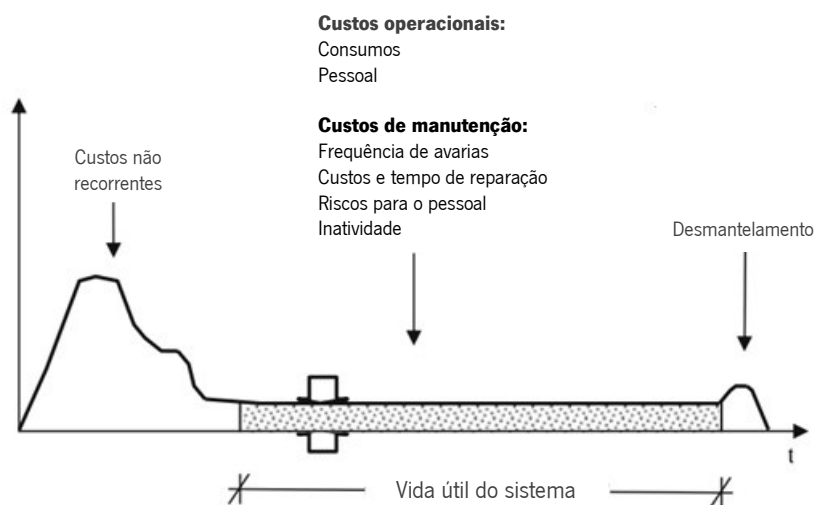


Figura 5 – Perfil de custos do ciclo de vida de um sistema (adaptado de Fedele, 2011).

Na fase de planeamento, desenvolvimento e fabrico, a curva de custo varia em função da quantidade que se pretende construir, visto que aumentará a necessidade de materiais e a remuneração do trabalho (Fedele, 2011). Quando esta fase é realizada externamente, no cálculo do custo total para o utilizador considera-se o custo de aquisição. Muitas vezes, a aquisição representa apenas uma pequena parte dos custos totais do ciclo de vida (Waeyenbergh & Pintelon, 2002). Cerca de 60% dos custos de todo o ciclo de vida podem ser imputados à vida útil do ativo, ou seja, ao período durante o qual este é utilizado pelo cliente. Estes custos resultam da soma de custos operacionais, custos de manutenção, custos de perdas de capital e de prejuízo de imagem, e custos de desativação (Fedele, 2011). As categorias de custos referidas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Categorias de custos associadas à vida útil de um ativo (adaptado de Fedele, 2011).

Categoria de custos	Descrição
Custos operacionais	Tendem a diminuir à medida que a automação aumenta, devido à redução do número de operários e com a, cada vez maior, atenção dada à redução do consumo de energia.
Custos de manutenção	Tornam-se geradores de custos ao longo de todo o ciclo de vida do ativo, devido à redução do financiamento para a renovação periódica do equipamento e à consequente extensão forçada do tempo de vida dos sistemas que já estão em serviço.

Categoria de custos	Descrição
Custos de perdas de capital e de prejuízo de imagem	Variam de acordo com o tipo de sistema (ex.: instalação industrial, sistemas de armamento, equipamento para exames clínicos), no entanto, por vezes, não são devidamente considerados por parte do fornecedor e do cliente (ex.: perda de vidas humanas).
Custos de desativação	Podem ser transformados em proveitos (ex.: sistema obsoleto vendido a terceiros) ou podem ter custos muito elevados devido a um impacto ambiental negativo (ex.: instalações de energia nuclear).

Segundo Okano (2001), a gestão do custo do ciclo de vida deve considerar a perspetiva do fabricante, a perspetiva do cliente ou utilizador e a perspetiva social ou ambiental. Na Tabela 5, é apresentada uma breve descrição destas perspetivas.

Tabela 5 – Perspetivas a considerar na gestão do ciclo de vida (adaptado de Okano, 2001).

Perspetiva	Descrição
Perspetiva do fabricante	Os custos do produto ou sistema podem ser influenciados por: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Alterações de engenharia que ocorrem ao longo da conceção e desenvolvimento (ex.: melhoria de desempenho, aumento da capacidade, etc.); ▪ Alteração de fornecedores para aquisição de componentes, fabrico do sistema ou alterações de construção; ▪ Alterações na capacidade de apoio logístico; ▪ Estimativas iniciais imprecisas e alterações no procedimento de estimativa; ▪ Problemas imprevistos.
Perspetiva do cliente ou utilizador	O cliente apresenta geralmente requisitos, tais como a fiabilidade, a segurança, o custo de aquisição e o custo de propriedade.
Perspetiva social ou ambiental	Devem considerar-se custos de destruição e custos das externalidades (ex.: custos de saúde resultantes da poluição).

Para assegurar a realização de valor durante o ciclo de vida dos ativos, devem ser aplicadas técnicas de análise do custo do ciclo de vida e técnicas de otimização do valor. A otimização do valor considera o valor decorrente da utilização dos ativos juntamente com os custos de exploração, e tem como finalidade fornecer o melhor rácio entre os benefícios e os custos do ciclo de vida, tendo em conta os objetivos organizacionais (IAM, 2015).

2.1.4. Sistemas de gestão

A gestão de ativos deve ser realizada através de um sistema que tem como missão apoiar a realização das operações de uma empresa, de modo a assegurar o cumprimento dos objetivos organizacionais e dos planos de negócio definidos com base na procura dos clientes (Figura 6) (Hastings, 2015).

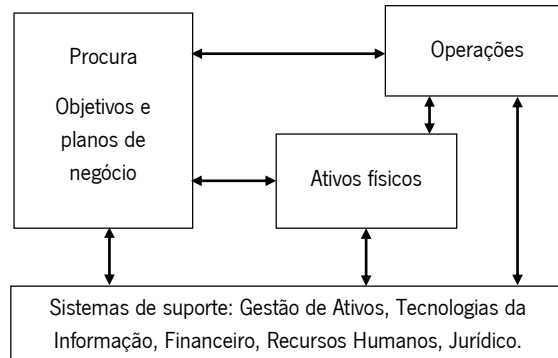


Figura 6 – A gestão de ativos físicos como sistema de apoio às atividades de uma organização (adaptado de Hastings, 2015).

Durante anos, as empresas utilizaram sistemas de gestão de ativos focados apenas no nível operacional. Estes sistemas tinham como finalidade monitorizar estados e planear iniciativas, considerando bases de dados, inventários de ativos, modelos técnicos e outras ferramentas analíticas (Amadi-Echendu *et al.*, 2010). No entanto, uma gestão de ativos bem-sucedida requer uma ligação clara entre o plano estratégico da organização e as atividades de gestão de ativos (IAM, 2015).

O sistema de gestão de ativos deve ser prontamente integrado com o sistema gestão dominante da organização e com outros sistemas de gestão existentes, de modo a obter uma maior eficiência (IAM, 2015). Mehairjan (2017) representa a função de gestão de ativos como um sistema hierárquico integrado constituído por políticas, estratégias e planos de gestão de ativos, dentro de uma estrutura de gestão corporativa organizacional. A Figura 7, mostra os níveis de gestão, as suas principais componentes e os níveis de tomada de decisão correspondentes.

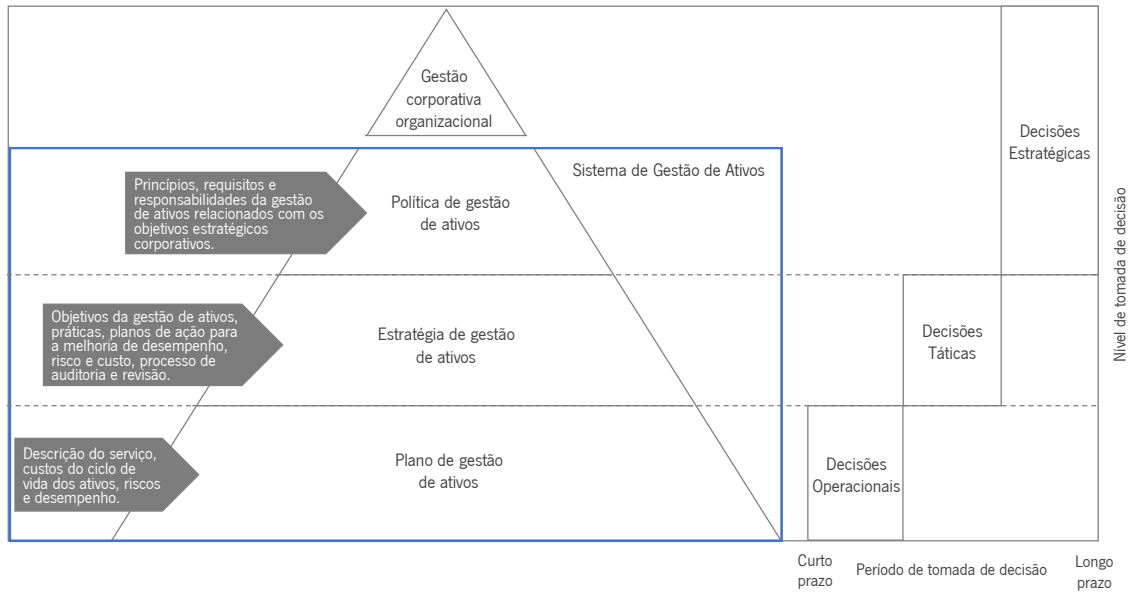


Figura 7 – Representação dos níveis de gestão de ativos (adaptado de Mehairjan, 2017).

As decisões podem ser tomadas ao nível estratégico, tático e operacional. As decisões estratégicas são da responsabilidade da gestão de topo e influenciam a orientação e a vitalidade da empresa a longo prazo. Depois de tomadas, estas decisões são difíceis de modificar e o custo de alteração é elevado, por exemplo a aquisição de novas infraestruturas. O nível tático de tomada de decisão corresponde ao nível intermédio de gestão da organização. Abrange decisões com efeitos de longa duração, nomeadamente decidir o orçamento operacional da organização ou a contratação de quadros diretores. A tomada de decisões operacionais ocorre no nível mais baixo de gestão da organização. Estas decisões têm geralmente consequências de curto prazo e podem ser facilmente alteradas. No entanto, a sua concretização é fundamental para o funcionamento diário da organização. Envolvem, por exemplo, decisões relacionadas com a gestão de inventários e o tipo de manutenção a aplicar (Bell & Zaric, 2013). Segundo Macchi *et al.* (2018), num investimento de grande dimensão como a aquisição de uma nova unidade industrial, além da perspetiva estratégica também é necessária uma visão tática e operacional que permita formar uma perceção clara do resultado que a decisão poderá originar. Estes autores referem ainda que o risco associado também deve ser considerado ao nível estratégico, tático e operacional. O nível de gestão corporativo pressupõe a descrição de um sistema global que permite a uma empresa alcançar os resultados desejados e estabelecer a sua posição no mercado (Volkova & Kornienko, 2014). Os níveis do sistema de gestão de ativos devem estar em concordância com a gestão corporativa.

O conceito de sistema de gestão de ativos teve uma evolução bastante significativa a partir da década de 2000 (Attwate *et al.*, 2014). No ano de 2004, foi publicada a primeira versão da PAS 55 pelo *British*

Standards Institute (BSI) e, após uma revisão substancial, em setembro 2008 foi disponibilizada uma nova versão. A PAS 55 resultou do esforço conjunto do *British Standards Institute* (BSI), do *Institute of Asset Management* (IAM) e de 49 organizações provenientes de 15 indústrias de 10 países diferentes. Esta especificação foi vastamente adotada por diversos setores da indústria em todo o mundo, nomeadamente energia, transportes, extração mineira, processos e transformação (Sanford, 2015). O texto original foi traduzido para espanhol, francês, chinês, russo e português (BSI, 2014). A especificação é composta por duas partes: PAS 55-1: *Specification for the optimized management of physical assets* e PAS 55-2: *Guidelines for the Application of PAS 55-1*. A primeira parte, especifica os requisitos para um sistema de gestão de ativos destinado a gerir ativos físicos e sistemas de ativos durante o seu ciclo de vida (BSI, 2008a). Na segunda parte, são apresentadas orientações para o estabelecimento, manutenção e melhoria de um sistema de gestão de ativos implementado de acordo com os requisitos da primeira parte e a sua coordenação com outros sistemas de gestão (BSI, 2008b). A PAS 55 baseou-se no formato das normas da *International Organization for Standardization* (ISO), de modo a poder ser integrada com normas relacionadas, tais como ISO 9001 (Sistemas de Gestão da Qualidade), ISO 14001 (Sistemas de Gestão Ambiental), OHSAS 18000 (Sistemas de Gestão de Saúde e Segurança Ocupacional).

Em julho de 2009, o BSI submeteu, com o apoio do IAM, uma proposta para a formação de um Comité de Projeto destinado a desenvolver uma norma ISO para a gestão de ativos baseada na PAS 55 e na contribuição de indústrias e sociedades científicas de todo o mundo (Sanford, 2015). Quase cinco anos mais tarde, em janeiro de 2014, foram publicadas as normas da série ISO 55000, composta por três normas. Estas normas podem ser aplicadas a todos os tipos de ativos e por todos os tipos de organizações, independentemente da sua dimensão. Em 2016, as normas da série ISO 55000 foram publicadas em português, com a seguinte designação:

- ISO 55000:2016 – Gestão de ativos – Visão geral, princípios e terminologia.
- ISO 55001:2016 – Gestão de ativos – Sistemas de gestão – Requisitos.
- ISO 55002:2016 – Gestão de ativos – Sistemas de gestão – Linhas de orientação para a aplicação da ISO 55001.

As normas da série ISO 55000 foram as primeiras a seguir o arranjo e a terminologia padronizada estabelecida no Anexo SL das Diretivas ISO/IEC Parte 1. Este documento estabelece uma base comum para todas as normas ISO de sistemas de gestão. Na norma ISO 55001, são especificados os requisitos de um sistema de gestão de ativos no contexto da organização. Contudo, a norma não estabelece o modo como o sistema deve ser concebido, visto que depende do contexto organizacional e dos ativos que se pretende gerir (BSI, 2014). Esta norma pode ser utilizada para fins de certificação e integrada

com outros sistemas de gestão ISO, nomeadamente ISO 9001, ISO 14001, ISO 45001 (Sistemas de Gestão de Saúde e Segurança Ocupacionais) e ISO 31000 (Gestão de Risco). A integração é facilitada pela aplicação do Anexo SL. Os requisitos do sistema de gestão de ativos descritos na norma ISO 55001 estão agrupados de um modo consistente com os fundamentos da gestão de ativos descritos na norma ISO 55000.

O sistema de gestão de ativos de uma organização pode ser bastante complexo e está continuamente a evoluir para se adequar ao seu contexto, aos objetivos organizacionais e ao seu portfólio em sucessiva atualização (ISO 55000:2014). De acordo com Shah *et al.* (2017), a implementação da gestão de ativos geralmente requer:

- O aumento das competências dos funcionários no âmbito da gestão de ativos;
- Consciência da importância de ter dados suficientes e de elevada qualidade, para facilitar o acesso, a interpretação e tomar decisões informadas.

Bish *et al.* (2014) salientam que a literatura não tem dado relevância à identificação de competências profissionais específicas no âmbito da gestão de ativos de engenharia. De acordo com Brous *et al.* (2018), as pessoas envolvidas nos processos de negócio precisam de adquirir novas competências que as ajudem a compreender e interpretar dados. Assim, os benefícios resultantes da adoção das mais recentes tecnologias de comunicação e informação por parte das empresas serão superiores. A gestão eficaz de dados e a sua conversão em informação é fundamental para permitir a medição do desempenho dos ativos e do sistema de gestão de ativos (ISO 55000:2014).

2.1.5. Gestão de informação

Hoje em dia, as organizações estão a explorar novas fontes de dados e a modificar os seus processos de decisão para lidar com dados obtidos em tempo real (Brous *et al.*, 2018). De um modo genérico, os dados são factos sobre objetos, sujeitos ou eventos dentro ou fora da organização (Brous *et al.*, 2014). Para apoiar a definição de decisões é necessário integrar a grande variedade de dados existentes, que geralmente se encontram dispersos (Macchi *et al.*, 2018). Estes dados podem ser estruturados ou não estruturados. O nível de dificuldade aumenta à medida que também aumentam a dimensão dos dados e o número de utilizadores que podem aceder e processar os dados (Brous *et al.*, 2017).

A informação sobre a realidade física é geralmente representada em infraestruturas de dados cujos principais elementos são: dados, pessoas, tecnologias, normas, políticas, processos e *data governance*. Estes elementos são dependentes e necessitam de ser devidamente coordenados. À medida que a

realidade se altera, as infraestruturas de dados também podem ser sujeitas a alterações (Brous *et al.*, 2014).

De acordo com o *Data Governance Institute*, *data governance* consiste num sistema de direitos de decisão e responsabilidades para processos relacionados com informação, executado de acordo com modelos consensuais que descrevem quem pode realizar ações, que ações pode realizar, que informação pode utilizar, e onde, sob que circunstâncias, utilizando que métodos. Brous *et al.* (2016) identificaram quatro elementos fundamentais associados à atividade de *data governance*, nomeadamente organização, alinhamento, conformidade e entendimento comum. Ou seja, devem ser definidos direitos de decisão e responsabilidades destinados a assegurar o alinhamento dos dados com necessidades da organização, a conformidade com políticas e procedimentos de dados e um entendimento comum dos dados.

A eficácia da função de gestão de ativos depende da utilização de uma grande variedade de dados técnicos e empresariais, provenientes de diferentes áreas da organização. Geralmente, os dados empresariais pertencem a categorias, tais como inventário, clientes, fornecedores, financeira, etc. Enquanto os dados técnicos estão diretamente relacionados com os ativos. Estes dados são habitualmente referentes à condição, desempenho, criticidade, ciclo de vida, risco, fiabilidade, etc. Depois de serem processados de forma conveniente, os dados resultam em informação que pode ser utilizada no apoio à decisão (Koronios *et al.*, 2005). No entanto, os dados só se tornam verdadeiramente informação quando lhes é atribuído um contexto e são apresentados de um modo que as pessoas os consigam compreender (Brous *et al.*, 2014). A rapidez e o sucesso das decisões dependem da existência de informação detalhada e rigorosa e de meios que a tornem imediatamente acessível (Koronios *et al.*, 2005). Por este motivo, considera-se que a informação também constitui um ativo importante (Ratnayake & Markeset, 2010).

Devido aos avanços tecnológicos mais recentes, existe um interesse cada vez maior em debater a aplicação de informação relevante no apoio à função de gestão de ativos (Macchi *et al.*, 2018). Segundo Shah *et al.* (2017), uma das principais dificuldades da implementação da gestão de ativos está relacionada com a recolha, disponibilidade e qualidade dos dados. Apesar de serem geradas grandes quantidades de dados nas empresas, a falta de visibilidade e de controlo pode motivar desconfiança e desencorajar a sua aplicação no apoio à decisão. Por outro lado, os utilizadores podem não ser capazes de traduzir a vasta quantidade de dados em informação relevante. Por isso, nas empresas, muitas decisões acabam por ser tomadas com base em juízos subjetivos. De tais decisões, podem resultar medidas estratégicas pouco eficazes, aumento de custos, perdas de receita ou, em alguns casos, motivar

falhas com consequências catastróficas (Koronios *et al.*, 2005). Assim, é fundamental que a adequação dos processos de tomada de decisão seja cuidadosamente verificada (ISO 55000:2014).

Nas normas da série ISO 8000, são fornecidas orientações sobre a qualidade dos dados e acerca da importância de associar dados e informação referente aos ativos com os objetivos organizacionais. As organizações devem avaliar a qualidade dos dados relativos aos ativos e desenvolver um plano de melhoria da qualidade que assegure que os dados em falta ou de baixa qualidade são adquiridos dentro de prazos aceitáveis (IAM, 2015). A qualidade dos dados dos ativos pode ser aferida com base nos critérios apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Critérios para aferir a qualidade dos dados dos ativos (adaptado de IAM, 2015).

Critério	Descrição
Acuidade	Os dados devem refletir de modo fidedigno a realidade física que representam.
Integralidade	Disponibilidade de um registo de dados para cada ativo e de um conjunto completo de dados em cada registo.
Consistência	Os dados são consistentes na sua definição, regras, formato e valor.
Validade	Todos os dados cumprem regras de armazenamento de dados.
Atualidade	Os dados refletem o estado atual de um ativo e cumprem padrões organizacionais referentes a prazos de atualização.
Singularidade	A duplicação de dados deve ser evitada.

Para apoiar a função de gestão de ativos e satisfazer os seus requisitos de dados, são necessários sistemas e meios tecnológicos especializados. Os sistemas de gestão podem utilizar dados introduzidos manualmente ou dados captados por sensores. O termo “sensor” é utilizado para designar um dispositivo de medição que converte um estímulo num sinal mensurável. O estímulo pode ter origem mecânica, térmica, eletromagnética, acústica, química ou outra. Enquanto o sinal medido pode ser de natureza elétrica, pneumática, hidráulica ou ótica (Shieh *et al.*, 2001). Em geral, um sensor incorpora um elemento sensorial e a interface requerida para estabelecer ligação com um sistema externo. Por exemplo, fonte de energia e porta de comunicação. Alguns sensores também dispõem de recursos de processamento de sinal (Jones *et al.*, 2018).

Quando a entrada de dados é realizada por funcionários que têm como principal responsabilidade operar e manter os ativos, existe por vezes a tendência para se desvalorizar esta tarefa. Assim, de modo a não comprometer a qualidade dos dados, é fundamental que as pessoas envolvidas nos processos tenham

consciência da importância de inserir dados corretos e completos. O rigor e a rapidez podem aumentar se estes funcionários receberem formação adequada (Lin *et al.*, 2007).

Unsworth *et al.* (2011) realizaram um estudo destinado a identificar as razões para a falta de qualidade dos dados fornecidos pelos coletores. Os principais motivos apresentados pelos participantes que integraram o grupo de análise foram os seguintes: achar que o registo de dados não faz parte do seu trabalho; considerar que é só mais burocracia; o facto de não serem muito bons a realizar aquele tipo de tarefa; ou o receio de que os dados pudessem ser utilizados contra eles. Caso os dados sejam obtidos com base em dispositivos eletrónicos, por exemplo dados relacionados com a condição dos equipamentos, também é necessário garantir que são fiáveis, assegurando uma correta calibração e verificando regularmente a integridade destes dispositivos (Lin *et al.*, 2007). Segundo Unsworth *et al.* (2011), os dados adquiridos manualmente são importantes para compreender as causas potenciais das falhas (ex.: observações registadas por um técnico de manutenção ou operador), visto que os sensores apenas podem medir dados discretos associados a sintomas pré-identificados de falha (ex.: temperatura, vibração, etc.).

Os sistemas de informação para a gestão de ativos permitem apoiar a necessidade de padronizar os processos de negócio em toda a organização, com vista a aumentar a eficiência operacional (Mcglynn & Fenhagen, 2011). De acordo com Koronios *et al.* (2007), um sistema integrado de gestão de ativos baseia-se nas seguintes áreas de competência: gestão empresarial, gestão de engenharia e gestão de informação. Em cada um destes domínios, podem ser utilizados sistemas de informação com diferentes características (Tabela 7). A relevância das mesmas áreas é salientada por Bish *et al.* (2014) no âmbito de um estudo destinado a categorizar as competências profissionais exigidas às pessoas envolvidas na gestão de ativos.

Tabela 7 – Características dos sistemas de informação utilizados em cada um dos domínios da gestão de ativos (adaptado de Koronios *et al.*, 2007).

Domínio	Descrição
Gestão empresarial	Utiliza sistemas que armazenam dados estáticos sobre os ativos físicos e não podem adquirir ou utilizar dados dinâmicos relevantes para a operação ou funcionamento dos ativos.
Gestão de engenharia	Envolve a recolha de dados dinâmicos, por vezes em tempo real, durante o ciclo de vida dos ativos e relativos à monitorização dos ativos para realizar um diagnóstico inteligente destinado a apoiar a sua manutenção e funcionamento.

Domínio	Descrição
Gestão de informação	Refere-se à recolha e manutenção de dados sobre os ativos utilizando várias aplicações de <i>software</i> e integrando-as em sistemas de gestão da informação, ao seu armazenamento em armazéns de dados e à recuperação de informação para diversos fins.

A maioria das organizações continua a depender de múltiplas soluções de *software* provenientes de diferentes fornecedores para corresponder individualmente às necessidades de departamentos, funções e ativos (Mcglynn & Fenhagen, 2011). A aplicação de tecnologias distintas, o armazenamento de dados em bases de dados separadas ou a utilização de diferentes estruturas de dados pode impedir que os sistemas pertencentes aos diferentes domínios de gestão comuniquem entre si (Koronios *et al.*, 2007). Existe assim a necessidade de assegurar a compatibilidade entre os diferentes sistemas técnicos e empresariais para permitir um melhor aproveitamento dos dados relacionados com os ativos (Lin *et al.*, 2008). Para isso, é essencial dispor de uma estrutura de integração consistente que permita que o sistema de gestão de ativos seja interoperável e interligado com as soluções de *software* de gestão corporativa (Mcglynn & Fenhagen, 2011).

Segundo Baškarada *et al.* (2018), um grande número de organizações está a adotar práticas destinadas a unificar o desenvolvimento e operação de *software*, por exemplo DevOPs. Estes autores salientam que por enquanto a eficácia destas iniciativas está a ser condicionada pela arquitetura rígida dos sistemas corporativos (ex.: *Enterprise Resource Planning, Customer Relationship Management*) que estão na base dos sistemas de informação e comunicação. O desenvolvimento de microsserviços de *software*, distribuídos e independentes, é considerado uma potencial solução para compensar a falta de agilidade evidenciada pelos sistemas corporativos monolíticos. No entanto, é fundamental que os responsáveis por cada microsserviço tenham em consideração os possíveis impactos das alterações realizadas em microsserviços dependentes. Ou seja, as alterações de interface ocorridas num microsserviço devem ser comunicadas e coordenadas com todos os microsserviços dependentes (Baškarada *et al.*, 2018).

Apesar dos recentes avanços tecnológicos terem permitido o desenvolvimento da IoT no domínio da gestão de ativos, a sua utilização por parte das empresas continua a ser reduzida (Brous *et al.*, 2017, 2018). A IoT permite gerar dados que podem ser utilizados para tomar decisões ao nível estratégico, tático e operacional. Os dados resultantes da IoT podem facilitar o processo de melhoria, por exemplo com base na auto-organização do planeamento de recursos (Brous *et al.*, 2017). Segundo Brous *et al.* (2018), a adoção da IoT permite a realização de uma análise preditiva mais eficaz e detalhada, aumentando a confiança no processo de gestão de ativos e dotando a tomada de decisão baseada no

risco de uma maior previsibilidade. No entanto, estes autores consideram que a implementação da IoT requer um esforço por parte das empresas no sentido de:

- Reconfigurar os processos de negócio relativos à tomada de decisão para permitir que os dados gerados sejam incluídos e para proteger a sua origem, de modo a que os decisores possam interpretar as limitações e assegurar segurança e privacidade;
- Alterar a sua cultura para que a IoT envolva toda a organização, em vez de ficar limitada apenas a alguns departamentos;
- Proporcionar tecnologias de informação que suportem as novas fontes de dados;
- Garantir uma boa compreensão dos dados recolhidos e dos seus aspetos de qualidade;
- Realizar uma gestão adequada dos dados para assegurar conformidade com leis e regulamentos;
- Executar uma *data governance* consistente, destinada a assegurar que são gerados dados confiáveis para a tomada de decisão.

2.1.6. Análise crítica da literatura

A literatura relacionada com a gestão de ativos evoluiu de uma forma particularmente notória nas últimas duas décadas, devido ao interesse crescente de profissionais da indústria, membros de associações empresariais e académicos. Esta circunstância refletiu-se na diversificação dos conteúdos abordados e no aumento substancial do número de publicações, tais como artigos científicos, livros, normas e guias interpretativos.

No que diz respeito aos ativos físicos, os principais temas contemplados na literatura são a gestão do ciclo de vida dos ativos e os sistemas de gestão de ativos. A gestão do ciclo de vida envolve essencialmente questões técnicas, financeiras e logísticas. Este tema é abordado sobretudo em livros e artigos científicos. O aumento da diversidade e da complexidade dos portfólios de ativos das empresas contribuiu para o desenvolvimento de sistemas holísticos de gestão de ativos. O foco destes sistemas incide na ligação entre a estratégia organizacional e as atividades de gestão de ativos empreendidas durante diferentes etapas do ciclo de vida. Atualmente, a principal referência neste âmbito são as normas da série ISO 55000. Porém, na literatura recente, também são propostos alguns modelos genéricos de gestão de ativos (El-akruti & Dwight, 2013; IAM, 2015; Komljenovic *et al.*, 2016; Vanier, 2000; Wijnia & Croon, 2014) (Apêndice I). As normas e os modelos existentes proporcionam uma abordagem sistemática e abrangente para a gestão de ativos. Contudo, o seu processo de implementação requer tempo e encargos significativos. Por isso, a sua aplicação poderá não ser acessível para todas as empresas.

A necessidade de reduzir riscos e identificar oportunidades durante o ciclo de vida dos ativos, contribuiu para integração de técnicas de análise de risco no processo de gestão de ativos. Assim, este tema passou a assumir uma grande relevância na literatura especializada. Mais recentemente, a gestão da informação relativa aos ativos também tem sido alvo de análise, por parte de diversos autores. A capacidade de obter dados credíveis, em particular sobre a condição dos ativos, para extrair informação para apoiar a tomada de decisão é considerada essencial no domínio da gestão de ativos físicos.

Devido à grande rotatividade dos intervenientes nas atividades de gestão de ativos, os seus resultados dependem em grande medida da cultura organizacional, do empenho da gestão de topo, das competências do pessoal, da comunicação e resposta, e das ações de formação (Koronios *et al.*, 2005; Lin *et al.*, 2008). No entanto, verificou-se que a cultura organizacional ainda é um tema pouco abordado no âmbito da gestão de ativos.

2.2. Gestão da manutenção

O aumento das exigências dos clientes e a elevada pressão competitiva colocam desafios crescentes às empresas industriais (Schreiber *et al.*, 2018). Devido à necessidade de redução dos inventários, os prazos de entrega passaram a ser significativamente mais curtos. Por isso, qualquer interrupção nos fluxos produtivos torna-se bastante onerosa e crítica (Durán, 2011). As avarias, a perda de velocidade e o desempenho errático dos equipamentos em ambientes exigentes podem impedir o fornecimento atempado de produtos e serviços (Harte, 2013), e resultar em perdas de qualidade.

Ao longo dos anos, o nível de automação e o capital imobilizado em equipamentos tem vindo a aumentar consideravelmente, sobretudo nas empresas industriais. O investimento em equipamentos permite reduzir os custos relacionados com a mão de obra e reforçar a capacidade produtiva. Por isso, o desempenho e a competitividade destas empresas dependem cada vez mais da fiabilidade, disponibilidade e produtividade dos seus equipamentos (Muchiri *et al.*, 2011). A falha de um equipamento crítico pode resultar em graves consequências de segurança, ambientais e financeiras (Hodkiewicz & Ho, 2016).

A rapidez das inovações tecnológicas tem contribuído para um aumento progressivo da complexidade dos sistemas industriais. Estes são geralmente constituídos por uma grande variedade de equipamentos que funcionam de modo interdependente. Além disso, cada equipamento pode ser formado por inúmeros componentes com diferentes características físicas e técnicas. Independentemente da sua natureza e grau de utilização, qualquer dispositivo físico sofre o efeito de um ou mais processos naturais, tais como

desgaste, corrosão, oxidação, etc. A ausência de intervenções apropriadas e atempadas aumenta substancialmente o risco de avaria (Almeida *et al.*, 2015; Fedele, 2011). No entanto, a degradação do estado do equipamento é, em grande medida, influenciada pelo uso e pelas condições de operação (ex.: ambiente, intensidade, carga) (Márquez, 2007). Assim, a capacidade de preservar e reparar eficazmente de potenciais danos, os equipamentos e as instalações onde estes operam, é crucial para o cumprimento dos objetivos organizacionais.

As atividades destinadas a manter o bom funcionamento dos sistemas industriais requerem organização e planeamento, com vista a alcançar níveis elevados de disponibilidade operacional ao custo mais baixo possível, evitando a utilização indevida de recursos humanos e materiais (Almeida *et al.*, 2015). Contudo, para que estas atividades sejam bem-sucedidas, também é fundamental garantir que os vários intervenientes dispõem de competências, experiência, meios e condições de trabalho apropriadas.

2.2.1. Definição e objetivos da função manutenção

Na norma EN 13306:2017 (*Maintenance – Maintenance terminology*), o termo manutenção é definido como a combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão durante o ciclo de vida de um item, destinadas a conservar ou a restaurar o estado em que este pode realizar a função requerida. Neste contexto, o termo item representa uma peça, componente, dispositivo, subsistema, unidade funcional, equipamento ou sistema que pode ser descrito e considerado individualmente.

Ao longo dos anos, a manutenção tornou-se uma função complexa que necessita de ser flexível para fazer face ao ambiente dinâmico de negócio (Pintelon & Parodi-Herz, 2008). Niu *et al.* (2010) consideram que o sucesso da função manutenção depende sobretudo da relação custo-benefício e da precisão das ações de manutenção. Segundo Harte (2013), a excelência da manutenção está relacionada com a capacidade de balancear o desempenho do equipamento, os riscos existentes e os recursos necessários, com vista a alcançar uma solução ótima.

Apesar dos avanços tecnológicos, Galar *et al.* (2011) salientam que o fator humano é essencial para assegurar a qualidade das ações de manutenção. Os fatores humanos são as capacidades físicas e psicológicas dos indivíduos, nomeadamente a motivação, formação, educação e a experiência. Estas capacidades podem ser afetadas pelas condições de trabalho devido a fatores, tais como a temperatura, humidade, ruído, vibrações, etc. O apoio logístico e a utilização de ferramentas apropriadas também assumem uma grande importância, sobretudo quando é necessário manusear e transportar peças ou componentes de grande dimensão. Assim, é fundamental garantir que as condições trabalho e os meios

disponíveis para a realização das ações técnicas de manutenção não comprometem a concretização dos objetivos estabelecidos (Galar *et al.*, 2011).

De acordo com O'Donoghue & Prendergast (2004), a função manutenção visa maximizar o desempenho do equipamento assegurando um funcionamento regular e eficiente dos seus componentes, prevenir falhas e minimizar as perdas verificadas quando as falhas ocorrem. A prevenção de falhas ou a redução da sua frequência só é possível realizando ações preventivas. Neste caso, a precisão temporal é decisiva para prolongar a vida útil dos ativos (Al-Najjar & Alsyouf, 2003). Quando a falha não pode ser evitada, são realizadas ações corretivas com o propósito de restaurar o estado operacional do equipamento. A rapidez da ação é fundamental para assegurar que as perdas não sejam elevadas (Almeida *et al.*, 2015). As ações de manutenção também podem ser parte de um processo de melhoria contínua, destinado a redefinir situações críticas, com base na experiência adquirida. As ações de melhoria podem ter diferentes objetivos, tais como aumentar a fiabilidade, aumentar a segurança e proporcionar melhores condições de operação e manutenção do equipamento. A viabilidade destas ações deve ser avaliada realizando uma análise custo-benefício (Fedele, 2011).

A complexidade das ações técnicas de manutenção pode variar de modo bastante significativo, dependendo do estado e das características do equipamento. Estas podem destinar-se a proporcionar serviços de rotina, nomeadamente limpeza, abastecimento, lubrificação, inspeção periódica e calibração. Dada a sua simplicidade, as ações de rotina são muitas vezes realizadas pelo operador do equipamento. No entanto, existem outras ações que devido à sua complexidade e aos riscos associados requerem mão de obra especializada. Por exemplo, reparação de componentes críticos, revisões, monitorização e melhoria de desempenho do sistema, e conceção, substituição e modificação de ativos físicos (Tsang, 1998).

Em geral, pretende-se que a manutenção de um sistema produtivo contribua para assegurar um nível elevado de produtividade (Pascual & Kumar, 2016; Schreiber *et al.*, 2018), a conformidade com os requisitos do produto (Al-Turki, 2012), a segurança das pessoas, ambiente e infraestruturas (Almeida *et al.*, 2015; Fedele, 2011), o cumprimento do tempo de vida projetado, e a utilização eficaz de energia e de matérias-primas (Muchiri *et al.*, 2011).

Pascual & Kumar (2016) classificam os objetivos da função manutenção em dois tipos: eficácia da manutenção e eficiência organizacional. A eficácia da manutenção diz respeito à capacidade de identificar estratégias apropriadas para atender os requisitos estabelecidos e está relacionada com o conceito de suportabilidade. A suportabilidade consiste na capacidade da organização da manutenção para

proporcionar suporte de manutenção correto, no local necessário para realizar a atividade de manutenção prendida quando é necessário (EN 13306:2017). Enquanto a eficiência organizacional refere-se à otimização dos recursos para a concretização das estratégias de manutenção. Na indústria, o equilíbrio desejado entre eficácia e eficiência é geralmente representado pela disponibilidade elevada dos ativos produtivos e pelos baixos custos de manutenção (Pascual & Kumar, 2016).

Embora a minimização dos custos de manutenção seja um objetivo frequente das empresas, as despesas relacionadas com a melhoria de desempenho da função manutenção são cada vez mais consideradas um investimento (Horenbeek *et al.*, 2010; Schmidt & Wang, 2018). Isto deve-se à natureza transversal da função manutenção e ao reconhecimento da importância estratégica das atividades de manutenção na maioria das organizações (Fraser *et al.*, 2015; Simões *et al.*, 2011). No entanto, segundo Alsyouf (2007), é fundamental que as organizações sejam capazes de demonstrar de que modo a manutenção contribui para o seu objetivo global.

2.2.2. Evolução da função manutenção

Desde a década de 1970, a função manutenção evoluiu de uma época em que era considerada pelas empresas como um “mal necessário” para passar a estar alinhada com objetivos estratégicos e sustentáveis (Gunasekaran & Sandhu, 2010). As empresas perceberam que a excelência operacional deixou de ser suficiente para garantirem competitividade e assim os requisitos de sustentabilidade ganharam uma maior preponderância neste contexto (Jardine & Tsang, 2013). O gráfico da Figura 8 representa o modo como a gestão da manutenção e o pensamento corporativo evoluíram desde a década de 1970.

A partir da década de 1980, as empresas têm vindo a adotar sistemas de informação para apoiar a função manutenção, nomeadamente *Computerised Maintenance Management Systems* (CMMS), *Enterprise Asset Management* (EAM) e *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA). Estes sistemas permitem gerir o funcionamento dos ativos físicos e auxiliar a função manutenção ao longo de todo o ciclo de vida. Os CMMS e os EAM são geralmente utilizados para administrar dados relacionados com o histórico dos ativos, garantias, requisitos regulamentares e o estado de pedidos de manutenção (Jardine & Tsang, 2013). Enquanto os sistemas SCADA permitem implementar atividades de monitorização remota dos ativos (Thramboulidis & Christoulakis, 2016). Em unidades com ativos geograficamente dispersos, a capacidade dos CMMS ou EAM pode ser melhorada recorrendo a sistemas de informação geográfica para aceder, utilizar, exibir e gerir dados espaciais (Lin *et al.*, 2008; Lin *et al.*, 2007). Os

CMMS ou EAM podem ainda ser ligados a plataformas de *E-maintenance* para apoiar a gestão da informação relacionada com o desempenho dos ativos físicos de uma empresa (Macchi *et al.*, 2014).

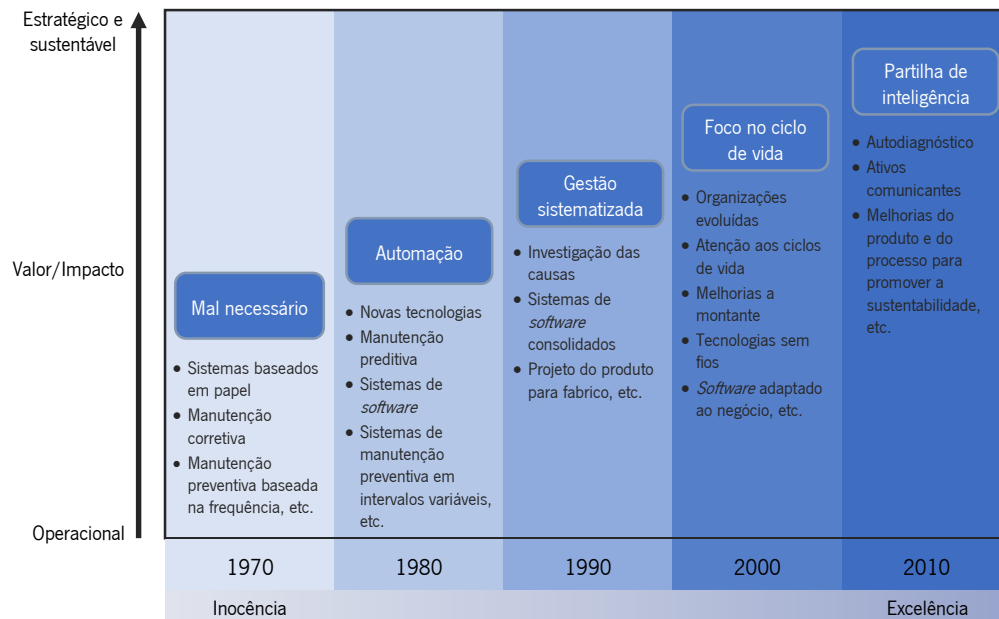


Figura 8 – Evolução da gestão da manutenção e do pensamento corporativo (adaptado de IBM, 2007 e Gunasekaran & Sandhu, 2010).

O termo *E-Maintenance* surgiu no início da década de 2000 e está associada à utilização de tecnologias de informação e comunicação na área da gestão da manutenção (Levrat *et al.*, 2008). As plataformas *E-Maintenance* resultam da articulação de diferentes componentes tecnológicos, tais como *hardware*, *firmware* ou *software*. Estas plataformas permitem integrar informação relacionada com a monitorização e a gestão de ativos, e contribuem para aumentar a pró-atividade dos processos de decisão (Macchi *et al.*, 2014). Além disso, têm capacidade de se ligar com os sistemas empresariais, facilitando o alinhamento dos processos de manutenção com os processos operacionais e de negócio (Lee *et al.*, 2014). O *Watchdog Agent™* proposto por Djurdjanovic *et al.* (2003) constitui um desenvolvimento relevante neste domínio. É apresentado como um sistema de manutenção inteligente que utiliza dados obtidos a partir de sensores, informação do histórico de comportamento do processo, conhecimento especializado e modelos de engenharia. Dispõe de módulos funcionais que aplicam algoritmos para a avaliação, diagnóstico e previsão do desempenho do equipamento ou do processo. O sistema tem uma arquitetura aberta que permite incluir novos algoritmos. Esta ferramenta visa assegurar decisões de manutenção pró-ativas, promover a reutilização de componentes e apoiar a redefinição ou a validação do equipamento com base em informação relativa ao seu ciclo de vida.

Mais recentemente, a adoção progressiva de tecnologias, tais como o autodiagnóstico e a identificação por radiofrequência, juntamente com técnicas de inteligência artificial vai possibilitar a comunicação do estado dos ativos, de avarias e de métricas de desempenho em tempo real. A identificação por radiofrequência permite que o estado de certos componentes seja verificado sem que seja necessário inspecioná-lo fisicamente (Mcglynn & Jardine, 2011). Esta tecnologia utiliza ondas de rádio para identificar automaticamente a localização de itens individuais dotados de etiquetas que contêm *microchips* incorporados (Rainer *et al.*, 2013). O autodiagnóstico e o acesso à informação em tempo real para a tomada de decisão estão relacionados com os conceitos tecnológicos IoT e *Cyber-Physical Systems* (CPS).

2.2.3. Gestão estratégica da manutenção

Hoje em dia, a função manutenção é suportada por um sistema de gestão complexo orientado para a prevenção de falhas (Fedele, 2011). O âmbito da gestão da manutenção é cada vez mais vasto. Além de abordar os aspetos técnicos do equipamento, também passou a integrar a visão holística da gestão de ativos (Ojanen, 2014). A gestão da manutenção envolve atividades ao nível estratégico, tático e operacional. Na Tabela 8, é apresentado um conjunto de atividades genéricas realizadas em cada um dos três níveis de gestão.

Tabela 8 – Atividades genéricas realizadas no nível estratégico, tático e operacional de gestão da manutenção (adaptado de Murthy *et al.*, 2002 e Kobbacy & Murthy, 2008).

Nível	Atividade	Descrição
Estratégico	Definição da estratégia da manutenção	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Seleção do prestador do serviço de manutenção: interno ou externo (serviço subcontratado); ▪ Provisão de recursos de manutenção: humanos e materiais (ex.: infraestruturas e dispositivos necessários para monitorizar e reparar o equipamento); ▪ Estabelecimento de uma cultura que favoreça uma interação próxima da manutenção com outras áreas de negócio (ex.: produção, vendas, etc.).
Tático	Planeamento e escalonamento da manutenção	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Análise de dados recolhidos; ▪ Definição de políticas de manutenção apropriadas; ▪ Gestão e alocação dos recursos de manutenção existentes; ▪ Monitorizar a implementação das ações de manutenção realizadas ao nível operacional por agentes internos e pelo fornecedor de serviços de manutenção.
Operacional	Execução das tarefas de manutenção	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Implementação das ações de manutenção por parte de agentes internos; ▪ Recolha de dados relevantes.

No nível estratégico de gestão, são definidas as prioridades e a estratégia da gestão da manutenção, em consonância com a estratégia organizacional. As prioridades da gestão da manutenção podem ser determinadas realizando uma análise de criticidade, tendo em conta elementos medidos, tais como a incidência de avarias do equipamento. O nível tático, envolve o planeamento e o escalonamento das ações de manutenção. Este nível é responsável pela correta atribuição de recursos de manutenção, nomeadamente competências, materiais, dispositivos de teste, etc. (Márquez, 2007). Para cada ação planeada, é necessário avaliar a disponibilidade dos recursos necessários e o intervalo de tempo para a sua execução (Muchiri *et al.*, 2011). No nível operacional, são executadas as ações de manutenção planeadas e não planeadas e recolhidos dados relevantes sobre as mesmas (Abdulrahman *et al.*, 2017).

A experiência adquirida em cada um dos níveis de gestão e a adoção das melhores práticas internas e externas devem ser utilizadas para melhorar o sistema de gestão da manutenção, de modo a que este se adapte rapidamente a novos objetivos (Márquez, 2007). Segundo Pintelon & Parodi-Herz (2008), a principal dificuldade no âmbito da gestão da manutenção reside no alinhamento entre os diferentes níveis de gestão, sobretudo entre o nível tático e o nível operacional.

A gestão da manutenção não deve ser abordada isoladamente, devido à relação que estabelece com outras áreas funcionais de uma empresa, tais como produção, qualidade, gestão de inventário, comercial e recursos humanos (Al-Najjar, 2007; Al-Turki, 2012). Por isso, além da integração entre os diferentes níveis hierárquicos de gestão da manutenção, também deve ser promovida a integração entre a função manutenção e outras áreas funcionais (Garg & Deshmukh, 2006; Kans & Ingwald, 2008). Segundo Ylipää *et al.* (2017), todas as funções organizacionais relevantes devem comunicar, colaborar e ser integradas na abordagem dos problemas do equipamento.

Nas empresas industriais, a coordenação entre as atividades de manutenção e de produção é particularmente relevante. O mesmo equipamento é partilhado por ambas as funções, por isso estas influenciam-se mutuamente de modo bastante significativo (Zhao *et al.*, 2014). O planeamento da produção e da manutenção devem considerar os objetivos organizacionais e ser ajustados com base em informação sobre o estado do equipamento. Enquanto a produção visa maximizar a utilização do equipamento, a manutenção procura habitualmente maximizar a disponibilidade (Al-Turki, 2012). A relação entre a produção e a manutenção é ilustrada na Figura 9.

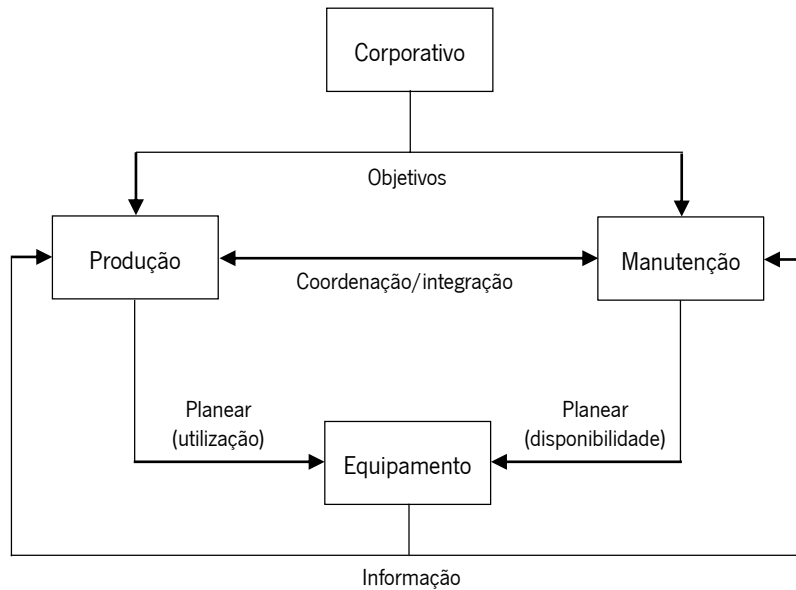


Figura 9 – Inter-relação entre manutenção e produção (adaptado de Al-Turki, 2012).

Segundo Tsang (1998), nem sempre é fácil relacionar atividades departamentais e individuais para alcançar os objetivos estratégicos, dada a natureza abstrata da estratégia organizacional. Al-Turki (2012) propõem uma estrutura para orientar as organizações no desenvolvimento de um plano estratégico de manutenção abrangente que relaciona a função manutenção com a estratégia corporativa e integra-a com outras áreas funcionais. Este processo visa assegurar a adequação entre os objetivos de manutenção e os objetivos de toda a empresa e de outras áreas funcionais. De acordo com Muchiri *et al.* (2011), o alinhamento da estratégia de manutenção com a estratégia organizacional é fundamental para o desenvolvimento de uma abordagem estruturada destinada a medir o desempenho da função manutenção. A estratégia de manutenção consiste no método de gestão utilizado para alcançar os objetivos da manutenção (EN 13306:2017).

A importância estratégica da gestão da manutenção tem vindo a ser evidenciada por diversos autores. Tsang (1998) desenvolveu um processo de gestão estratégica do desempenho da manutenção. O estudo realizado salienta a influência do desempenho da manutenção na estratégia organizacional. Murthy *et al.* (2002) apresentam uma abordagem designada de gestão estratégica da manutenção. Esta abordagem foi desenvolvida no *Reliability Engineering and Risk Management Group (RERMG)*, da Universidade de Queensland, e é caracterizada com base em dois elementos fundamentais:

1. A gestão da manutenção é crucial para a sobrevivência de uma empresa e para o seu sucesso, e deve ser gerida estrategicamente.
2. A gestão eficaz da manutenção deve ser baseada em modelos de negócio quantitativos que integrem a manutenção com outras áreas de decisão, nomeadamente a produção.

No âmbito da abordagem proposta, considera-se que a gestão da manutenção é uma área multidisciplinar que deve ser abordada a partir da perspectiva global do negócio, tendo em conta as relações entre aspetos técnicos, comerciais e operacionais (Figura 10). Os autores salientam que a gestão da manutenção deve contemplar fatores, tais como a fiabilidade inerente do equipamento, a carga de operação, requisitos comerciais e considerações de mercado, questões logísticas e tecnologias da informação. A fiabilidade inerente do equipamento depende de decisões tomadas durante a sua conceção e fabrico. Quando a fiabilidade é reduzida, as intervenções no equipamento são mais frequentes. A carga de operação é determinada por decisões da produção e causa o desgaste do equipamento. O aumento da carga de operação contribui para acentuar o desgaste e, conseqüentemente, para aumentar a necessidade de intervenções de manutenção, destinadas a restaurar o estado do equipamento ou a conservar o seu bom funcionamento. Em geral, as decisões relacionadas com a produção visam satisfazer compromissos comerciais, que são fundamentais para o desempenho global do negócio. Por isso, entende-se que as decisões de operação e de manutenção devem ser tomadas conjuntamente, considerando o impacto na degradação do equipamento e os objetivos globais da organização. Deste modo, sempre que a carga de operação seja alterada as estratégias de manutenção devem ser ajustadas convenientemente. A implementação das estratégias de manutenção envolve atividades logísticas, tais como o escalonamento da manutenção, a gestão de inventário de sobressalentes, a definição de políticas de encomenda, etc. As estratégias de manutenção podem ser de longo prazo ou de curto prazo. Quando as estratégias são de longo prazo, devem considerar as tendências sociopolíticas, demográficas e necessidades de capital. Ao passo que as estratégias de curto prazo requerem a definição de modelos quantitativos para prever o impacto de diferentes ações na degradação do equipamento. Para esse efeito, é necessário compreender os seus mecanismos de degradação e associá-los a dados relacionados com o estado do equipamento. Porém, a recolha, o armazenamento e a análise de dados para apoiar a gestão da manutenção no processo de decisão depende da utilização de tecnologias da informação adequadas (Murthy *et al.*, 2002).

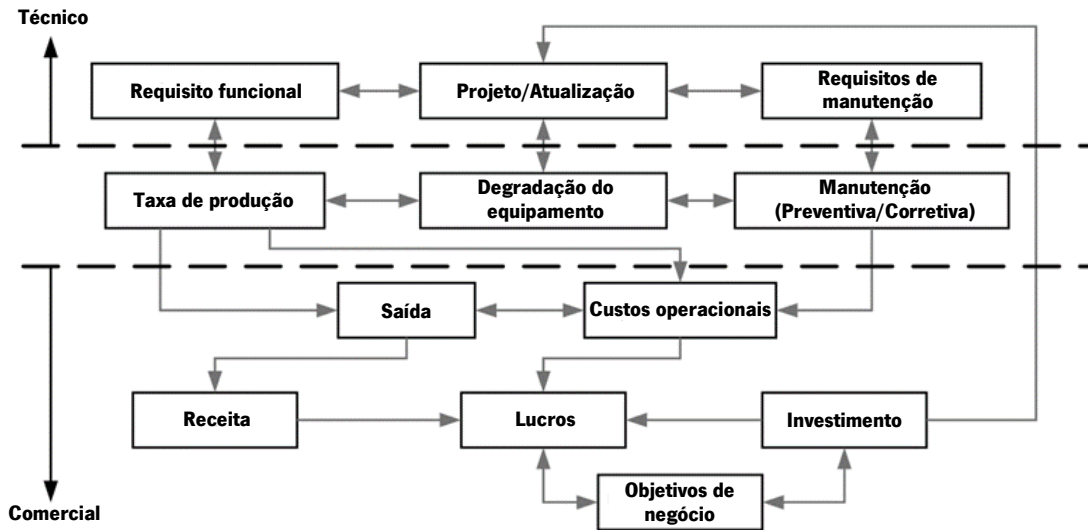


Figura 10 – Associação entre questões técnicas e comerciais (adaptado de Kobbacy & Murthy, 2008).

Tsang (2002) identificou quatro dimensões estratégicas da gestão da manutenção, nomeadamente as opções de prestação de serviço, a organização e estruturação do trabalho, a metodologia de manutenção e os sistemas de suporte. A Tabela 9 apresenta a descrição de cada uma das dimensões. As decisões relacionadas com estas dimensões devem ter em conta a estratégia global da organização.

Tabela 9 – Dimensões estratégicas da gestão da manutenção (adaptado de Tsang, 2002).

Dimensão	Descrição
Opções de prestação de serviço	Envolve a decisão entre a provisão do serviço de manutenção internamente e a sua subcontratação. A tomada de decisão pode contemplar critérios, tais como o preço, a capacidade de resposta, a qualidade do serviço, etc. Contudo, a subcontratação de atividades relacionadas com competências fundamentais da organização deve ser evitada, de modo a limitar a exposição da empresa a fatores externos. Quando se opta pela subcontratação, deve definir-se a relação a estabelecer com o fornecedor do serviço e o modo como os riscos associados irão ser geridos.
Organização e estruturação do trabalho	Relaciona-se com a organização da função manutenção e com o modo como as ações de manutenção são estruturadas. Geralmente, as decisões são tomadas tendo em conta o volume de trabalho, a localização da instalação, o custo de disponibilidade, competências e conhecimento exigido, a política de produção e a política de recursos humanos.
Metodologia de manutenção	Refere-se à necessidade de estabelecer políticas destinadas a executar os trabalhos de manutenção, de acordo com as características individuais do item do equipamento que se pretende manter.
Sistemas de suporte	Visam apoiar as diferentes iniciativas estratégicas relacionadas com a gestão da manutenção. Os principais exemplos são: sistemas de informação, formação, gestão de desempenho e sistema de recompensas.

2.2.4. O conceito de falha

Ao longo do tempo, os itens de um equipamento estão sujeitos à alteração adversa da sua condição. Este processo é habitualmente designado utilizando os termos degradação ou desgaste. O ritmo de degradação é influenciado pelo uso ou por causas externas. A ação da degradação origina a perda ou a deformação do material e pode resultar da interação entre múltiplos fatores, por exemplo a ação combinada da tensão e da corrosão (Jiang, 2015). Os danos gerados começam muitas vezes por causar a diminuição do desempenho do equipamento e, quando é atingido um nível crítico, ocorre uma falha funcional.

O termo falha pode designar um evento ou o estado que se verifica após o evento. Quando se refere ao evento, a falha consiste na cessação da capacidade de um item para realizar a função requerida. Se representar um estado, a falha é o estado caracterizado pela incapacidade de um item para desempenhar a função requerida, excluindo a incapacidade durante a manutenção preventiva ou outras ações planeadas, ou devido à falta de recursos externos. A falha pode ser parcial, se o item em questão mantiver a capacidade de realizar parcialmente a sua função, ou total, quando a capacidade para realizar a função é completamente perdida (EN 13306:2017).

O termo “avaria” é frequentemente utilizado como sinónimo do termo “falha”. Contudo, “avaria” apresenta um sentido mais amplo. É geralmente dirigido ao equipamento como um todo, quando este é reparável. Enquanto o termo “falha” se aplica em sentido restrito, por exemplo sempre que se faz referência a um componente específico do equipamento (Cabrita & Cardoso, 2015). Quando o estado de um item pode ser restaurado de maneira a poder desempenhar novamente a sua função, considera-se que se trata de um item reparável. Nos casos em que a restauração do estado é inviável, o item tem de ser substituído depois de falhar e diz-se que é não reparável.

Em sistemas constituídos por diversos componentes (sistemas complexos), a falha pode resultar de uma falha que já existe. Se a falha de um item for causada diretamente ou indiretamente pela falha de outro item designa-se falha secundária. Todas as outras são consideradas falhas primárias. Nos sistemas complexos, a deteção de falhas parciais ou falhas ocultas (ex.: falhas de itens redundantes) pode ser difícil (Birolini, 2014). Uma falha oculta caracteriza-se pelo facto de não poder ser detetada durante a operação normal do equipamento (EN 13306:2017). Porém, os seus efeitos podem propagar-se a outros itens do sistema e contribuir para a ocorrência de outras falhas.

Na maioria dos casos, sobretudo em sistemas mecânicos hidráulicos, pneumáticos e acionados por um sistema elétrico a falha é o culminar de um processo de degradação progressiva (Fedele, 2011). Assim,

a probabilidade de ocorrência de falha aumenta com o tempo de operação ou com o número de operações e com a tensão associada (EN 13306:2017). A falha verifica-se quando o dano acumulado atinge o limite de resistência do item (Figura 11a) (Jiang, 2015). Estas falhas são muitas vezes designadas de graduais. A deteção de uma falha gradual em desenvolvimento (falha potencial) pode ser realizada por observação, análise ou utilizando um dispositivo de teste (Benbow & Broome, 2009). O ruído, a temperatura, a resistência e a vibração, são alguns exemplos de parâmetros que podem ser monitorizados para avaliar o estado do equipamento. No entanto, as falhas também podem resultar de um mecanismo de sobrecarga (ex.: tensões mecânicas, elétricas e de calor). Neste caso, o item falha quando é submetido a uma tensão que excede a sua resistência (Figura 11b) (Jiang, 2015). Estas falhas acontecem repentinamente e, por isso, designam-se falhas súbitas. A falha súbita é uma falha que não pode ser antecipada por examinação prévia ou monitorização (EN 13306:2017). Se as consequências destas falhas não forem aceitáveis (falha catastrófica) e/ou se o risco de falha for elevado, o projeto do equipamento deve ser reformulado, para melhorar as características de fiabilidade e de segurança.

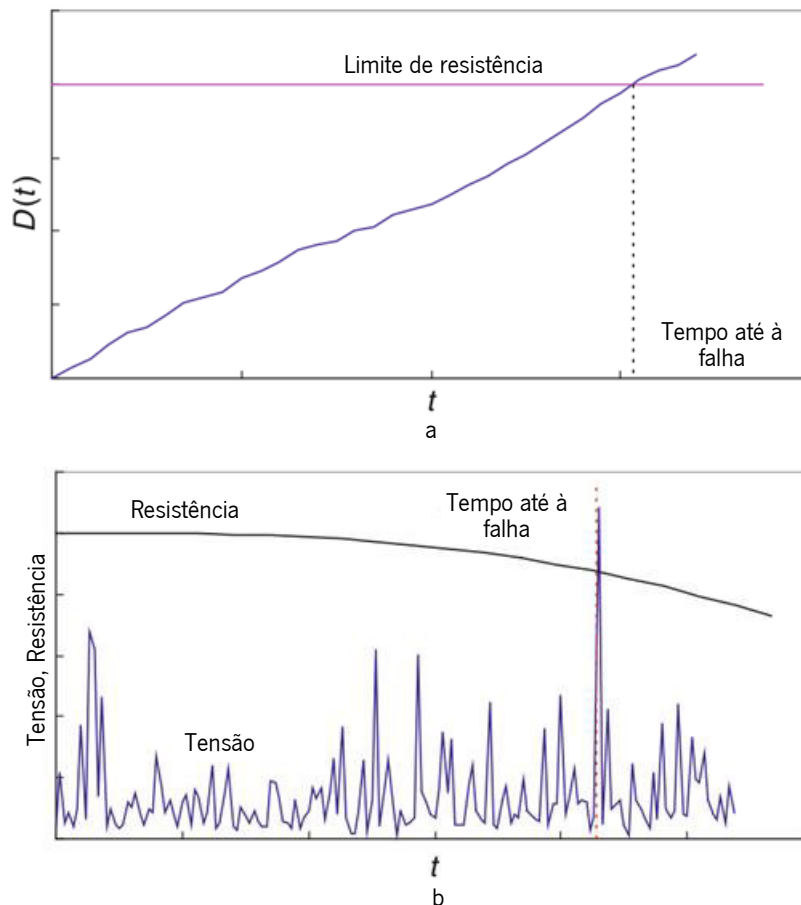


Figura 11 – Mecanismo de desgaste (a) e mecanismo de sobrecarga (b) (adaptado de Jiang, 2015).

De acordo com Sharma (2006), as falhas súbitas podem ser classificadas em três tipos: progressivas, retrogressivas e aleatórias. Os tipos de falha identificados correspondem a uma probabilidade de ocorrência crescente, decrescente e constante, respectivamente.

Para além da frequência com que ocorrem, as falhas devem ser classificadas de acordo com o modo, a causa, o efeito e o mecanismo (Biolini, 2014). Estes conceitos são descritos na Tabela 10.

Tabela 10 – Conceitos utilizados na classificação das falhas.

Conceito	Descrição
Modo de falha	É o modo como a incapacidade de um item para realizar a função requerida se manifesta. Também pode ser definido pela perda de função ou pela transição de estado que ocorreu (EN 13306:2017). Identifica cada condição específica relacionada com um item que causa a perda de função do sistema (Almeida <i>et al.</i> , 2015).
Causa da falha	Circunstâncias verificadas durante a especificação, conceção, produção, instalação, utilização ou manutenção que resultam em falha (EN 13306:2017).
Efeito da falha	É a consequência de uma falha. Pode ser diferente se for analisado ao nível do item ou num nível mais elevado do equipamento (Biolini, 2014).
Mecanismo de falha	Processos físicos, químicos ou outros que podem induzir ou induziram a falha (EN 13306:2017). O mesmo mecanismo de falha pode ter um ou mais modos de falha associados (Wessels & Sautter, 2009).

Os sistemas reparáveis podem falhar de modos muito diferentes, dependendo da condição dos seus componentes e dos modos de falha correspondentes (Smith & Mobley, 2007). O rompimento, a quebra ou a fadiga, são exemplos de modos de falha que podem ser observados num determinado item. Estes sinais revelam um efeito local (Biolini, 2014).

As causas das falhas, sobretudo as mais críticas, devem ser investigadas e devem ser mantidos registos das causas e da ação correspondente. Esta informação poderá posteriormente apoiar a resolução de problemas de natureza similar (Márquez, 2007). Os dados de falha são essenciais para o rastreamento das causas. Segundo Pascual & Kumar (2016), os dados de falha podem ser qualitativos ou quantitativos. Os dados qualitativos são referentes à análise de falhas, enquanto os dados quantitativos referem-se a dados do histórico sobre a operação e tempo de intervenção.

As falhas podem ser motivadas por uma causa ou por uma combinação de causas intrínsecas e extrínsecas. As causas intrínsecas são respeitantes a fragilidades do item e/ou ao desgaste acumulado. Ao passo que as causas extrínsecas estão geralmente relacionadas com negligência durante a conceção, fabrico ou utilização do equipamento. Estas resultam muitas vezes em falhas sistemáticas, que têm uma

natureza determinística e devem ser consideradas defeitos (Birolini, 2014). Segundo Pascual & Kumar (2016), a maioria das falhas devem-se a fatores humanos (ex.: erros dos operadores), utilização inapropriada do equipamento (ex.: violação dos limites de projeto), interações com o ambiente, problemas com *software*, controle de qualidade deficiente no processo de fabrico, instalação incorreta e manutenção inadequada. O conhecimento da causa fundamental permite planejar a ação de manutenção mais apropriada (Li, Wang, & Wang, 2019).

As consequências das falhas podem ser classificadas em três categorias: consequências de segurança e/ou ambiente, consequências operacionais e consequências não operacionais. As consequências operacionais e não operacionais também são designadas de consequências económicas (Jiang, 2015). Estas podem incluir, por exemplo, a perda de produtividade e o incumprimento de prazos de entrega. Outras consequências, tais como a perda de vidas humanas e a poluição são intangíveis (Almeida *et al.*, 2015).

Mais de 80% das falhas de um equipamento são eventos aleatórios (Smith & Mobley, 2007). Por este motivo, a sua ocorrência é representada por processos estocásticos. Os fenómenos descritos por processos estocásticos não podem ser previstos com exatidão, no entanto é possível determinar a probabilidade de ocorrerem num dado momento para um item específico com base na distribuição estatística dos seus tempos de falha. Para os itens não reparáveis, a expressão “tempos de falha” representa o tempo decorrido desde o início da sua vida útil até ao momento em que a falha se verifica. No caso dos itens reparáveis, a mesma expressão é utilizada para designar os intervalos de tempo entre falhas.

A distribuição estatística dos tempos de falha de um item reparável pode ser determinada com base num conjunto de dados do seu histórico de avarias. No entanto, é necessário ter em conta que os tempos entre falhas de um equipamento não seguem sempre a mesma distribuição de probabilidade. Esta situação verifica-se se existir tendência na ocorrência de avarias, que poderá resultar de melhorias realizadas no equipamento ou de degradação relacionada com o seu elevado tempo de vida (obsolescência). Para os itens não reparáveis, a distribuição é obtida considerando os tempos de falha de itens idênticos (Jiang, 2015). O conhecimento da distribuição estatística dos tempos de falha serve de apoio à definição de políticas de manutenção, considerando a tendência manifestada pelo seu padrão de falha ao longo do tempo.

2.2.5. Função de risco

O padrão de falha de um componente individual é habitualmente obtido representando a sua função de risco em função do tempo, $h(t)$. A função de risco também é designada de taxa instantânea de falhas ou probabilidade condicional de falha e pode ser definida tendo em conta o conceito de taxa média de falhas. A taxa média de falhas entre o instante t e $t + \Delta t$ consiste no quociente entre a probabilidade de a falha ocorrer nesse intervalo, caso a falha não aconteça antes do instante t , e a amplitude do intervalo. Deste modo, a taxa instantânea de falhas corresponde ao limite da taxa média de falhas quando o intervalo de tempo Δt tende para zero (Pascual & Kumar, 2016), tal como mostra a expressão:

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t \cdot [1 - F(t)]} = \frac{1}{1 - F(t)} \left[\frac{dF(t)}{dt} \right] \quad (2.1)$$

Simplificando a equação anterior obtém-se:

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (2.2)$$

Em que $f(t)$ é a função densidade de probabilidade, e $F(t)$ é a função distribuição de probabilidade e representa a probabilidade de falha até ao instante t .

O conceito de taxa instantânea de falhas aplica-se sobretudo a itens não reparáveis. Para sistemas reparáveis, o padrão de falha é obtido com base na taxa de ocorrência de falhas, $\lambda(t)$, do inglês *Rate of Occurrence of Failures* (ROCOF), que corresponde à taxa incondicional de falhas do sistema no instante t (Rausand, 2014). Estes sistemas são geralmente constituídos por diversos componentes e têm uma natureza complexa. No entanto, a falha de um componente nem sempre resulta na falha funcional do sistema e as falhas dos componentes são frequentemente dependentes. Assim, a taxa de ocorrência de falhas pode ser estimada somando somente as taxas instantâneas de falha dos componentes mais críticos do sistema num dado instante (Alsyouf & Shamsuzzaman, 2016).

O padrão de falha de um item reparável genérico é frequentemente ilustrado recorrendo à “curva da banheira” (Figura 12). Esta designação deve-se ao formato característico da curva, que se assemelha ao perfil de uma banheira. Em geral, o padrão de falha manifestado por um item corresponde ao efeito agregado de diferentes categorias de falhas, nomeadamente falhas de qualidade, falhas causadas por tensão e falhas causadas por desgaste (Nowlan & Heap, 2013).

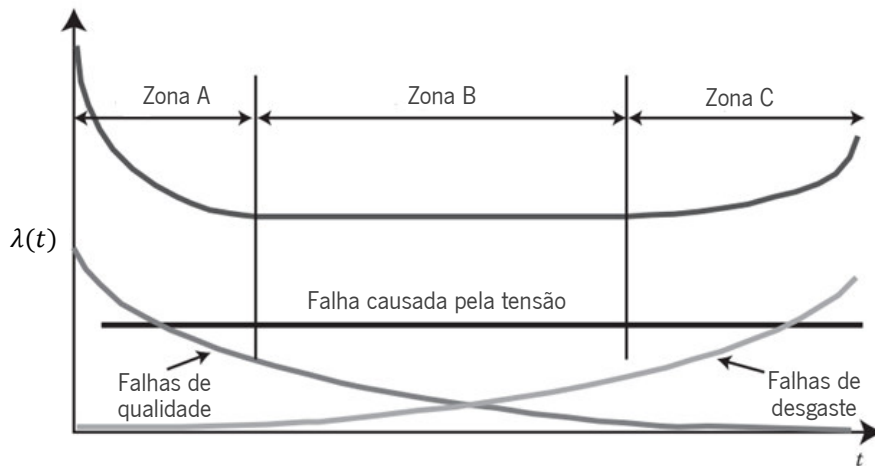


Figura 12 – Curva da banheira (adaptado de Nowlan & Heap, 2013).

A “curva da banheira” é caracterizada por três zonas distintas, representadas na Figura 12 pelas letras A, B e C. As zonas A e C correspondem respetivamente ao início e ao fim da vida útil de um item, enquanto a zona B é referente ao período intermédio. Na zona A, a taxa de falhas é elevada e apresenta uma tendência decrescente. As falhas ocorridas são maioritariamente falhas de qualidade. Estas falhas devem-se sobretudo a defeitos de conceção, fabrico e montagem, e diminuem à medida que os defeitos vão sendo removidos (Jiang, 2015). No entanto, algumas das falhas ocorridas neste intervalo também poderão estar relacionadas com erros humanos na instalação e operação de um item, nomeadamente devido a falta de experiência (Todinov, 2005). Na zona B, a taxa de falhas é aproximadamente constante e significativamente mais baixa. Este padrão de falhas resulta principalmente de eventos aleatórios, tais como tensões súbitas e condições extremas. Finalmente, a zona C é caracterizada por uma taxa de falhas crescente devido ao desgaste acumulado ao longo do tempo (Nowlan & Heap, 2013).

Na Figura 13, são apresentados os seis padrões de falha mais frequentes e as respetivas percentagens de ocorrência, de acordo com um estudo realizado no domínio da aviação civil pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (Nowlan & Heap, 1978). Segundo Moubrey (1997), a identificação destes seis padrões marca o início da terceira geração da evolução da função manutenção. Durante a primeira geração (1940-1950), que coincidiu com o período da Segunda Guerra Mundial, existia uma convicção comum de que o risco de falha do equipamento aumentava com a idade. Por isso, o padrão “desgaste” era o padrão dominante. Na época, era comum intervencionar o equipamento somente quando avariava. O subsequente aumento da mecanização industrial e a diversificação das características dos equipamentos motivou uma evolução desta perspetiva. Por conseguinte, o padrão de falha dominante também passou a contemplar um risco de falha elevado na fase inicial de utilização de um item (mortalidade infantil). Assim, durante a segunda geração (1950-1980), o formato “curva da banheira”

foi amplamente utilizado para representar o risco de falha de um item em função do tempo. Neste período, as ações de manutenção destinadas a prevenir a ocorrência da falha de itens específicos do equipamento tornaram-se uma prática comum. Estas ações visavam sobretudo assegurar maior disponibilidade, tempos de vida do equipamento mais longos e custos mais reduzidos (Moubray,1997).

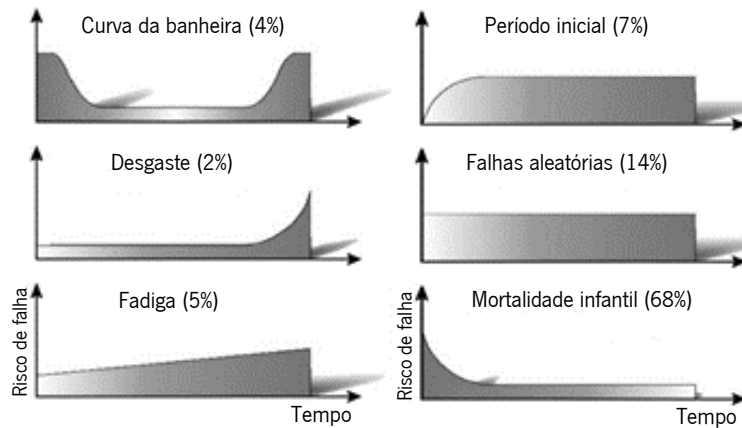


Figura 13 – Os seis padrões de falha (adaptado de Hashemian, 2010).

Hoje em dia, o padrão “desgaste” é o menos frequente devido à complexidade dos equipamentos modernos. Este padrão verifica-se principalmente em itens que têm contacto direto com o produto. O formato “curva da banheira” é geralmente observado no padrão de falha de sistemas mecânicos, onde são frequentes as falhas resultantes do desgaste acumulado dos seus componentes (Fedele, 2011). No padrão “fadiga”, verifica-se um aumento gradual do risco de falha. Por isso, neste caso, não é possível identificar uma zona em que o desgaste é mais acentuado. O padrão “período inicial” evidencia um risco de falha reduzido quando um item é novo ou caso tenha sido sujeito a uma ação de renovação. Posteriormente, verifica-se um aumento do risco de falha até ser alcançado um nível relativamente constante. Nos padrões “falhas aleatórias” e “mortalidade infantil”, o risco de falha não aumenta com a idade. Sendo assim, a substituição preventiva dos itens representados por estes padrões não contribui para reduzir o risco de falha.

Em sistemas complexos, a distribuição do tempo entre falhas geralmente aproxima-se de uma distribuição exponencial, apesar de alguns dos seus componentes apresentarem falhas causadas por desgaste. Por isso, a inspeção destes componentes com vista a identificar falhas potenciais pode ser decisiva para evitar a falha de todo o sistema. Deste modo, será possível reduzir a taxa de falhas do sistema (Eliot, 2013).

Antes de efetuar a substituição preventiva de um item deve verificar-se se o seu padrão de falha é crescente, visto que só neste caso é possível reduzir o risco de falha. Além disso, o custo total de

substituição deve ser maior depois da falha do que antes (Gold, 2013). Se a distribuição dos tempos de falha for uma distribuição de *Weibull*, pode-se identificar o comportamento da função de risco através do parâmetro de forma. Esta distribuição foi desenvolvida em 1951 por *Waloddi Weibull* e é uma das distribuições mais usadas em estudos de fiabilidade (Dhillon, 2007). Além disso, também pode ser utilizada para modelar tempos de reparação (Benbow & Broome, 2009), classificar falhas, escalonar manutenção preventiva e atividades de inspeção (Verma *et al.*, 2016). A distribuição de *Weibull* inclui um parâmetro de forma (β), um parâmetro de localização (γ) e um parâmetro de escala (η). A taxa instantânea de falhas para a distribuição de *Weibull* é dada pela seguinte equação:

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (2.3)$$

Em que t representa a variável tempo. Quando $t \leq \gamma$, então $h(t) = 0$.

Caso $\gamma > 0$, considera-se que existe um período ($t = \gamma$) isento de falhas e, se $\gamma < 0$, assume-se que o equipamento já tinha idade quando o teste foi iniciado. Porém, nos casos em que é abordada a substituição preventiva de componentes, em geral, considera-se que $\gamma = 0$ (Barringer, 2013). Sendo assim, a probabilidade de falha pode ser determinada a partir do instante $t = 0$. Os parâmetros β e η são sempre positivos e permitem que se ajuste a uma grande variedade de distribuições estatísticas. A relação entre o valor assumido pelo parâmetro β e o comportamento associado à função de risco é a seguinte:

- $\beta < 1$, a função de risco é decrescente;
- $\beta = 1$, a função de risco é constante;
- $\beta > 1$, a função de risco é crescente.

A distribuição de *Weibull* aproxima-se de uma distribuição normal, quando $\beta \approx 3,44$. Na Figura 14, são apresentadas as funções densidade de probabilidade e a taxa instantânea de falhas para diferentes valores de β , assumindo que $\gamma = 0$ e η é constante.

Por outro lado, se os valores de β e γ permanecerem constantes, a modificação do parâmetro η resulta numa alteração proporcional da dispersão da distribuição de *Weibull*.

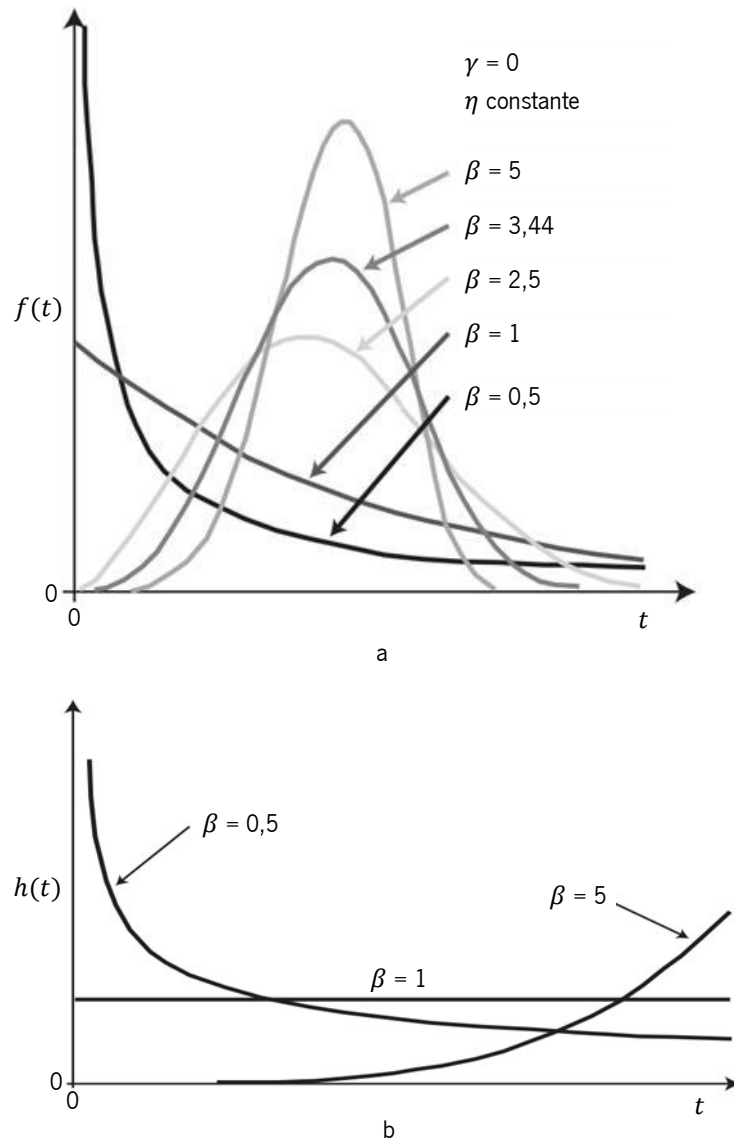


Figura 14 – Função densidade de probabilidade (a) e função taxa instantânea de falhas (b) da distribuição de *Weibull* (adaptado de Barringer, 2013).

2.2.6. Medição do desempenho operacional da função manutenção

O aumento da complexidade dos equipamentos e sistemas industriais, e o crescente impacto das perdas motivadas pelas falhas contribuíram para acentuar a importância das características associadas aos conceitos de fiabilidade, manutibilidade, disponibilidade e segurança (Birolini, 2014). Estes conceitos são frequentemente considerados de modo integrado para definir especificações técnicas durante a conceção do equipamento, e otimizar e medir o desempenho operacional da função manutenção ao longo do ciclo de vida de um ativo. A abordagem conjunta da fiabilidade, disponibilidade, manutibilidade e segurança é representada pela sigla RAMS, do inglês *Reliability, Availability, Maintainability & Safety*.

Pascual & Kumar (2016) apresentam um modelo geral para a realização de uma análise RAMS. Segundo estes autores, a análise RAMS permite avaliar a criticidade do equipamento e envolve:

- A determinação da probabilidade de diversos processos de deterioração que podem afetar o equipamento, subsistemas e sistemas, de modo a prever paragens ou falhas;
- A identificação de ações que irão diminuir a sua ocorrência e verificar as implicações económicas;
- O estabelecimento de comparações com as melhores práticas, com vista a definir estratégias ótimas de manutenção.

De acordo com Martinetti, Braaksma, & van Dongen (2017), a ponderação dos elementos individuais do equipamento durante a sua conceção é cada vez mais baseada numa avaliação de valor associado. Por isso, fatores, tais como a suportabilidade, a saúde (dos operadores e dos técnicos de manutenção), o ambiente, a economia e a política, também passaram a ser contemplados na conceção do equipamento, dando origem a uma análise mais abrangente, designada de RAMSSHEEP (*Reliability, Availability, Maintainability, Safety, Supportability, Health, Environment, Economics & Politics*). Outra variante da análise RAMS inclui o conceito *Inspectability* (RAMS+I), devido à importância assumida pelas atividades de inspeção de ativos físicos, nomeadamente no setor da energia (Tiusanen *et al.*, 2011).

Os conceitos RAMS são abordados conjuntamente nas normas internacionais EN 50126: *Railway Applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)* e EN 60300-1: *Dependability management – Guidance for management and application*. O termo confiabilidade também é utilizado com frequência neste domínio. A confiabilidade consiste na aptidão de um item para funcionar quando é requerido. Trata-se de um conceito geral que representa as características de qualidade relacionadas com o tempo (EN 13306:2017).

2.2.6.1. Fiabilidade

A fiabilidade é a capacidade de um item para desempenhar uma função requerida sob condições específicas durante um determinado intervalo de tempo, assumindo que no início do intervalo o mesmo se encontra a funcionar conforme pretendido (EN 13306:2017). A medição da fiabilidade pode ser efetuada com base em observações experimentais. Por exemplo, considerando que n itens estatisticamente idênticos e independentes são colocados em funcionamento no instante $t = 0$ para desempenhar uma dada missão e que $\nu \leq n$ a cumprem com sucesso, então a razão ν/n é uma variável aleatória que converge para o valor real da fiabilidade, se n for crescente (Birolini, 2014).

O estado de falha verifica-se quando o item em questão perde a capacidade de funcionar dentro de limites de desempenho estabelecidos no projeto. Por isso, para que um item seja considerado fiável, a margem de segurança que lhe permite funcionar dentro destes limites deve ser elevada para todas as variáveis de desempenho ou funções identificadas. A maximização das margens de segurança assume uma importância ainda maior quando as falhas apresentam consequências graves. Assim, de forma a evitar as consequências da falha, por vezes, são utilizados itens redundantes (Stapelberg, 2009). Os itens redundantes podem funcionar ativamente em paralelo com uma probabilidade de falha independente (sistemas em paralelo), ou ser colocados em funcionamento no momento em que ocorre a falha dos itens originais (sistemas em *standby*). No segundo caso, a falha do sistema verifica-se se o item redundante não estiver disponível quando a sua utilização é requerida (Barlow & Proschan, 1996). Verifica-se assim que cada item apresenta uma fiabilidade inerente ou intrínseca que resulta das suas características de projeto e do grau de conformidade com as especificações técnicas alcançado no seu fabrico. No entanto, durante a sua vida útil a fiabilidade também irá depender das condições de funcionamento. Se as condições ambientais forem adversas ou caso não sejam realizadas as ações de manutenção necessárias, a probabilidade de falha poderá aumentar significativamente.

A análise da fiabilidade tem como finalidade investigar os diferentes modos de falha e as causas que contribuem para a falta de fiabilidade (análise qualitativa), e avaliar a fiabilidade com base em modelos matemáticos considerando dados de falha (análise quantitativa) (Murthy *et al.*, 2002). Para esse efeito, é essencial dispor de registos dos tempos de operação do equipamento, do momento em que as falhas ocorrem e das causas das falhas ocorridas (Márquez, 2007).

Em termos quantitativos, a fiabilidade representa a probabilidade de um item não falhar durante um intervalo de tempo específico. Assim, tendo em conta que os dados de falha seguem geralmente uma distribuição de probabilidade, a fiabilidade de um item num dado instante pode ser calculada com base numa expressão matemática. De um modo genérico, a função fiabilidade, $R(t)$, pode ser representada pela seguinte equação:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt = 1 - F(t) \quad (2.4)$$

Em que t representa a variável tempo, $f(t)$ é a função densidade de probabilidade, e $F(t)$ é a função distribuição de probabilidade.

Para os sistemas reparáveis, a taxa de ocorrência de falhas, $\lambda(t)$, é dada pela seguinte expressão matemática:

$$\lambda(t) = \frac{dE[N(t)]}{dt} \quad (2.5)$$

Em que $N(t)$ é o número de falhas ocorridas até ao instante t .

Se a taxa de ocorrência de falhas do sistema for variável (processo não homogêneo de *Poisson*), a expressão geral da fiabilidade é a seguinte:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (2.6)$$

O desempenho em termos de fiabilidade pode ser quantificado com base em indicadores, tais como *Mean Time Between Failures* (MTBF), *Mean Time to Failure* (MTTF) e *Mean Time Between Maintenance* (MTBM) (Pascual & Kumar, 2016). Estes indicadores são descritos na Tabela 11. O MTBF e o MTBM aplicam-se a itens reparáveis, enquanto o MTTF refere-se a itens não reparáveis.

Tabela 11 – Descrição e expressão de cálculo dos indicadores MTBF, MTTF e MTBM.

Indicador	Descrição	Expressão matemática
MTBF	Tempo médio entre falhas.	$\frac{\text{Soma dos tempos de operação}}{\text{Número de falhas}}$
MTTF	Tempo médio até à falha	$\frac{\text{Soma dos tempos de operação}}{\text{Número de itens}}$
MTBM	Tempo médio entre ações de manutenção corretiva e preventiva.	$\frac{\text{Soma dos tempos de operação}}{\text{Número de ações de manutenção}}$

2.2.6.2. Disponibilidade

De acordo com a norma EN 13306:2017, a disponibilidade é a capacidade de um item para permanecer num estado para funcionar como e quando é requerido, sob condições específicas, assumindo que os recursos de manutenção necessários são fornecidos. Geralmente, depende da quantidade de ações de manutenção necessárias e do tempo para completar essas ações. No entanto, também pode ser influenciada pelos tempos de espera, motivados sobretudo por questões logísticas e administrativas (Benbow & Broome, 2009).

A disponibilidade resulta do efeito combinado da fiabilidade, manutibilidade e recuperabilidade de um item, da suportabilidade da manutenção (EN 13306:2017) e de fatores humanos. Os fatores humanos envolvem a formação e a experiência dos técnicos de manutenção e dos operadores do equipamento, e o desempenho alcançado face às condições de trabalho existentes (Galar *et al.*, 2011). Por exemplo, formação inadequada pode motivar maior demora no diagnóstico de falha, ou um diagnóstico incorreto. Por isso, pode afirmar-se que a disponibilidade constitui uma medida importante do nível global de eficácia de um sistema (Pascual & Kumar, 2016; Stapelberg, 2009).

Do ponto de vista quantitativo, a disponibilidade é representada pela probabilidade de um item poder realizar a função requerida num dado momento. A avaliação da disponibilidade pode ser realizada com base nas distribuições de *Poisson* ou de *Weibull* de tempos entre falhas, e nas distribuições exponencial ou lognormal de tempos de reparação (Stapelberg, 2009). A melhoria da disponibilidade depende essencialmente da capacidade de prevenir falhas e da redução dos tempos de intervenção quando as falhas não podem ser evitadas. Se as ações de manutenção preventiva puderem ser realizadas quando não existir necessidade de utilizar um determinado item, o tempo para realizar estas ações não irá influenciar a disponibilidade.

Nas estimativas da disponibilidade, são frequentemente utilizados indicadores de desempenho. Alguns dos indicadores utilizados são o MTBF, o *Mean Downtime* (MDT) e o *Mean Time to Repair* (MTTR). O MTBF tem de estar na mesma unidade de tempo do que o MTTR. Há situações em que o MTBF é medido em número de ciclos ou em Km percorridos. O MDT e o MTTR são descritos na Tabela 12.

Tabela 12 – Descrição e fórmula de cálculo dos indicadores MDT e MTTR.

Indicador	Descrição	Expressão matemática
MDT	Média dos tempos de indisponibilidade de um item. Inclui o tempo despendido nas ações de manutenção, o tempo dedicado a atividades logísticas, o tempo de espera por peças de substituição, e o período de inatividade motivado por tarefas de âmbito administrativo (Benbow & Broome, 2009).	$\frac{\text{Tempo total de indisponibilidade}}{\text{Número de falhas}}$
MTTR	Média dos tempos de reparação de um item. Pode incluir os tempos necessários para a localização e remoção da falha, ajuste, calibração, verificação, etc. (Jiang, 2015).	$\frac{\text{Tempo total de reparação}}{\text{Número de falhas}}$

O resultado das estimativas de disponibilidade depende dos tempos de indisponibilidade considerados. No cálculo da disponibilidade operacional, é tido em conta o tempo total de indisponibilidade. Além do

tempo despendido nas ações de manutenção, também inclui tempos de espera. A disponibilidade operacional é dada pela expressão:

$$A_{Operacional} = \frac{MTBF}{MTBF + MDT} \quad (2.7)$$

Na estimativa da disponibilidade inerente, o tempo de indisponibilidade considerado é somente o tempo relativo à ação de manutenção corretiva. Assim, a disponibilidade inerente pode ser calculada do seguinte modo:

$$A_{Inerente} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.8)$$

2.2.6.3. Manutibilidade

A manutibilidade é a capacidade de um item, sob determinadas condições de utilização, ser mantido num estado ou restaurado para um estado em que pode realizar a função requerida, quando as ações de manutenção são efetuadas sob determinadas condições e utilizando recursos e procedimentos especificados (EN 13306:2017). A manutibilidade inerente ou intrínseca resulta das características estabelecidas no projeto de um ativo físico. A Tabela 13 apresenta exemplos de requisitos qualitativos relacionados com a manutibilidade que devem ser considerados no âmbito do projeto de um item.

Tabela 13 – Requisitos qualitativos relacionados com a manutibilidade (adaptado de Jiang, 2015).

Requisitos	Descrição
Segurança	Relaciona-se com a prevenção de lesões nas pessoas e danos no equipamento durante as ações de manutenção. Por exemplo, devem ser evitadas extremidades afiadas, esquinas e saliências.
Acessibilidade	Deve assegurar-se que existe espaço suficiente de modo a não comprometer a visibilidade e o acesso manual durante as ações de manutenção.
Montagem e desmontagem	As operações de montagem e desmontagem necessárias para executar as ações de manutenção devem ser simplificadas.
Testabilidade	A deteção e o isolamento da falha devem ser facilitados.

A manutibilidade real de um item resulta das características do projeto e da instalação, e dos recursos humanos e materiais disponíveis. A combinação destes fatores irá determinar a frequência e a duração das ações de manutenção, e os custos de manutenção ao longo do ciclo de vida (Pascual & Kumar, 2016). Na avaliação da manutibilidade, são considerados sobretudo os tempos de reparação. Por isso, o MTTR é um indicador fundamental para avaliar o desempenho da manutibilidade.

Assumindo que os tempos de reparação seguem uma distribuição de probabilidade paramétrica conhecida, a função manutibilidade pode ser utilizada para determinar a probabilidade da reparação de um item ser concluída num intervalo de tempo específico. Se a reparação de um item for iniciada no instante $t = 0$, a função manutibilidade, $M(t)$, é representada pela seguinte expressão (Dhillon, 2007):

$$M(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (2.9)$$

Em que t representa o tempo e $f(t)$ é a função densidade de probabilidade dos tempos de reparação.

Por vezes, as características de manutibilidade de um sistema possibilitam a realização de ações de manutenção sem interromper o seu normal funcionamento, nomeadamente quando são implementadas redundâncias. Assim, a disponibilidade ao nível do sistema não será afetada pela eventual falha de um componente redundante (Biolini, 2014).

2.2.6.4. Segurança

A segurança é a condição de estar protegido ou de não poder causar perigo, risco ou lesões. A abordagem prática da segurança associada a um sistema existente implica a identificação e classificação de eventos de risco, e a capacidade de determinar a sua probabilidade de ocorrência. Quando se verifica que o risco é inaceitável, as características relevantes do sistema devem ser redefinidas (Pascual & Kumar, 2016).

A probabilidade de falha pode ser avaliada determinando margens de segurança com base em dados de falhas anteriores ao nível do sistema e do componente. A margem de segurança é uma variável aleatória que resulta da diferença entre valores nominais de exigência e de capacidade. A exigência pode resultar de tensões de carga, pressões e temperaturas. Enquanto a capacidade depende das propriedades de resistência dos materiais, dimensões físicas, boas práticas de construção, entre outros fatores (Stapelberg, 2009). Neste contexto, a adequação do projeto pode ser avaliada tendo em conta o índice de fiabilidade. Este índice é determinado com base na média e no desvio padrão da distribuição de probabilidade dos valores das margens de segurança. Todinov (2005) apresenta a estimativa do índice de fiabilidade considerando uma distribuição normal da diferença entre parâmetros de resistência e de carga.

2.2.7. Custos da manutenção

A função manutenção influencia diretamente o funcionamento dos equipamentos e, conseqüentemente, as despesas, as receitas e a sustentabilidade das organizações. Por isso, os custos e os indicadores de

desempenho relacionados com o equipamento são fundamentais para analisar o desempenho da função manutenção. Posteriormente, com base na análise das causas dos desempenhos pouco satisfatórios, podem ser definidas ações de melhoria apropriadas (Muchiri *et al.*, 2011). A relação custo-eficácia de cada ação de melhoria pode ser examinada medindo os parâmetros de custos relevantes antes e depois das melhorias (Alsyouf, 2007).

As atividades de manutenção na sua globalidade têm um impacto significativo nos custos de operação das empresas mais dependentes de ativos físicos (ex.: indústria, construção e transportes) (Hodkiewicz & Ho, 2016). De acordo com Al-Turki (2012), cerca de 30% dos custos operacionais das empresas industriais e do setor da construção estão relacionados com a manutenção. Estes custos poderão baixar consideravelmente se forem tomadas decisões de manutenção adequadas e oportunas (Harte, 2013). Para esse efeito, é fundamental dispor de informação relevante e rigorosa relativa ao estado do equipamento e aos fatores que o influenciam. Esta informação permite ajustar os planos de manutenção e de produção, adequando-os à situação do equipamento (Al-Turki, 2012).

Os custos de exploração de um sistema envolvem custos de operação e de apoio logístico. Os custos de operação são uma função dos requisitos do sistema e da sua utilização. Ao passo que os custos de apoio logístico são essencialmente uma função das características inerentes de fiabilidade e manutibilidade do sistema e dos requisitos necessários para apoiar todas as ações de manutenção programadas e não programadas durante a vida útil. Deste modo, um modelo de custos de manutenção deve abranger os custos de todo o período de vida útil de um sistema e deve basear-se nos seus objetivos operacionais. Os custos são geralmente repartidos pelas áreas de atividade funcional e elementos relevantes do sistema. A estrutura de repartição de custos resultante permite apoiar a alocação inicial de recursos, a monitorização e o controlo de custos (Pascual & Kumar, 2016).

A eficácia de um sistema pode ser representada pela relação entre a eficácia operacional face aos objetivos definidos e os custos associados ao seu ciclo de vida (Biolini, 2014). Esta relação é ilustrada na Figura 15. Neste contexto, a eficácia operacional do sistema é determinada com base em critérios de capacidade, de disponibilidade e de segurança.

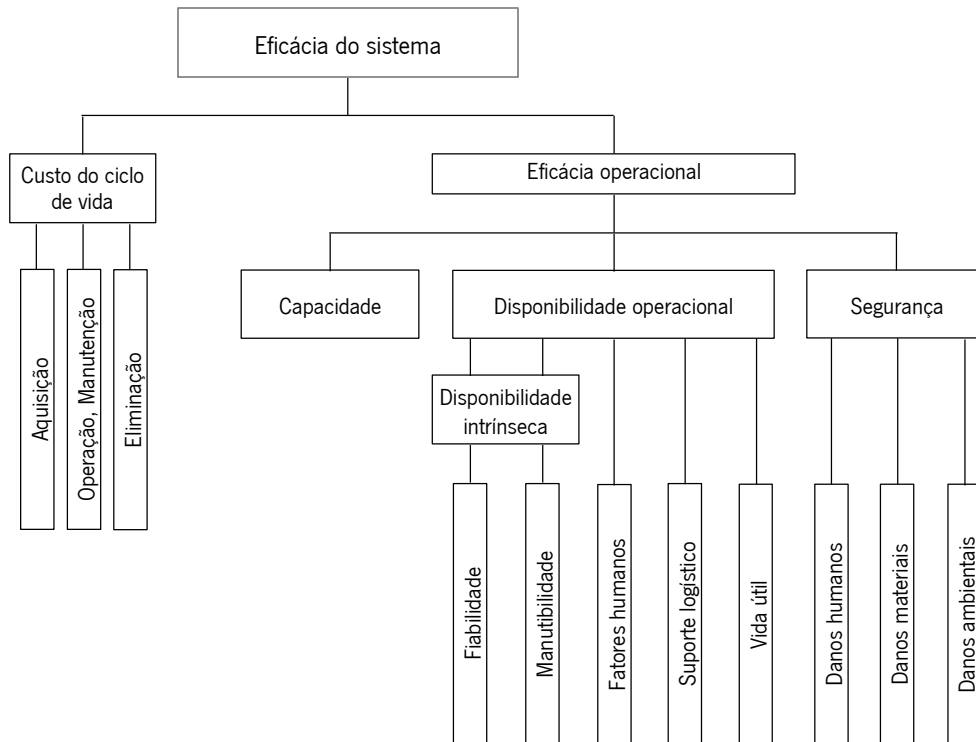


Figura 15 – Eficácia de custos de um sistema complexo (adaptado de Birolini, 2014).

O custo total de manutenção de um sistema é influenciado pelas iniciativas de gestão da manutenção e por fatores externos, nomeadamente as características de projeto e eventuais defeitos fabrico dos equipamentos. A aquisição de equipamentos mais fiáveis contribui para baixar os custos de manutenção, no entanto implica geralmente custos de aquisição mais elevados (Birolini, 2014). Por isso, a relação entre a fiabilidade e os custos de manutenção assume uma grande relevância no âmbito de uma análise de custos (Blischke & Murthy, 2003).

A eficácia e eficiência alcançadas na realização das atividades de manutenção têm um impacto significativo no custo total da manutenção. A eficácia é demonstrada pela capacidade de identificar as ações apropriadas e de realizá-las no momento certo. Enquanto a eficiência está associada ao modo como são alocados os recursos para a realização das ações de manutenção (Muchiri *et al.*, 2011; Smith & Mobley, 2007). De um modo geral, é difícil determinar os custos relacionados com falta de eficiência. Estes custos só podem ser determinados convenientemente com o apoio do departamento de manutenção de uma empresa, devido à componente técnica associada (Pascual & Kumar, 2016). Por este motivo, o impacto dos custos da manutenção nos custos operacionais de uma organização é muitas vezes subestimado (Wienker *et al.*, 2016).

Em geral, as ações de manutenção envolvem custos relacionados com mão de obra, materiais, sobressalentes, ferramentas e outros meios de apoio. Quando as ações de manutenção são planeadas,

a estes custos acrescem outras despesas que dependem da política de manutenção adotada, por exemplo custos de preparação e programação das atividades de manutenção, custos de controlo e inspeção, e custos relativos a dispositivos de monitorização do equipamento. Por fim, devem ser considerados os custos induzidos pela falha que envolvem a perda de benefícios devido à indisponibilidade ou ao mau funcionamento do equipamento, e eventuais danos humanos e ambientais imputáveis à manutenção (Fedele, 2011).

2.2.7.1. Modelo do iceberg

O “modelo do iceberg” é habitualmente utilizado para representar os custos totais da manutenção. Tal como se verifica num iceberg, em que a área submersa é significativamente superior à área visível, estima-se que os custos ocultos ou indiretos da manutenção sejam até cinco vezes mais elevados do que os custos visíveis ou diretos (Wienker *et al.*, 2016). Na Tabela 14, são apresentados exemplos de custos visíveis e de custos ocultos associados às atividades de manutenção.

Tabela 14 – Exemplos de custos visíveis e de custos ocultos da função manutenção (adaptado de Wienker *et al.*, 2016).

Custos da manutenção	Exemplos
Custos visíveis	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mão de obra ▪ Materiais ▪ Aquisição e posse de peças sobressalentes ▪ Ferramentas e dispositivos de apoio ▪ Contratos de prestação de serviços ▪ Amortizações ▪ Formação ▪ Despesas gerais
Custos ocultos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Qualidade inferior e rejeições ▪ Maior consumo de energia ▪ Redução do tempo de vida dos ativos ▪ Excesso de manutenção ▪ Perdas de produtividade ▪ Excesso de inventário de sobressalentes ▪ Desperdício de recursos ▪ Incumprimento de prazos ▪ Perda de reputação e imagem ▪ Sansões devido a danos ambientais ▪ Acidentes devido a falhas de segurança

Para que a gestão da manutenção seja bem-sucedida, o investimento em custos diretos deve permitir diminuir ou eliminar os custos indiretos (Pascual & Kumar, 2016). Em geral, não é fácil prever a relação entre o investimento requerido para aumentar a eficácia da função manutenção e a poupança correspondente. Além disso, é necessário ter em conta que o impacto das melhorias da função manutenção na redução de custos tem um limite finito (Alsyouf, 2007).

Segundo Wienker *et al.* (2016), em algumas empresas, a redução dos custos ocultos depende sobretudo da adoção uma abordagem pró-ativa baseada na fiabilidade, considerando os seguintes elementos:

- Uma estratégia bem definida;
- Políticas que suportem a estratégia;
- Procedimentos e processos para a implementação da estratégia e da política;
- Ferramentas para apoiar a implementação;
- Um processo de controlo da função manutenção bem estabelecido.

A redução dos custos indiretos pode ser alcançada aplicando técnicas de análise de risco para priorizar ativos e alinhar as ações de manutenção com os objetivos da organização (Márquez, 2007). Além disso, deve procurar-se reduzir a probabilidade de ocorrência das falhas e minimizar as suas consequências, tendo em conta que estas não podem ser totalmente evitadas. Deste modo, é possível prevenir danos secundários que contribuem para o agravamento dos custos indiretos (Blischke & Murthy, 2003).

2.2.7.2. Minimização do custo global

A gestão da manutenção deve considerar os benefícios e as perdas resultantes de cada decisão. Os custos associados à manutenção não planeada (ex.: manutenção corretiva imediata) são variáveis, visto que geralmente variam com o volume de produção ou de vendas. No caso da manutenção planeada (ex.: manutenção preventiva e manutenção corretiva diferida), os custos relacionados são considerados fixos. Quando se verifica um aumento dos custos da manutenção planeada, os custos de falha tendem a decrescer, devido à redução do número de falhas e das perdas associadas. Por isso, o custo global da manutenção também decresce com o aumento dos custos de manutenção planeada, até atingir um valor mínimo. Este valor representa um equilíbrio ótimo entre os custos de manutenção planeada e os custos de manutenção não planeada. A partir deste ponto o aumento dos recursos associados à manutenção planeada também contribui para aumentar o custo global da manutenção (Pascual & Kumar, 2016). O gráfico da Figura 16 representa o comportamento do custo global da manutenção em função dos recursos investidos em manutenção planeada e manutenção não planeada.

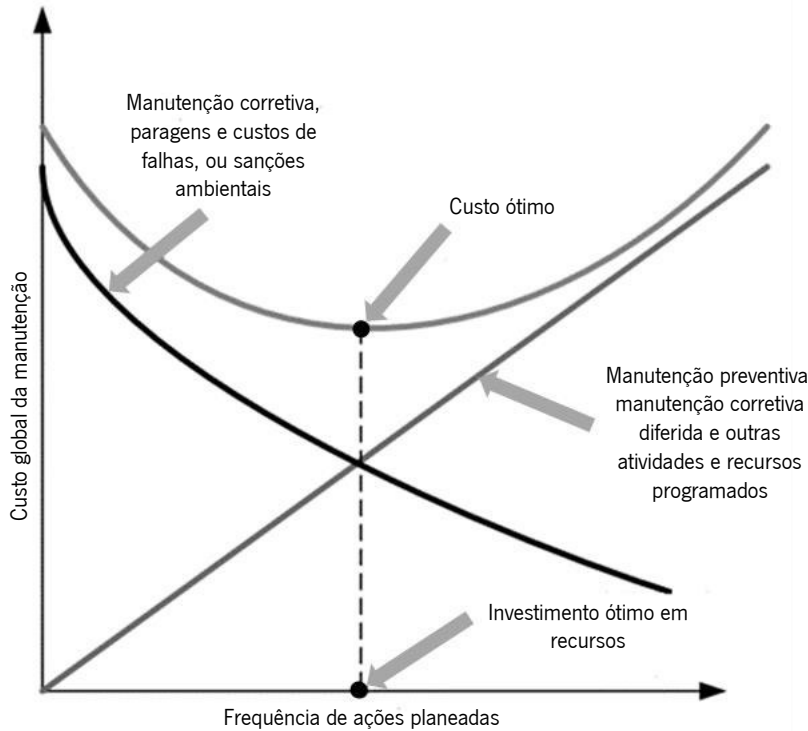


Figura 16 – Custo global da manutenção em função dos recursos investidos (adaptado de Pascual & Kumar, 2016).

Al-Najjar (2007) e Alsyouf (2007) defendem que a manutenção é uma função geradora de receita, em vez de um centro de custos. Para demonstrar esta perspectiva Alsyouf (2007), desenvolveu um modelo conceptual que visa relacionar os efeitos de uma abordagem de manutenção eficaz e eficiente com a eficácia e eficiência do processo produtivo e, por inerência, com as alterações associadas à produtividade e à recuperação de preços, das quais resultam alterações dos lucros (Figura 17). A influência da abordagem de manutenção é determinada com base na análise das causas das alterações dos lucros.

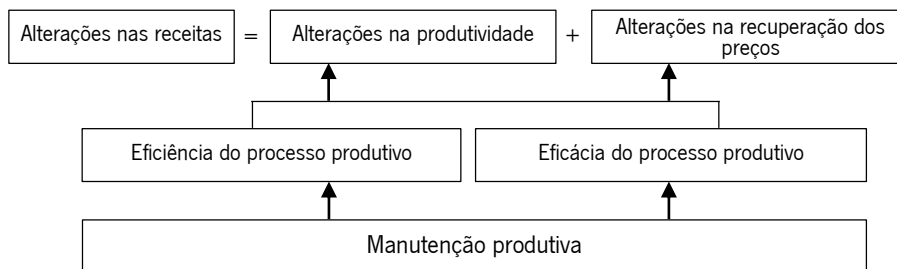


Figura 17 – Modelo conceptual representativo do impacto da abordagem de manutenção nos lucros das empresas (adaptado de Alsyouf, 2007).

2.2.8. Tipos de manutenção

A norma EN 13306:2017 classifica as atividades ou intervenções de manutenção em três tipos principais: manutenção corretiva, manutenção preventiva e melhoria (Figura 18). A manutenção corretiva tem uma natureza reativa, visto que é sempre realizada após o reconhecimento da falha com o intuito

de a corrigir. Ao passo que a manutenção preventiva é executada antes da falha se verificar com o objetivo de a prevenir. Quando a intervenção no equipamento envolve a alteração das características intrínsecas de confiabilidade de um item sem alterar a sua função, é designada de melhoria. A manutenção preventiva apresenta dois subtipos: manutenção predeterminada, também designada de manutenção preventiva sistemática, e manutenção condicionada. No que diz respeito à manutenção corretiva, quando a intervenção é realizada sem atraso depois da detecção de uma falha, designa-se manutenção corretiva imediata. Esta geralmente tem como objetivo minimizar as consequências da falha, assegurando que as condições de operação são reestabelecidas rapidamente. Caso a intervenção não seja realizada imediatamente depois da detecção da falha devido a regras específicas, denomina-se manutenção corretiva diferida. A realização destas intervenções pode ser programada.

Em geral, a manutenção corretiva apresenta um valor associado reduzido, apesar de permitir utilizar o item considerado até ao fim do seu tempo de vida. Esta circunstância deve-se aos custos induzidos pela falha que, em alguns casos, podem ser significativos (ex.: indisponibilidade do equipamento e danos físicos e ambientais). A manutenção preventiva predeterminada muitas vezes implica o desperdício de uma parte significativa do tempo de vida do item, por isso o seu valor associado também é reduzido, se for realizada com demasiada antecedência. Para aumentar o valor associado a esta estratégia, o tempo de utilização do item até à falha deve ser caracterizado corretamente (Haddad *et al.*, 2012).

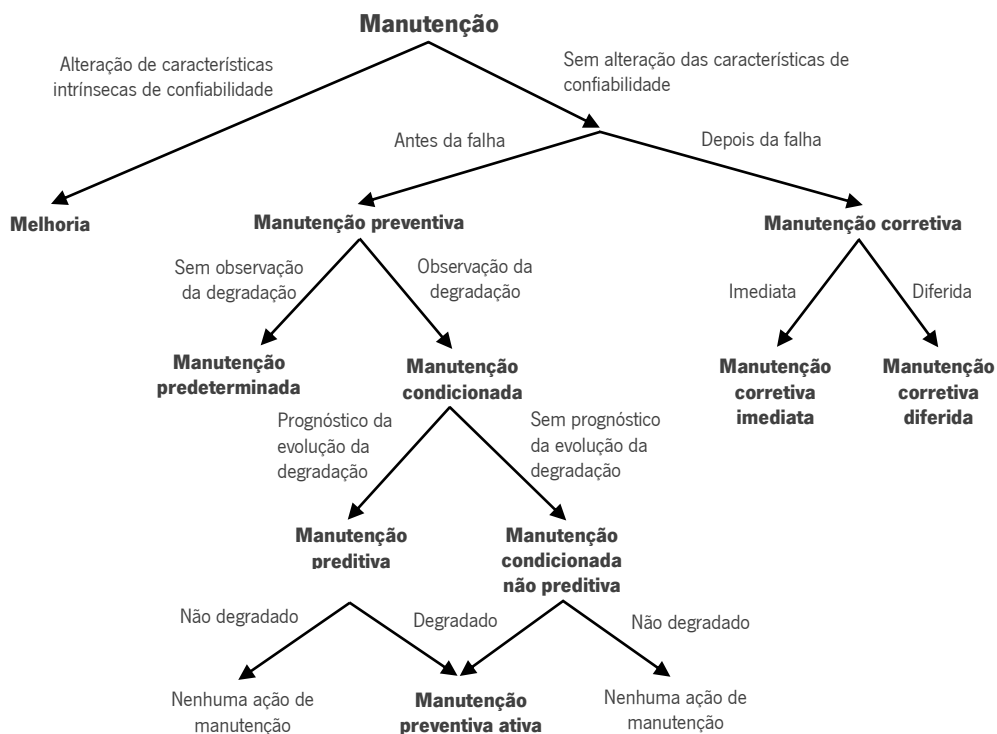


Figura 18 – Tipos e subtipos de manutenção (adaptado de EN 13306:2017).

Em seguida, a manutenção corretiva e a manutenção preventiva, e os subtipos de manutenção que lhe estão associados são descritos de um modo mais detalhado.

2.2.8.1. Manutenção corretiva

A manutenção corretiva é realizada depois do reconhecimento da falha e tem como objetivo restaurar um item para um estado em que pode realizar a função requerida (EN 13306:2017). A necessidade de realizar uma intervenção corretiva surge inesperadamente e a localização dos componentes afetados nem sempre é imediata. Por isso, este tipo de manutenção pode envolver uma ou mais das seguintes etapas: localização da falha, correção da falha ou verificação da condição após a reparação (Birolini, 2014; Márquez, 2007). Quando a avaria acontece subitamente e a frequência de falha é irregular a manutenção corretiva poderá ser a opção mais vantajosa, caso se verifique que as consequências da falha são aceitáveis em termos de segurança, impacto no ambiente (Ashjaei & Bengtsson, 2017) e impacto na produção. A manutenção corretiva requer frequentemente competências e ferramentas específicas (Abdulrahman *et al.*, 2017). Por isso, os custos associados à manutenção corretiva são variáveis (Pascual & Kumar, 2016).

2.2.8.2. Manutenção preventiva

A manutenção preventiva é realizada com o intuito de avaliar e/ou atenuar a degradação e reduzir a probabilidade de falha de um item (EN 13306:2017). A sua aplicação é justificada pela necessidade de evitar os efeitos da falha, nomeadamente danos humanos e materiais, e perdas de qualidade e de produção. Segundo Almeida *et al.* (2015), a manutenção preventiva tem duas categorias de objetivos: garantir o funcionamento do equipamento de acordo com as condições de projeto e restaurar as condições operacionais de projeto. A primeira categoria, envolve ações de rotina, tais como limpar, lubrificar, ajustar, reapertar, entre outras. Estas ações são essenciais, visto que se não forem executadas com a frequência adequada o processo de envelhecimento do equipamento acentua-se e, por isso, a distribuição de tempos de falha também pode alterar-se. As ações relativas à segunda categoria destinam-se a conter o nível de desgaste resultante da utilização do equipamento. Caso as ações de rotina não sejam realizadas com a periodicidade requerida, a necessidade de empreender ações da segunda categoria aumenta e, em situações extremas, podem ocorrer danos irreversíveis no equipamento.

Quando a manutenção preventiva é realizada de acordo com intervalos de tempo estabelecidos ou número de unidades de utilização (ex.: horas, quilómetros, número de operações, etc.), sem efetuar a análise da condição, é designada de manutenção preventiva predeterminada. Em geral, estas

intervenções são programadas com antecedência, a fim de assegurar a disponibilidade de sobressalentes, recursos humanos e ferramentas, e planejar paragens do equipamento. Os intervalos de tempo ou o número de unidades de uso podem ser estabelecidos com base no conhecimento do mecanismo de falha do item (EN 13306:2017), em recomendações do fornecedor ou em modelos de decisão quantitativos. As recomendações do fornecedor nem sempre têm em consideração as condições reais de operação, por este motivo podem resultar em decisões pouco adequadas. No caso dos modelos de decisão quantitativos, a informação aplicada é factual e pode incluir distribuições do tempo entre falhas, os custos de intervenção (inspeção, reparação e substituição) e a consequência da falha (Tsang, 2002). Segundo Márquez, 2007, o modelo utilizado deve ter em consideração o estado do componente após uma intervenção preventiva, visto que esta altera o seu padrão de falha.

A manutenção preventiva condicionada aplica técnicas não destrutivas (ex.: medição, observação, ensaio) com vista a obter dados relativos a um ou mais parâmetros considerados relevantes para monitorizar e avaliar o estado do equipamento. A aquisição e monitorização de dados pode ser contínua, planeada ou realizada sob pedido. Tem como objetivo identificar irregularidades no funcionamento dos equipamentos e corrigi-las antes da falha funcional ocorrer. A ação de manutenção pode ser desencadeada tendo em conta diferentes critérios, nomeadamente quando o valor de um parâmetro ou de um indicador calculado com base num ou mais parâmetros ultrapassa um nível limite preestabelecido. A manutenção condicionada também é designada de manutenção preditiva quando as ações de manutenção são planeadas tendo em consideração uma previsão resultante da análise repetida ou de características conhecidas e avaliação dos parâmetros relevantes relacionados com a degradação de um item (EN 13306:2017). Um exemplo comum é a análise dos valores de parâmetros controlados para identificar uma tendência que permita estimar o momento em que a grandeza controlada irá atingir ou exceder um valor limite. A definição dos requisitos de manutenção baseada na condição do equipamento pode envolver a integração de diversos elementos, designadamente dados de desempenho e diagnóstico de potenciais falhas, informação do histórico de manutenção, registos de operadores e dados de projeto (Lee & Wang, 2008). A manutenção condicionada é particularmente relevante em situações em que as falhas podem originar prejuízos avultados. Além disso, a sua aplicação permite que os itens monitorizados sejam utilizados até um limite considerado aceitável, evitando a sua substituição prematura. A manutenção preventiva realizada com objetivo de restaurar diretamente um item ou após degradações observadas através da monitorização da condição, inspeção e ensaio, é denominada de manutenção preventiva ativa (EN 13306:2017).

Em alguns casos, as ações de manutenção baseadas na condição resultam da atitude pró-ativa das pessoas que têm contacto regular com o equipamento. O seu conhecimento das condições de trabalho do equipamento permite que intuitivamente identifiquem comportamentos atípicos sob a forma de sinais de alerta (ex.: ruídos, vibrações, cheiros, etc.), com antecedência suficiente para planejar as intervenções necessárias. Este tipo de manutenção designa-se manutenção pró-ativa e tem como finalidade identificar e corrigir as causas primárias de avaria que podem resultar em condições de instabilidade operacional (Fedele, 2011). Na maioria dos estudos identificados na literatura (Bousdekis, Mentzas, *et al.*, 2015; Bousdekis & Mentzas, 2017; Henderson *et al.*, 2014; Kans & Ingwald, 2008; Lee *et al.*, 2006; Voisin *et al.*, 2010), o conceito de manutenção pró-ativa é utilizado para caracterizar tarefas de manutenção preventiva e/ou preditiva. Contudo, Lee and Wang (2008) apresentam uma perspetiva mais ampla do mesmo conceito, que contempla aplicação das mais recentes tecnologias de informação e comunicação. Na opinião destes autores, a manutenção pró-ativa abrange todas as tarefas relativas à integração contínua de informação de diagnóstico e prognóstico da condição e a tomada de decisão relacionada com a manutenção utilizando tecnologias de comunicação sem fios. Neste contexto, os mesmos autores identificam as seguintes áreas de atuação:

- Desenvolvimento sistemas inteligentes ligados em rede, com capacidade para monitorizar, prever e otimizar o seu desempenho;
- Prevenção das condições subjacentes que resultam em degradação e falha;
- Transferência de informação relacionada com a manutenção para ser considerada no projeto do produto, processo e equipamento e efetuar melhorias em todos aspetos do ciclo de vida do produto.

Moubray (1997) salienta as tarefas pró-ativas de manutenção só são vantajosas, do ponto de vista financeiro, caso o custo associado seja inferior ao custo de reparação e dos danos secundários causados pela falha.

2.2.9. Políticas de manutenção e modelos matemáticos associados

Ao longo dos anos, foram definidas diversas políticas de manutenção, de forma a dar resposta a necessidades cada vez mais específicas das empresas no âmbito do planeamento da manutenção. Muitas destas políticas têm associados modelos matemáticos. Em seguida, são abordadas as principais políticas de manutenção identificadas na literatura e os modelos matemáticos associados a algumas das políticas existentes.

2.2.9.1. Políticas de manutenção

As decisões relacionadas com a gestão da manutenção envolvem a seleção do tipo de manutenção, a seleção do tipo de ação (reparar ou substituir), a seleção da política de manutenção e a otimização dos parâmetros da política (Jiang, 2015). As políticas de manutenção visam coordenar as atividades de manutenção de acordo com as características particulares de cada sistema que se pretende manter e com os objetivos estratégicos da empresa (Almeida *et al.*, 2015). Estas representam a regra ou o conjunto de regras que descrevem o mecanismo que desencadeia as diferentes ações de manutenção (Pintelon & Parodi-Herz, 2008). Segundo Márquez (2007), uma política de manutenção envolve a inter-relação entre níveis de indentação do equipamento, níveis de manutenção e linhas ou escalões de manutenção. Os níveis de indentação resultam da divisão da estrutura do equipamento em escalões, por exemplo sistema, subsistema, componente. Cada nível de indentação pode apresentar diferentes requisitos de manutenção. Por isso, são estabelecidos níveis de manutenção que incluem um conjunto de ações destinadas a um nível de indentação específico ou a níveis de complexidade definidos pela empresa. A linha de manutenção estabelece, para cada nível de manutenção, o local onde o serviço de manutenção é realizado e os recursos a utilizar (ex.: oficina interna, fornecedor subcontratado ou fabricante) (Márquez, 2007).

Para realizar decisões táticas justificáveis e lógicas no domínio da gestão da manutenção, é necessário conhecer as vantagens e as desvantagens de cada política de manutenção (Waeyenbergh & Pintelon, 2004).

A aplicação de políticas de manutenção corretiva visa sobretudo decidir se um determinado item deve ser reparado ou substituído. Alguns exemplos são a política do custo limite, do tempo limite de reparação e do número limite de falhas com uma idade de referência. De acordo com a política do custo limite, é realizada uma reparação quando o custo associado é inferior a um limite de custo preestabelecido, caso contrário o item é substituído. Neste caso, não basta comparar os custos diretos de reparação com os custos de substituição, também se deve considerar os custos esperados em resultado da decisão tomada. Por exemplo, quando se opta pela reparação do item em questão, o intervalo de tempo até à falha subsequente poderá ser menor, agravando assim os custos de manutenção. No caso da política do tempo limite de reparação, opta-se pela reparação sempre que o tempo de reparação estimado for inferior a um limite preestabelecido. A política do número limite de falhas com uma idade de referência estabelece que um item deve ser substituído depois de se verificar um número predefinido de falhas ou quando ocorrer uma falha após uma idade de referência. As falhas que ocorrem antes da substituição são retificadas realizando uma reparação mínima (Jiang, 2015).

No âmbito dos diversos modelos matemáticos associados às políticas de manutenção, são assumidos diferentes pressupostos relacionados com o estado de um item depois de ser reparado, nomeadamente “*as bad-as-old*”, “*better than old but worse than new*” e “*as good-as-new*”. Enquanto o item não é substituído e sempre que ocorre uma falha, é executada uma reparação designada de reparação mínima. Este regime de reparação estabelece a realização de uma ação de manutenção menor que corrige a falha, mas não altera o estado do item intervencionado. Ou seja, a sua taxa de falhas não é modificada. Assim, o estado do item após a reparação é habitualmente designado “*as bad-as-old*”. Por outro lado, caso a reparação altere o estado de um item, motivando uma redução da taxa de falhas, esta designa-se de reparação geral ou manutenção imperfeita. Este estado é classificado de “*better than old but worse than new*”. No entanto, só a completa renovação do item considerado poderá reduzir a taxa de falhas para o nível em que se encontrava no início da vida útil. Este estado é denominado “*as good-as-new*” e a intervenção correspondente é habitualmente denominada manutenção perfeita. A Figura 19 exemplifica o efeito de diferentes ações de manutenção na taxa de falhas de um item com taxa de falhas crescente. Neste contexto, existe a necessidade de identificar a ação de manutenção e o momento em que deve ser realizada, tendo em conta os custos e os benefícios associados (Gold, 2013).

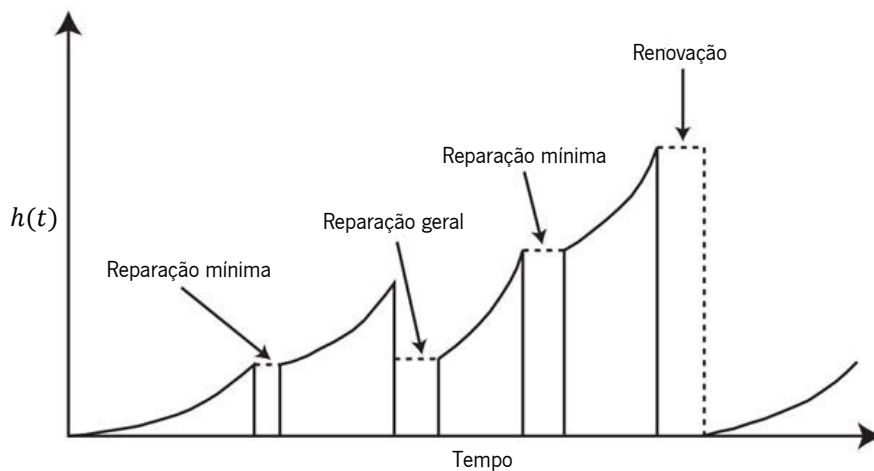


Figura 19 – Reparação mínima, reparação geral e renovação (adaptado de Gold, 2013).

As políticas de manutenção preventiva podem ser classificadas em duas categorias: políticas ao nível do componente e políticas ao nível do sistema. A manutenção baseada no tempo/uso e a manutenção condicionada são geralmente realizadas ao nível do componente. Neste caso, é definida uma política de manutenção para um único componente. Quando a política é implementada ao nível do sistema, são realizadas simultaneamente diversas tarefas de manutenção para vários componentes do mesmo sistema. Nesta categoria, enquadram-se as políticas de manutenção de oportunidade e as políticas de

manutenção em grupo (ou em bloco), que pressupõem a realização de ações de manutenção periódicas simultâneas para grupos específicos de componentes (Jiang, 2015).

Existe uma grande variedade de políticas de manutenção preventiva baseadas no tempo/uso que dão origem a modelos matemáticos na literatura (ver subsubsecção 2.2.9.2). Estas políticas destinam-se a estabelecer o momento mais conveniente para a realização de diferentes ações de manutenção, nomeadamente substituições e inspeções. A política de substituição baseada na idade e a substituição em bloco são dois exemplos destas políticas. No caso da política de substituição baseada na idade, uma unidade é substituída sempre que a falha se verifica ou quando esta atinge uma idade T sem falhar. O valor de T é geralmente constante. Porém, quando os ciclos de trabalho de um sistema não podem ser interrompidos para realizar ações de manutenção, poder-se-á tirar partido dos períodos de paragem. No âmbito da política de substituição em bloco, todas as unidades de um determinado tipo são substituídas nos momentos fixados kT ($k = 1, 2, \dots$) e quando falham (Barlow & Proschan, 1996). No caso dos itens reparáveis, também pode ser aplicada a política de substituição em bloco com reparação mínima. As falhas são removidas realizando uma reparação mínima, e a substituição preventiva é realizada somente nos momentos kT (Jiang, 2015).

Determinadas falhas só podem ser detetadas com base na inspeção dos itens afetados, visto que permanecem ocultas. As falhas ocultas devem ser identificadas e corrigidas antes que falhas mais graves, despoletadas por estas, possam verificar-se. Assim, o aumento do número de inspeções contribui para reduzir o número de avarias do equipamento. Quando a falha do item inspecionado resulta de um processo desgaste, geralmente é realizada uma ação de manutenção preventiva depois de se verificar que o desgaste acumulado atingiu um nível predefinido, evitando assim a ocorrência da falha. Por isso, a inspeção é particularmente relevante quando são considerados itens sujeitos a desgaste.

Em geral, as políticas de inspeção são baseadas em modelos matemáticos destinados a descrever o processo de deterioração do equipamento e abordam a definição de intervalos de inspeção e de limites que determinam a necessidade de realizar a manutenção preventiva. Estes modelos podem assumir dois tipos de pressupostos: inspeção perfeita ou inspeção imperfeita. Ao contrário da inspeção perfeita, a inspeção imperfeita não permite determinar o estado exato de um sistema. No que diz respeito à periodicidade, as inspeções geralmente são designadas de contínuas, periódicas ou não periódicas. As inspeções periódicas são realizadas em intervalos de tempo predefinidos, enquanto as inspeções não periódicas são realizadas sob pedido. A manutenção corretiva é executada se o sistema falhar, e a manutenção preventiva é efetuada quando a deterioração cumulativa está acima do limite

predeterminado e abaixo do limite de falha. De outro modo, nenhuma ação é realizada (Alaswad & Xiang, 2017).

2.2.9.2. Modelos matemáticos

No âmbito das políticas de manutenção, são habitualmente utilizados modelos de otimização para determinação dos seus parâmetros (variáveis de decisão), tal como a idade ótima de substituição, o custo limite ou o tempo limite de reparação (Zhao, Wang, & Zheng, 2014). No caso de ações de manutenção baseadas na condição do equipamento (manutenção condicionada), as variáveis de decisão podem ser o limite estabelecido para os parâmetros monitorizados e o intervalo de inspeção (no caso da monitorização não ser contínua). Os elementos gerais de um problema de otimização são: as variáveis de decisão, a função objetivo a otimizar e as restrições. A política pode contemplar um ou mais objetivos (otimização multiobjectivo). A minimização do custo total das atividades de manutenção e a maximização da disponibilidade de um sistema são objetivos frequentes de uma política de manutenção. No entanto, quando as consequências de segurança ou ambientais associadas à falha não são aceitáveis, as ações de manutenção preventiva podem ser priorizadas com base em técnicas de avaliação de risco (Jiang, 2015). Segundo Horenbeek *et al.* (2010), a manutenção deve proporcionar o valor ideal para os objetivos de otimização mais adequados. Alcançar o valor máximo ou mínimo para apenas um objetivo pode ser insuficiente. Por isso, estes autores salientam que é essencial identificar e priorizar os critérios de otimização que, em cada situação específica, permitem maximizar o valor acrescentado da função manutenção.

As políticas de manutenção podem basear-se em modelos probabilísticos ou em modelos determinísticos (Almeida *et al.*, 2015). Os modelos probabilísticos são utilizados com o intuito de determinar a probabilidade de uma falha poder verificar-se durante um período de tempo específico, com base em dados de fiabilidade existentes (Márquez, 2007). A aplicação de modelos probabilísticos é justificada pela natureza estocástica das falhas que afetam os componentes. Por outro lado, existem componentes cuja deterioração pode ser analisada de forma determinística, tendo em conta que o custo operacional associado aumenta com o tempo de utilização (ex.: filtros de combustível). Neste caso, podem ser adotados modelos determinísticos com vista a analisar a evolução da função custo e identificar o momento mais conveniente para substituir o componente. Após uma substituição, espera-se que o custo de operação do novo componente apresente uma tendência idêntica em comparação com o componente substituído (Figura 20). Deste modo, o momento e o resultado da substituição são sempre conhecidos (Gold, 2013).

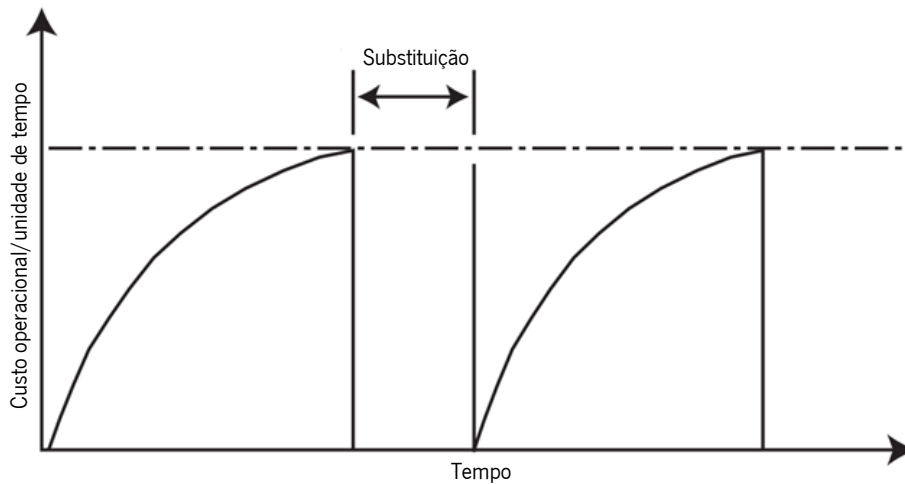


Figura 20 – Tendência determinística nos custos de operação (adaptado de Gold, 2013).

Na literatura, são apresentados diversos exemplos de modelos de otimização destinados a maximizar ou minimizar um ou mais critérios para a determinação dos parâmetros associados a políticas de manutenção preventiva e políticas de inspeção. Os modelos apresentados são muito diversos e, por vezes, são combinadas diferentes técnicas no mesmo estudo.

No que diz respeito à manutenção preventiva, existem dois modelos básicos relacionados com a política de substituição baseada na idade e política de substituição em bloco, respetivamente. O modelo associado à política baseada na idade, visa determinar a idade ótima de substituição preventiva (t_p) de um item para minimizar o custo total esperado das substituições por unidade de tempo. No caso da política de substituição em bloco, o modelo tem como objetivo determinar o intervalo ótimo entre substituições preventivas (t_p) de um item para minimizar o custo total esperado de substituição por unidade de tempo. A aplicação destes modelos destina-se a balancear os custos associados às substituições preventivas e os benefícios resultantes (número reduzido de substituições devido a falha). O gráfico da Figura 21 apresenta um exemplo genérico da evolução das curvas relativas ao custo de substituição preventiva, custo de substituição devido a falha e custo total esperado por unidade de tempo. Na literatura, também se encontram definidos modelos associados a estas políticas, cujo objetivo é minimizar o tempo de inatividade do equipamento por unidade de tempo (Gold, 2013). Além disso, a partir dos dois modelos básicos apresentados, foram desenvolvidos muitos outros modelos, destinados a aplicações específicas.

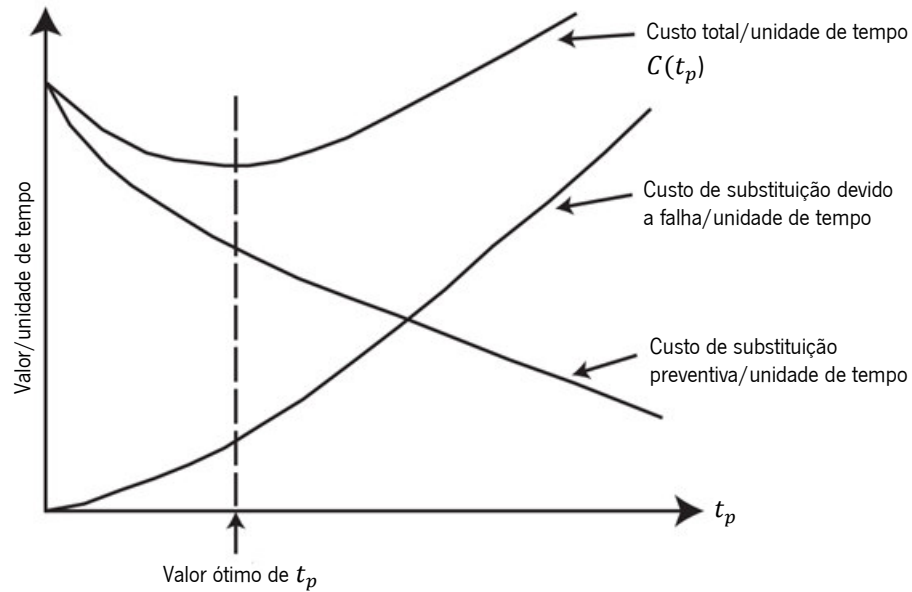


Figura 21 – Tempo ótimo de substituição (adaptado de Gold, 2013).

No âmbito das políticas de inspeção, Eliot (2013) descreve três classes distintas de problemas, nomeadamente a frequência de inspeção para equipamentos que operam continuamente e estão sujeitos a degradação, intervalos de inspeção para equipamentos utilizados somente em situação de emergência, e a monitorização da condição do equipamento com vista a otimizar as decisões de manutenção condicionada. Na primeira classe, são contempladas situações em que a realização da inspeção requer um período de paragem planeada do equipamento. Em geral, estas inspeções são efetuadas visualmente ou recorrendo a ferramentas simples, e visam sobretudo reparar falhas ocultas. A frequência de inspeção pode ser definida de forma a maximizar o benefício resultante da utilização do equipamento por unidade de tempo, ou a fim de minimizar o tempo de inatividade decorrente da falha e da inspeção do componente por unidade de tempo. A segunda classe baseia-se no pressuposto de que o equipamento também pode deteriorar-se durante o período de inatividade e, por isso, existe o risco de não funcionar quando a sua utilização é necessária. Assim, o intervalo entre inspeções é determinado de forma a maximizar a proporção de tempo em que o equipamento está disponível para realizar a sua função. Na última classe, incluem-se situações em que são utilizados meios tecnológicos sofisticados para monitorizar a condição de um item (ex.: monitorização das vibrações e análise de óleos). A otimização das decisões de manutenção condicionada pode ser realizada tendo em consideração o risco de falha, determinado a partir dos dados da condição, e as consequências económicas da manutenção preventiva e da falha do item em questão. O objetivo é determinar o nível de risco que permite minimizar o custo de substituição preventiva por unidade de tempo.

Diversos modelos de inspeção existentes na literatura recorrem ao modelo de riscos proporcionais para modelar o risco de falha, utilizando como covariáveis os dados da condição do equipamento. Banjevic *et al.* (2001) utilizaram o modelo de riscos proporcionais para descrever a taxa de falhas de um sistema em deterioração sujeito a inspeções periódicas e determinam um limite de controlo para definir quando deverá ser efetuada a substituição preventiva de um item, com vista a minimizar o custo médio de substituição. Vlok *et al.* (2002) aplicaram o modelo de riscos proporcionais para determinar a política ótima de substituição de um item sujeito a monitorização das vibrações. Com vista a definir uma política ótima de substituição para um sistema com base na condição observada, Ghasemi *et al.* (2007) utilizaram o modelo de riscos proporcionais para representar a degradação do sistema e combinaram-no com um processo de decisão parcialmente observável de Markov. Tian *et al.* (2012) determinaram objetivos de custo e de fiabilidade com base no modelo de riscos proporcionais e calcularam o limite de risco que otimiza estes dois objetivos aplicando um modelo de programação multiobjectivo. Contudo, também foram identificados modelos que utilizam uma abordagem de otimização baseada em algoritmos genéticos. Marseguerra *et al.* (2002) investigaram o limite ótimo de degradação para diferentes componentes, combinando algoritmos genéticos e a simulação de Monte Carlo, com vista a maximizar a disponibilidade média do sistema e o lucro líquido durante o tempo de missão. Liu & Frangopol (2003) aplicaram um algoritmo genético que considera a condição, a segurança e o custo cumulativo de manutenção do ciclo de vida como funções objetivo para a otimização do planeamento da manutenção de pontes em deterioração. Tai & Chan (2010) propõem procedimentos de pesquisa numérica que contemplam duas situações: tempo esperado entre intervenções de manutenção determinístico e aleatório. Estes autores determinaram os valores ótimos para o limite de desgaste que indica a necessidade de realizar manutenção preventiva de um sistema com degradação contínua, considerando a maximização da disponibilidade como único objetivo. Zhu *et al.* (2015) desenvolveram um modelo para a minimização do custo médio de manutenção aplicado a um sistema multicomponente com deterioração estocástica. Com o mesmo objetivo, Fouladirad & Grall (2015) propõem uma regra de decisão de manutenção para um sistema sujeito a alteração na velocidade de deterioração. Estes autores utilizam um processo Gamma para descrever a deterioração do sistema. Rasmekomen & Parlikad (2016) apresentam uma abordagem destinada a otimizar a manutenção condicionada de sistemas multicomponente onde o estado de degradação de certos componentes pode afetar a degradação de outros componentes. Neste estudo, é aplicada uma técnica de pesquisa heurística designada de *Simulated Annealing*. Os autores aplicaram a abordagem desenvolvida para modelar as interações de degradação nas tubagens de uma instalação petroquímica.

A implementação de políticas de manutenção requer uma boa compreensão dos aspetos técnicos do equipamento a ser mantido (Murthy *et al.*, 2002). Nos sistemas formados por diversos componentes interdependentes, as interações entre componentes dificultam a modelação e a otimização da manutenção (Nicolai & Dekker, 2008). As relações de causa e efeito entre estes elementos são normalmente difíceis de captar devido à sua extensão, ao seu tempo de atraso, ou ao seu impacto invulgar nos padrões de comportamento do sistema. Assim, para compreender e localizar as causas da falha funcional de um equipamento, é necessário descrever as diferentes partes da sua estrutura, as várias subfunções e as possíveis causas da perda de função. Este conhecimento facilita a identificação e a atribuição de recursos adequados a cada situação específica (Márquez, 2007).

As políticas de manutenção têm um impacto elevado na capacidade operacional das empresas. Por isso, Kumar *et al.* (2013) e Pascual & Kumar (2016) salientam a importância de selecionar políticas apropriadas e a necessidade de avaliar a sua eficácia e eficiência.

O *Analytic Hierarchy Process* (AHP) é frequentemente utilizado para apoiar a seleção de políticas ou estratégias de manutenção de equipamentos industriais (Bevilacqua & Braglia, 2000; Labib, 2004; Maletič, Maletič, Lovrenčić, Al-Najjar, & Gomišček, 2014; Nezami & Yildirim, 2013; Wang, Chu, & Wu, 2007). Trata-se de um modelo de apoio à decisão baseada em múltiplos critérios. O AHP permite estabelecer prioridades para diferentes alternativas e para os critérios considerados na avaliação das alternativas (Saaty & Vargas, 2012). Segundo Wang *et al.* (2007), os critérios considerados, na maioria dos casos, podem ser classificados em quatro categorias: segurança, custo, valor acrescentado e viabilidade (Tabela 15).

Tabela 15 – Critérios considerados na seleção de políticas de manutenção (adaptado de Wang *et al.*, 2007).

Categoria	Descrição
Segurança	Segurança das pessoas, das instalações e do ambiente.
Custo	Envolve despesas com <i>hardware</i> , <i>software</i> e formação de pessoal.
Valor acrescentado	Depende da quantidade de sobressalentes em inventário, das perdas de produção e da rapidez na identificação de falhas.
Viabilidade	Depende da aceitação por parte dos funcionários e da fiabilidade da técnica.

2.2.10. Metodologias de gestão da manutenção

No planeamento da manutenção, são habitualmente utilizadas metodologias para apoiar a seleção de políticas de manutenção e orientar a sua implementação (Waeyenbergh & Pintelon, 2009). Estas

metodologias devem ser definidas de acordo com as necessidades específicas das empresas e podem basear-se em metodologias de planeamento já existentes (Pintelon & Parodi-Herz, 2008). Neste contexto, a metodologia de planeamento mais comum é o *Reliability Centered Maintenance* (RCM). Porém, ao longo dos anos, a função manutenção beneficiou com o desenvolvimento de diferentes metodologias e filosofias. Assim, a literatura científica apresenta uma grande variedade de conceitos relacionados com a manutenção.

Pintelon & Parodi-Herz (2008) identificam três gerações de conceitos relacionados com a manutenção. A primeira geração caracteriza-se pela implementação *ad hoc* de políticas de manutenção, sobretudo a manutenção corretiva e a manutenção baseada no uso. A utilização de diagramas de decisão *Quick and Dirty* (Q&D) marcou a transição para a segunda geração. Estes diagramas apoiam a tomada de decisão com base num conjunto de perguntas simples e estruturadas com resposta do tipo “sim” ou “não” (Pintelon & Parodi-Herz, 2008). Na segunda geração, surgiram conceitos, tais como o LCC, o *Total Productive Maintenance* (TPM) e o RCM. O LCC baseia-se na estimativa do custo total de um sistema durante o seu tempo de vida e serve de apoio ao planeamento das atividades logísticas relacionadas com a manutenção (ver subsecção 2.1.3) (Pintelon & Parodi-Herz, 2008). Esta metodologia pode ser utilizada para avaliar diferentes opções de manutenção (Lundgren *et al.*, 2018). O TPM é uma metodologia que visa otimizar a eficácia do equipamento, eliminar avarias e promover a manutenção autónoma realizada pelo operador do equipamento (ver subsubsecção 2.2.10.2) (Maletič *et al.*, 2014). Segundo a filosofia TPM, a eficácia do equipamento depende da disponibilidade, da eficiência do desempenho do equipamento e da qualidade do produto. O TPM é parte integrante da filosofia *Total Quality Management* (TQM) em diversas empresas. No entanto, o TPM não estabelece regras de decisão para definir políticas de manutenção e não considera custos e receitas (Waeyenbergh & Pintelon, 2002). A filosofia TPM é centrada nas pessoas, enquanto o RCM é centrado nos ativos (Harte, 2013). Assim, os dois conceitos podem complementar-se. O RCM apresenta uma metodologia para identificar ações de manutenção preventiva para as causas dominantes das falhas do equipamento tendo em consideração a viabilidade técnica e a eficácia de custos (ver subsubsecção 2.2.10.1) (Jiang, 2015). No âmbito do RCM, as iniciativas de manutenção são focadas sobretudo nos componentes ou unidades funcionais para os quais a fiabilidade assume maior relevância (Garg & Deshmukh, 2006). Murthy *et al.* (2002) e Garg & Deshmukh (2006) identificam as seguintes fragilidades comuns ao TPM e ao RCM: são abordagens essencialmente qualitativas; não consideram a carga de operação do equipamento e seu efeito no processo de degradação; não contemplam assuntos estratégicos de longo prazo; e não abordam questões relacionadas com a subcontratação da manutenção e os riscos associados.

Mais tarde, a necessidade de suprir lacunas apresentadas pelo TPM e RCM levou ao desenvolvimento de metodologias relacionadas. Al-Najjar (1996) desenvolveram o conceito *Total Quality Maintenance* (TQMMain). O TQMMain foca-se em manter e melhorar continuamente a eficácia técnica e económica dos elementos do processo produtivo, de modo a reduzir o custo por unidade de produto de boa qualidade. De acordo com Al-Najjar (1996), o TQMMain é um método para monitorizar e controlar desvios na condição do processo e qualidade do produto; para detetar as causas das falhas e as causas potenciais, com vista a intervir quando for possível para controlar e reduzir a taxa de deterioração do equipamento antes que as características do produto sejam afetadas de modo inaceitável; e para realizar as ações necessárias para restaurar o processo, equipamento ou um componente específico. Este conceito baseia-se na aquisição e análise de dados em tempo real, recomenda a integração de dados relativos ao processo produtivo numa base de dados comum e determina a eficiência global do processo com base na disponibilidade, taxa de qualidade e eficiência do desempenho do processo (Al-Najjar & Alsyouf, 2003). Segundo Lundgren *et al.* (2018), o TQMMain procura estender a utilização dos componentes e programar a manutenção preventiva fora dos períodos de maior atividade produtiva, tendo em conta a informação resultante da inspeção e da monitorização da condição do equipamento. Os princípios do RCM contribuíram para o desenvolvimento de duas metodologias alternativas: *Risk Based Centered Maintenance* (RBCM) e *Business Centered Maintenance* (BCM). O RBCM foi apresentado por Richard Jones em 1995 no livro *Risk-based Management: A Reliability Centered Approach*. Esta metodologia envolve a realização de inspeções e promove a compreensão atual e futura dos mecanismos de degradação do equipamento e dos riscos associados (Pintelon & Parodi-Herz, 2008). O objetivo é minimizar os perigos resultantes de falhas inesperadas do equipamento de um modo eficiente (Garg & Deshmukh, 2006). Em 1997, Anthony Kelly estabeleceu o conceito BCM e descreveu-o no livro *Maintenance Organizations & Systems: Business Centred Maintenance*. O BCM tem como finalidade maximizar o contributo da manutenção para a rentabilidade da organização (Waeyenbergh & Pintelon, 2002). Segundo Pintelon & Parodi-Herz (2008), esta metodologia envolve a definição dos objetivos da manutenção em função dos objetivos organizacionais, a definição de um plano de manutenção para os diversos equipamentos e o enquadramento dos planos estabelecidos numa estratégia de manutenção. Contudo, o BCM proporciona uma análise menos aprofundada das falhas do que o RCM (Pascual & Kumar, 2016).

Na terceira geração, surgiram as metodologias personalizadas. Estas metodologias têm em consideração as necessidades específicas de cada organização. O *Value Driven Maintenance* (VDM) e o *Centrum voor Industrieel Beleid Onderhouds Concept Ontwikkelings Framework* (CIBOCOF) são exemplos de

metodologias da terceira geração (Pintelon & Parodi-Herz, 2008). O VDM foi desenvolvido por Mark Haarman e Guy Delahay e é apresentado no livro *Value Driven Maintenance: New Faith in Maintenance*, publicado em 2004. Tem como objetivo otimizar o valor resultante dos investimentos em manutenção num momento específico. A metodologia utilizada é baseada em quatro fatores geradores de valor: a utilização dos ativos, a alocação de recursos, o controlo de custos, e a saúde, segurança e ambiente. No âmbito desta metodologia, é determinado o valor atual líquido associado a diferentes estratégias de manutenção, considerando os fluxos monetários futuros relativos a cada um dos fatores (Stenström *et al.*, 2013). O CIBOCOF foi criado no *Centre of Industrial Management (CIB)*, situado em K.U. Leuven, na Bélgica, no âmbito de uma parceria com a indústria. Trata-se de um conceito que fornece uma estrutura sistemática baseada no ciclo *Plan-Do-Check-Act (PDCA)* para conceber planos de manutenção personalizados. O seu ciclo iterativo permite elaborar planos de manutenção completos e é composto pelos módulos: iniciação, análise técnica e funcional, definição da política e otimização dos parâmetros, implementação e avaliação, e feedback (Waeyenbergh & Pintelon, 2009).

Apesar de existir uma tendência crescente para a definição de metodologias personalizadas, de acordo com Fraser *et al.* (2015), o RCM e o TPM continuam a ser abordados em diversos estudos. No âmbito de uma revisão da literatura científica relacionada com a manutenção, no período entre 1995 e 2010, estes autores constaram que o TPM é abordado em 57% das publicações, enquanto o RCM é referido em 28%. O estudo também conclui que a grande maioria dos artigos publicados oferecem contribuições meramente teóricas.

Dada a sua relevância na literatura científica relacionada com a função manutenção, o RCM e o TPM são descritos de forma mais detalhada nas subsubsecções 2.2.10.1 e 2.2.10.2, respetivamente.

2.2.10.1. Reliability Centered Maintenance (RCM)

O RCM teve origem na indústria da aviação na década de 1960, posteriormente foi implementado no setor da energia nuclear e atualmente é aplicado em diversos domínios da indústria (Kobbacy & Murthy, 2008). Segundo Moubrey (1997), o RCM consiste num processo utilizado para determinar os requisitos de manutenção de qualquer equipamento no seu contexto de operação. Procura determinar a política de manutenção mais apropriada para os itens e módulos de um sistema seguindo um procedimento estruturado (Saranga, 2002). O RCM define o que deve ser feito para alcançar os níveis desejados de segurança, fiabilidade, saúde ambiental e disponibilidade operacional ao melhor custo (Rausand, 1998). O principal objetivo do RCM é preservar a função do sistema e não apenas manter um equipamento em funcionamento (Jardine & Tsang, 2013). Aplica-se continuamente ao longo do ciclo de vida do sistema

(Millar, 2008) e requer a completa compreensão das funções dos equipamentos e da natureza das falhas relacionadas com essas funções (Jardine & Tsang, 2013).

O RCM é um processo lógico e estruturado que permite definir estratégias ótimas de gestão de falhas (tipos de manutenção), tendo em conta as características de fiabilidade do sistema e o contexto de operação pretendido (Millar, 2008). Foca-se na capacidade do sistema ter a fiabilidade esperada durante um certo período de tempo (Lee *et al.*, 2014). A sua aplicação serve de apoio ao desenvolvimento de um programa de manutenção preventiva, baseando-se no pressuposto de que a fiabilidade inerente do equipamento é uma função do projeto e da qualidade construída. Deste modo, uma eventual melhoria da fiabilidade poderá ser alcançada modificando o sistema (Rausand, 1998). A implementação do RCM contribui para aumentar o tempo de vida dos equipamentos e estabelecer ações de manutenção mais eficazes e eficientes (Kobbacy & Murthy, 2008). Assim, as ações de manutenção que não são economicamente viáveis não são realizadas (Jardine & Tsang, 2013).

Segundo Rausand (1998), uma análise RCM deve dar resposta às sete perguntas apresentadas na Tabela 16. Cada uma das questões está relacionada com um dos sete elementos fundamentais do RCM.

Tabela 16 – As sete perguntas do RCM e os respetivos elementos.

Perguntas	Elementos do RCM
1. Quais são as funções e padrões de desempenho associados ao equipamento no presente contexto operacional atual?	Funções
2. De que modo é que não cumpre as suas funções?	Falhas funcionais
3. O que causa cada falha funcional?	Modos de falha
4. O que acontece quando ocorre cada falha?	Efeitos das falhas
5. Qual a importância de cada falha?	Consequências das falhas
6. O que pode ser feito para prevenir ou prever cada falha?	Tarefas pró-ativas e intervalos das tarefas
7. O que deve ser feito se não puder ser encontrada uma tarefa pró-ativa adequada?	Ações predefinidas

No âmbito do RCM, o *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) é utilizado para realizar uma avaliação sistemática e padronizada de possíveis falhas, estabelecendo as suas consequências e guiando a adoção de ações preventivas ou corretivas (Souza & Álvares, 2008). As consequências das falhas determinam que recursos serão utilizados para prevenir a sua ocorrência (Carretero *et al.*, 2003). Segundo Jardine

& Tsang (2013), a implementação do RCM poderá ser realizada colocando em prática a sequência de etapas descritas na Tabela 17.

Tabela 17 – Etapas para a implementação do RCM (adaptado de Jardine & Tsang, 2013).

Etapa	Descrição
1. Selecionar e priorizar o equipamento	Os processos são analisados com o objetivo de identificar os principais equipamentos, posteriormente são definidas prioridades tendo em conta a sua criticidade para as operações, o custo de inatividade e o custo de reparação.
2. Definir funções e padrões de desempenho	As funções de cada equipamento são identificadas. Cada função tem um conjunto de limites que definem as condições normais de operação num ambiente específico.
3. Definir falhas funcionais	Considera-se que as falhas funcionais estão presentes quando o equipamento está a operar fora dos seus parâmetros normais. As falhas funcionais poderão ser totais ou parciais.
4. Identificar modos de falha/causas	Identifica-se a cadeia de eventos que acontecem quando uma falha ocorre. Deve investigar-se qual foi o evento que desencadeou a falha, tendo em conta que cada falha poderá ter mais do que uma causa.
5. Determinar os efeitos das falhas e consequências	Determina-se o que irá acontecer quando uma falha funcional ocorre e avalia-se a gravidade do efeito da falha na segurança, ambiente, operação e manutenção.
6. Selecionar as ações de manutenção	Utiliza-se uma árvore lógica de decisão para selecionar as ações de manutenção apropriadas para mitigar as falhas funcionais. Caso seja selecionada a manutenção baseada no tempo ou a inspeção periódica, a frequência tem de ser determinada de modo a otimizar os resultados.
7. Implementar e refinar o plano de manutenção	O plano definido na etapa anterior é implementado e os resultados são analisados para determinar se este necessita de ser aperfeiçoado ou modificado de modo a assegurar a sua eficácia.

Muitas ações de manutenção preventiva podem ser baseadas na condição do equipamento (manutenção condicionada) (Márquez, 2007). Caso sejam encontradas evidências de que uma falha está a desenvolver-se, é possível realizar ações para prevenir a falha ou evitar as suas consequências (Moubray, 1997). Segundo Jiang (2015), o RCM contempla os seguintes tipos de tarefas de manutenção:

- **Reparação ou renovação programada:** envolve a reparação ou renovação de um item quando falha;
- **Manutenção preventiva sistemática:** refere-se à substituição de um item com base na idade ou em intervalos de tempo fixo (substituição em bloco);

- **Tarefa preditiva:** utiliza a monitorização da condição e a previsão de falhas para determinar o momento da manutenção preventiva;
- **Tarefa de deteção:** geralmente implica a implementação de uma estratégia de inspeção destinada a encontrar falhas ocultas.

No âmbito do RCM, as iniciativas de manutenção são focadas sobretudo nos componentes ou unidades funcionais para os quais a fiabilidade assume maior relevância (Garg & Deshmukh, 2006). Quando a política selecionada é baseada na idade, a informação requerida para a definição da política geralmente é obtida a partir de dados de falha e experiência operacional. No entanto, é necessário ter em conta que as causas das falhas podem alterar-se durante o funcionamento do equipamento, devido a perturbações nas condições ambientais e de operação, que não podem ser totalmente previstas (Al-Najjar & Alsyouf, 2003).

A implementação do RCM envolve um nível de dificuldade elevado. De acordo com Waeyenbergh & Pintelon (2002), o conceito de RCM descrito na literatura é complexo. Por este motivo, muitas empresas têm dificuldades na sua interpretação. Assim, é fundamental que as empresas sejam capazes de desenvolver uma metodologia de planeamento da manutenção específica, adaptada às suas necessidades e ao seu contexto.

A revisão da literatura permitiu constatar que existem poucos estudos publicados sobre a aplicação prática do RCM. Deshpande & Modak (2002), Carretero *et al.* (2003) e Afefy (2010) são alguns dos autores que apresentam estudos neste domínio. Apesar de o RCM definir etapas de implementação, estes autores descrevem a implementação do RCM em casos práticos com base num conjunto distinto de etapas definidas previamente. Esta circunstância poderá ser motivada por diferentes interpretações da metodologia RCM ou pela necessidade de a adaptar de acordo com as características do estudo e do seu contexto. Nos estudos apresentados, também é demonstrada a utilização de ferramentas de análise destinadas a apoiar a implementação do RCM, nomeadamente FMEA e árvore lógica de decisão. No entanto, a análise de árvore de falhas ou *Fault Tree Analysis* (FTA) também pode ser aplicada no âmbito do RCM para abordar aspetos de segurança e de fiabilidade, visto que esta ferramenta permite identificar as causas raiz dos modos de falha de um sistema (Ruijters *et al.*, 2016).

2.2.10.2.Total Productive Maintenance (TPM)

O TPM é uma filosofia destinada a melhorar o desempenho (eficácia e eficiência) dos equipamentos e dos funcionários de uma organização. Começou a ser desenvolvido no Japão durante a década de 1950. A sua evolução foi gradual e motivada pela necessidade de apoiar a filosofia TQM e iniciativas *Lean*

manufacturing em sistemas produtivos *Just In Time* (JIT). Considerava-se que era fundamental manter adequadamente os equipamentos produtivos para fabricar produtos com um nível de qualidade elevado. Inicialmente, o TPM visava sobretudo implementar ações de manutenção preventiva baseadas em recomendações dos fornecedores do equipamento, de modo a evitar perdas de produção. Na década de 1960, emergiu o conceito de manutenção produtiva, cujo principal objetivo é maximizar a eficácia dos equipamentos. Neste período, as questões relacionadas com a fiabilidade, manutenção e eficiência económica na conceção do equipamento adquiriram uma preponderância maior. A partir da década de 1970, o TPM tornou-se uma estratégia abrangente, baseada na participação “total” dos funcionários de uma organização (Wireman, 2004).

A empresa Japonesa *Nippon Denso Company*, um fornecedor da *Toyota Motor Company*, foi pioneira na implementação do TPM. Em 1971, os sucessos alcançados valeram-lhe a distinção com o *Plant Prize*, atribuído pelo *Japan Institute of Plant Management* (JIPM) (Ahuja & Khamba, 2008b; Lazim & Ramayah, 2010). Desde então, diversas empresas de todo o mundo adotaram o TPM com vista a maximizar o aproveitamento dos seus ativos e para assim se tornarem mais competitivas (Chen, 2013; Mwanza & Mbohwa, 2015; Wireman, 2004).

O TPM converteu-se num dos programas de melhoria mais utilizados pelas empresas industriais (Aspinwall & Elgharib, 2013; Jiang, 2015). A sua implementação é muitas vezes realizada em combinação com outros sistemas de melhoria organizacional, tais como o TQM, o *Lean Manufacturing*, o Seis Sigma ou as normas ISO, para suprir algumas das suas lacunas. No entanto, as semelhanças, as diferenças e a relação entre o TPM e estes sistemas ainda são pouco compreendidas pelas empresas, originando alguns equívocos na sua implementação (Aspinwall & Elgharib, 2013).

As três palavras que formam a sigla TPM podem ser interpretadas do seguinte modo (Mwanza & Mbohwa, 2015):

- **Total:** significa a participação de todos os indivíduos de uma organização, desde a gestão de topo até ao chão de fábrica;
- **Productive:** representa ausência de desperdício nas atividades produtivas, e a produção de bens e serviços que satisfazem ou excedem as expectativas dos clientes;
- **Maintenance:** pressupõe manter sempre os equipamentos em boas condições de funcionamento, iguais ou melhores do que as condições originais.

De acordo com Ahuja & Khamba (2008b), o TPM é uma metodologia de melhoria orientada para a produção, destinada a otimizar a fiabilidade dos equipamentos e a assegurar uma gestão eficiente dos mesmos, com base no envolvimento e capacitação das pessoas, e na ligação entre as funções de produção, manutenção e engenharia. A implementação do TPM permite que as empresas melhorem os seus processos de modo uniforme (Andersson *et al.*, 2015), tirando partido de sinergias entre as diferentes funções organizacionais (Park & Han, 2001; Sharma *et al.*, 2006).

Fedele (2011) salienta que o esforço no sentido de aproximar a produção e a manutenção é um contributo valioso do TPM. Segundo este autor, o TPM baseia-se em três princípios fundamentais:

- **Prevenção:** sobretudo com base na monitorização;
- **Melhoria contínua:** caracterizada por uma atitude dinâmica orientada para a investigação contínua das causas das avarias e das intervenções de manutenção, e para a eliminação das causas identificadas;
- **Autossuficiência:** o operador tende a desenvolver diretamente todas as atividades elementares de inspeção e manutenção do equipamento que opera.

No âmbito do TPM, são consideradas questões relacionadas com a conceção, a manutenção e a operação dos ativos de uma organização (Ahuja & Khamba, 2008a). O TPM pressupõe que a função manutenção é gerida de acordo com um plano global de manutenção que visa integrar diversos planos de manutenção específicos relativos a equipamentos já existentes, as características da instalação que irão determinar as especificações de projeto e as especificações dos sistemas de apoio logístico para a implementação de novos equipamentos produtivos (Fedele, 2011).

O TPM requer a definição de um sistema de manutenção preventiva para todo o ciclo de vida dos equipamentos (Jain *et al.*, 2014). Para esse efeito, devem ser mantidos registos detalhados sobre cada equipamento, de modo a obter informação que permita a alocação eficiente de recursos ao longo do tempo (Méndez & Rodriguez, 2017). No âmbito da manutenção preventiva, é dada particular importância à aplicação das políticas baseadas na condição do equipamento (Fedele, 2011; Lazim & Ramayah, 2010). O TPM também promove a prevenção da manutenção e a melhoria da manutibilidade, com base no conhecimento e cooperação dos operadores, técnicos e fabricantes. A prevenção da manutenção é uma abordagem criada na década de 1960. Destina-se a assegurar operações “livres de problemas” nos sistemas produtivos vigentes ou futuros, integrando conhecimentos relacionados com as falhas iniciais dos equipamentos, defeitos dos produtos, e recomendações das pessoas envolvidas nas atividades de produção e comerciais, e dos clientes (Ahuja & Khamba, 2008b).

O TPM distingue-se sobretudo pela sua cultura inovadora, visto que as técnicas que utilizada não são novas. Embora o TPM reconheça a necessidade de aplicar diferentes estratégias e técnicas para dar resposta a necessidades de manutenção distintas dos equipamentos (Fedele, 2011), não estabelece regras para decidir que política de manutenção deve ser utilizada em cada situação (Almeida *et al.*, 2015; Waeyenbergh & Pintelon, 2002). Dada a sua natureza holística, diversos autores consideram o TPM uma filosofia. Contudo, não existe na literatura uma classificação consensual.

➤ **Pilares do TPM**

A implementação do TPM é um processo gradual que requer a alteração da cultura organizacional e a reestruturação do trabalho (Attri *et al.*, 2014; Park & Han, 2001; Smith & Mobley, 2007). Por isso, são necessários o apoio e a capacidade mobilizadora da gestão de topo, e compromisso de longo prazo de todos os funcionários da organização (Andersson *et al.*, 2015). O TPM estabelece um número reduzido de níveis de autoridade organizacional (Sharma *et al.*, 2006) e promove o trabalho de equipa com base na criação de pequenos grupos de atividade autónomos (Jain *et al.*, 2014). Por isso, os fatores humanos assumem uma grande importância na implementação e sustentação das iniciativas relacionadas com o TPM (Singh & Ahuja, 2015).

Segundo Ahuja & Khamba (2008a), os aspetos humanos devem ser considerados em combinação com os impactos técnicos e financeiros relacionados. A existência de operadores preparados e motivados para resolverem problemas no seu local de trabalho contribui decisivamente para a redução das perdas de produção (Méndez & Rodriguez, 2017). Deste modo, a formação adequada dos funcionários e a sua participação nas decisões relacionadas com a manutenção são fundamentais para a implementação bem-sucedida do TPM. Além disso, deve ser criada uma cultura organizacional solidária que promova a aprendizagem contínua e a cooperação (Park & Han, 2001). Tendo em conta que o TPM tem impacto em toda a organização, os objetivos do TPM devem ser completamente integrados no planeamento estratégico e de negócio das empresas. Só assim é possível realizar plenamente o potencial da sua implementação (Ahuja & Khamba, 2008b).

As iniciativas fundamentais do TPM podem ser classificadas em oito categorias ou pilares sugeridos pelo JIMP (Figura 22) (Ahuja & Khamba, 2008b; Andersson *et al.*, 2015). Estes pilares devem ser desenvolvidos por equipas de trabalho e coordenados pelos líderes de cada equipa (Almeida *et al.*, 2015). É essencial que as empresas sejam capazes de utilizar eficazmente pilares em diferentes circunstâncias para promover o envolvimento dos seus colaboradores em todas as etapas do processo produtivo e da manutenção dos equipamentos (Ahuja & Khamba, 2008a). A sua aplicação contribui para consolidar

diferentes abordagens de manutenção preventiva e preditiva adotadas pelas empresas (Lazim & Ramayah, 2010), melhorando assim o desempenho geral da função manutenção.

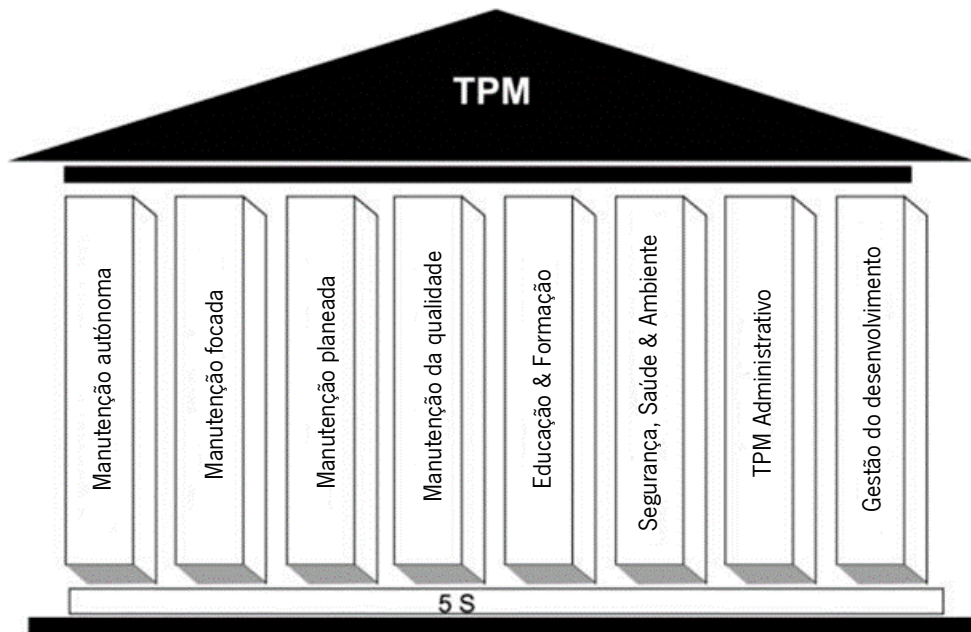


Figura 22 – Representação dos oito pilares do TPM (adaptado de Andersson *et al.* 2015).

Os oito pilares estabelecem uma abordagem conjunta para a implementação do TPM numa organização. Na Tabela 18, é apresentada uma descrição de cada um dos oito pilares do TPM.

Tabela 18 – Descrição dos oito pilares do TPM (adaptado de Agustiady & Cudney, 2018).

Pilar	Descrição
Manutenção autônoma	Os operadores devem realizar ações de manutenção de rotina do equipamento produtivo que operam, nomeadamente limpeza, lubrificação, inspeção, e pequenos ajustes e reparações. O desempenho destas ações permite que o operador melhore o seu conhecimento sobre o equipamento, contribui para prevenir processos de deterioração e para identificar e corrigir anomalias ou falhas potenciais. Pretende-se assim alcançar o objetivo “zero avarias”.
Manutenção focada	Envolve a criação de equipas multifuncionais de 6 a 8 pessoas, destinadas a remover defeitos e a melhorar continuamente o desempenho do equipamento. Os problemas mais comuns são identificados e as suas causas analisadas, com vista a evitar que se voltem a verificar.
Manutenção planejada	A manutenção dos equipamentos é programada de acordo com a taxa de falhas. Deste modo, pretende-se reduzir a indisponibilidade não planejada do equipamento e realizar as ações manutenção fora dos ciclos produtivos planejados.
Manutenção da qualidade	A qualidade da produção é mantida identificando erros nos processos produtivos e aplicando técnicas destinadas a prevenir a sua ocorrência. Envolve o desenvolvimento de uma cultura “zero defeitos” e o estabelecimento de projetos de melhoria da qualidade.

Pilar	Descrição
Educação e formação	Deve ser proporcionada formação sobre o TPM aos operadores, técnicos de manutenção e gestores. Os operadores também devem ser dotados dos conhecimentos necessários para poderem realizar corretamente as ações de manutenção de rotina e os técnicos de manutenção devem adquirir competências sobre manutenção pró-ativa e preventiva. Por sua vez, os gestores devem ser preparados para capacitar, desenvolver e formar os seus funcionários.
Segurança, saúde e ambiente	Destina-se a garantir um ambiente de trabalho seguro e sustentável, e eliminar potenciais riscos de saúde e de segurança. O objetivo primordial é garantir um local de trabalho livre de acidentes.
TPM administrativo	Estabelece a aplicação das técnicas do TPM às atividades administrativas de uma empresa, nomeadamente o processamento de encomendas, a aquisição de bens e serviços e o escalonamento de tarefas. A melhoria de desempenho das atividades administrativas tem um impacto positivo na produção, devido à sua função de suporte.
Gestão do desenvolvimento	Baseia-se na compreensão e no conhecimento prático do processo produtivo para apoiar iniciativas destinadas a melhorar a conceção do equipamento. A instalação de novos equipamentos é precedida por uma avaliação prática e conta com o envolvimento e entendimento dos funcionários. Deste modo, os problemas de iniciação são menos frequentes e a manutenção torna-se mais simples e robusta.

Os pilares do TPM são suportados pela filosofia 5S. A denominação 5S deve-se aos cinco conceitos que lhe estão associados, cujas designações, em japonês, começam com a letra S: *Seiri* (triagem), *Seiton* (ordenação), *Seisou* (limpeza), *Seiketsu* (standardização) e *Shitsuke* (autodisciplina). O 5S foi desenvolvido e formalmente introduzido no Japão na década de 1960. A primeira empresa a implementar o 5S foi a *Toyota Motor Corporation*, onde viria a tornar-se parte integrante do seu sistema produtivo. Depois da sua aceitação pelas empresas japonesas, as práticas 5S ganharam notoriedade a nível mundial, em diversos setores de atividade. Em geral, o 5S é uma filosofia sistemática para garantir organização, limpeza e normalização no local de trabalho (Randhawa & Ahuja, 2017). Requer o esforço conjunto dos funcionários no sentido de criar um ambiente de trabalho agradável, seguro e produtivo (Harte, 2013).

A adoção do TPM tem permitido a várias empresas obter vantagens competitivas (Aspinwall & Elgharib, 2013). Os principais benefícios esperados da implementação do TPM são a redução dos custos de operação, o aumento do tempo de vida do equipamento, a diminuição dos custos globais de manutenção (Ahuja & Khamba, 2008a), o aumento da produtividade, a melhoria da qualidade e das condições de trabalho, e mudanças favoráveis na atitude dos colaboradores (Andersson *et al.*, 2015). No entanto, a implementação plena do TPM é considerada uma tarefa difícil (Ahuja & Khamba, 2008a; Attri *et al.*, 2014), pois exige um nível elevado de competências. As pessoas têm de compreender o conceito, as

práticas e os termos que lhe estão associados. Além disso, são comuns as dificuldades para definir o método mais apropriado (Aspinwall & Elgharib, 2013) e existem diferentes interpretações sobre o modo como a implementação deve ser realizada (Almeida *et al.*, 2015).

Segundo Smith & Mobley (2007), o desenvolvimento sistemático e a completa implementação do TPM requer um programa com a duração de três anos. Andersson *et al.* (2015) salientam que o investimento inicial necessário para a implementação do TPM é elevado e que o retorno não é imediatamente visível. Assim, as alterações resultantes da adoção do TPM devem ser medidas e monitorizadas, de modo a verificar o sucesso das iniciativas implementadas e analisar a necessidade de realizar melhorias (Piechnicki *et al.*, 2015).

➤ **Overall Equipment Effectiveness**

O sucesso da implementação do TPM é geralmente avaliado tendo em conta o valor do *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) (Chen, 2013; Gupta & Vardhan, 2016; Singh *et al.*, 2013). O OEE é utilizado para medir a eficácia dos equipamentos individualmente ou de um sistema produtivo (Sharma *et al.*, 2006). É calculado com base no produto dos valores relativos à disponibilidade, desempenho e taxa de qualidade dos produtos fabricados. O valor do OEE é habitualmente apresentado em percentagem. As expressões matemáticas utilizadas no cálculo do OEE e dos indicadores que lhe estão associados são as seguintes (Wang & Lee, 2001):

$$\text{OEE} = \text{Disponibilidade} \times \text{Desempenho} \times \text{Taxa de qualidade} \quad (2.10)$$

Onde

$$\text{Disponibilidade} = \frac{\text{Tempo de carga} - \text{Tempo de indisponibilidade}}{\text{Tempo de carga}} \quad (2.11)$$

$$\text{Desempenho} = \frac{\text{Tempo de ciclo teórico} \times \text{Quantidade produzida}}{\text{Tempo de operação}} \quad (2.12)$$

$$\text{Taxa de qualidade} = \frac{\text{Quantidade produzida} - \text{Quantidade de unidades defeituosas}}{\text{Quantidade produzida}} \quad (2.13)$$

Em que,

- O “Tempo de carga” corresponde ao tempo de operação do equipamento planeado;
- O “Tempo de indisponibilidade” resulta da soma dos tempos relativos às paragens não planeadas do equipamento;

- O “Tempo de ciclo teórico” é o tempo mínimo necessário para produzir uma unidade de produto;
- O “Tempo de operação” resulta da diferença entre o “Tempo de carga” e a soma dos tempos relativos a todas as paragens do equipamento (planeadas e não planeadas);
- A “Quantidade produzida” é o número de unidades produzidas no período considerado;
- A “Quantidade de unidades defeituosas” é o número de unidades produzidas no período considerado que apresentam um ou mais defeitos.

O OEE permite obter uma perspetiva abrangente das perdas evidenciadas pelos equipamentos produtivos (Muchiri *et al.*, 2011). No seu conjunto, os três fatores considerados no cálculo do OEE agregam as seis grandes perdas de capacidade do equipamento identificadas pela filosofia TPM (Figura 23). As “falhas do equipamento” e as “perdas de configuração e de ajuste” afetam a disponibilidade. A “morosidade e pequenas paragens” e a “redução de velocidade” têm impacto no desempenho do equipamento. Por fim, os “defeitos no processo” e “defeitos no reinício” influenciam a taxa de qualidade. Os “defeitos no reinício” ocorrem entre o instante em que o equipamento começa a operar e o momento em que o seu funcionamento estabiliza. Quando se pretende avaliar a utilização dos equipamentos relativamente ao tempo total disponível, pode ser determinado o *Overall Plant Effectiveness* (OPE). Este indicador também considera perdas relacionadas com a manutenção planeada e com o controlo da produção (Ahuja & Khamba, 2008b).

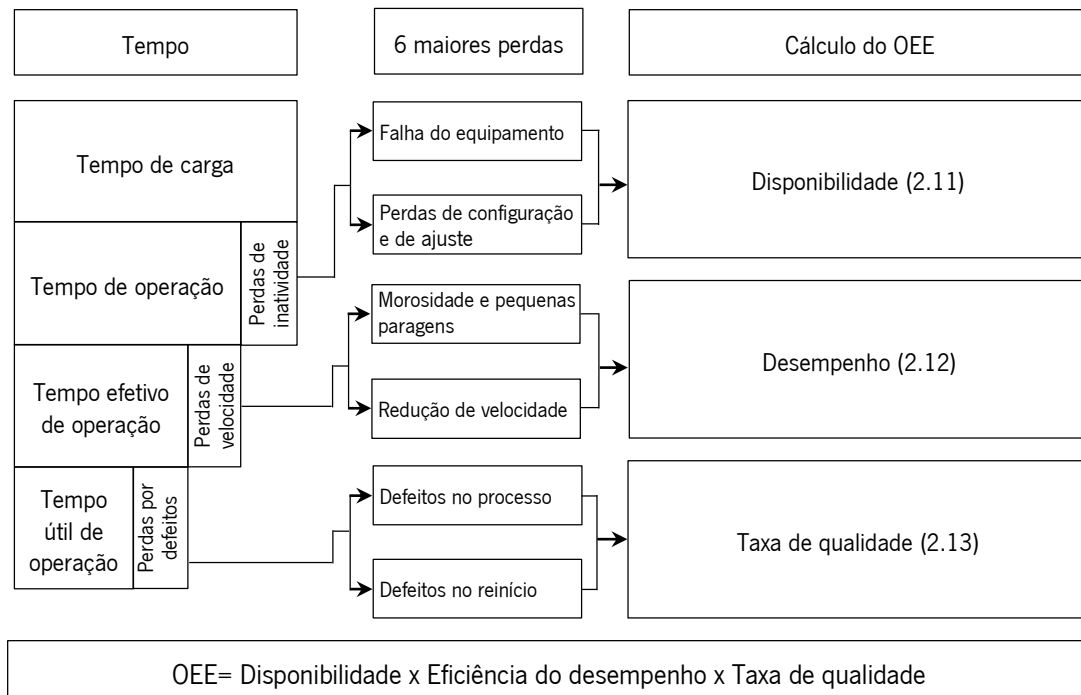


Figura 23 – Representação das seis grandes perdas de produção (adaptado de Ahuja & Khamba, 2008c).

Waeyenbergh & Pintelon (2002) defendem que o OEE não permite efetuar uma análise completa do impacto do TPM numa organização, visto que não tem em consideração os custos e as receitas obtidas. Segundo Kutucuoglu & Hamali (2001), o OEE proporciona um ponto de partida para o desenvolvimento de variáveis quantitativas destinadas a relacionar o desempenho da função manutenção com a estratégia corporativa. No entanto, a função manutenção não é responsável por todas as perdas de capacidade do equipamento. Por exemplo, o tempo de configuração do equipamento e o tempo de inatividade devido a demora no abastecimento do processo produtivo geralmente são influenciados por outros fatores (Muchiri *et al.*, 2011).

2.2.11. Análise crítica da literatura

A revisão da literatura sobre a gestão da manutenção permitiu analisar algumas das políticas de manutenção corretiva e preventiva mais comuns. No que diz respeito à manutenção preventiva, as políticas têm associados modelos matemáticos destinados a otimizar um ou mais critérios face a objetivos predefinidos. Alguns dos critérios mais utilizados neste domínio são o custo da manutenção, a disponibilidade, a fiabilidade e a segurança. Também foram identificados estudos que apresentam políticas mais específicas, que empregam modelos para descrever o processo de deterioração de um item e abordam a definição de intervalos de inspeção e de limites que indicam a necessidade de efetuar manutenção preventiva. No entanto, a aplicação prática destas políticas é pouco frequente, sobretudo devido ao nível de complexidade dos equipamentos.

A seleção da política de manutenção é geralmente baseada na criticidade dos equipamentos. Assim, os equipamentos ou componentes devem ser classificados de acordo com a sua criticidade, tendo em conta o impacto da falha. Para os equipamentos ou componentes mais críticos, devem ser definidas políticas de manutenção que permitam evitar a falha funcional, com o custo mais baixo possível.

Também foi possível verificar que vários autores reconhecem a importância da utilização de metodologias de planeamento da manutenção, destinadas a apoiar a definição e a implementação de políticas de manutenção. Estas metodologias podem ser baseadas no RCM. Apesar do RCM fornecer uma metodologia para identificar ações de manutenção preventiva para as causas dominantes das falhas do equipamento, a sua implementação pode tornar-se uma tarefa complexa e dispendiosa. Por isso, a implementação do RCM não é acessível para a maioria das empresas. Deste modo, a alternativa passa por desenvolver metodologias de planeamento da manutenção mais simples e específicas que possam contribuir para minimizar o custo global da manutenção nas empresas e que estejam alinhadas com os objetivos organizacionais.

2.3. Manutenção condicionada

As empresas industriais estão cada vez mais dependentes da disponibilidade e do desempenho do seu equipamento para permanecerem competitivas. Esta circunstância requer ações de manutenção precisas e oportunas que estejam alinhadas com os objetivos organizacionais. Neste contexto, a recolha e análise de dados relevantes sobre a condição do equipamento permite obter informação útil para a tomada de decisão de manutenção.

O movimento global de modernização originado pela Indústria 4.0 promoveu o desenvolvimento das tecnologias da informação e comunicação. Por isso, as tecnologias subjacentes à IoT e aos CPS estão a tornar-se cada vez mais prevalentes nas empresas (Diez-Olivan *et al.*, 2019). Atualmente, os equipamentos industriais dispõem habitualmente de dispositivos de medição incorporados que permitem recolher uma grande quantidade e variedade de dados de funcionamento em tempo real. Em alternativa, podem ser estabelecidos sistemas personalizados de aquisição de dados utilizando sensores apropriados ou dispositivos de teste. Se estes dados forem selecionados e analisados adequadamente, é possível obter informação sobre o estado do equipamento ou de um componente específico. Posteriormente, esta informação pode ser utilizada para programar ações de manutenção apropriadas.

Um objetivo comum das empresas é prever comportamentos irregulares que podem afetar os seus equipamentos, ferramentas e processos, de modo a empreender ações que permitam evitar perdas económicas e acidentes (Diez-Olivan *et al.*, 2019). As previsões do estado futuro podem ser realizadas considerando a condição atual e dados do histórico do equipamento. No entanto, a observação direta dos dados recolhidos com o auxílio de sensores ou dispositivos de teste geralmente não permite tirar ilações sobre a condição do sistema ou de um componente específico. Por isso, a informação necessária para avaliar o estado atual e prever o comportamento futuro, muitas vezes, resulta de um processo complexo que envolve a preparação, a transformação e a modelação de dados originais relativos a uma ou mais variáveis de interesse. Para esse efeito, podem ser adotadas e combinadas diferentes teorias e técnicas de análise existentes (Ahmad & Kamaruddin, 2012b). Além disso, a aplicação contínua e eficiente dos resultados da monitorização da condição depende da utilização de uma abordagem de manutenção apropriada que forneça as ferramentas necessárias para identificar áreas problemáticas; obter informação relevante; planear a aquisição, gestão e análise de dados; tomar decisões de manutenção; e planear e executar ações de manutenção de modo eficiente (Al-Najjar, 2012).

2.3.1. O conceito de manutenção condicionada

O conceito de manutenção condicionada ou *Condition-Based Maintenance* (CBM) foi introduzido nos Estados Unidos pela empresa ferroviária *Rio Grande Railway Company* no final da década de 1940. A sua aplicação destinava-se a detetar fugas de líquido de refrigeração, óleo e combustível nas locomotivas, tendo em conta alterações de temperatura e pressão. Inicialmente, a iniciativa foi designada “manutenção preditiva”. Nas décadas que se seguiram, a manutenção condicionada passou a abranger uma variedade cada vez maior de técnicas e o seu âmbito de aplicação tornou-se mais vasto. A utilização de técnicas de monitorização da condição permitiu obter ganhos de eficiência e redução de custos na indústria automóvel, aeroespacial, química, militar, entre outras (Prajapati *et al.*, 2012). As técnicas mais frequentemente utilizadas são descritas na Tabela 19.

Tabela 19 – Técnicas de monitorização da condição (adaptado de Smith & Mobley, 2007 e Ahmad & Kamaruddin, 2012a).

Técnica	Descrição
Monitorização de vibrações	É a técnica de monitorização da condição mais utilizada em contexto industrial. Visa sobretudo detetar danos ou degradação em equipamentos rotativos (ex.: rolamentos e caixas de velocidades). Os dados são adquiridos recorrendo a sensores de vibração instalados no equipamento para registar movimentos locais. A gama de frequência monitorizada situa-se entre 1 e 30.000 Hz. Quando são medidas baixas frequências, a precisão dos dados pode ser afetada pelo ruído eletrónico do equipamento e pelas características de resposta do transdutor.
Monitorização acústica	Tem como finalidade monitorizar a frequência do ruído resultante do funcionamento do equipamento recorrendo a sensores acústicos. É utilizada para monitorizar frequências acima dos 30.000 Hz. Permite, por exemplo, detetar fugas de líquidos ou gases em recipientes pressurizados e medir os níveis de ruído ambiente.
Monitorização do óleo	Visa avaliar as propriedades físicas e químicas do óleo (lubrificante, hidráulico e dielétrico) e detetar a presença de partículas resultantes do desgaste dos componentes com os quais o óleo está em contato durante a sua utilização (elétricos ou mecânicos). Permite verificar se o óleo cumpre os requisitos de qualidade exigidos para continuar a ser utilizado no equipamento e determinar o nível de desgaste dos componentes lubrificados. O nível de desgaste é evidenciado pela forma, composição, tamanho e quantidade das partículas identificadas.
Monitorização elétrica	Envolve a medição de alterações de propriedades do equipamento, tais como a resistência, a condutividade, a rigidez dielétrica e potencial. Permite, por exemplo, detetar a deterioração do isolamento elétrico e barras partidas no rotor do motor.
Monitorização da temperatura (termografia)	Baseia-se sobretudo na monitorização da emissão de energia ou radiação infravermelha. É frequentemente aplicada para identificar falhas em componentes elétricos e eletrónicos. A deteção de alterações de temperatura permite localizar e determinar uma grande variedade de anomalias numa fase inicial. Tendo em conta que só a energia emitida deve ser considerada, a energia refletida e a energia transmitida devem ser filtradas dos dados obtidos. O efeito negativo da atmosfera envolvente também deve ser minimizado (ex.: vapor de água, poeira, iluminação).

Técnica	Descrição
Monitorização da condição física	Foca-se na identificação de alterações físicas dos materiais, designadamente fissuras e corrosão. Esta técnica é utilizada sobretudo na indústria da construção e é realizada <i>off-line</i> .
Monitorização do desempenho	É utilizada para prever problemas monitorizando alterações em parâmetros, tais como a pressão, o fluxo e o consumo de energia elétrica.

A manutenção condicionada é um subtipo da manutenção preventiva. O principal objetivo da manutenção condicionada é recomendar decisões de manutenção com base em informação obtida através da monitorização da condição do equipamento ou de um item específico (Jardine *et al.*, 2006). Por isso, a eficácia das decisões de manutenção condicionada depende da precisão do processo de monitorização (Ayo-Imoru & Cilliers, 2018).

Os rápidos avanços verificados no domínio das tecnologias de informação e comunicação facilitam a aplicação de práticas de manutenção condicionada (Alaswad & Xiang, 2017). Hoje em dia, é possível tomar decisões de manutenção, com base em informação extraída a partir de dados recolhidos em tempo real por diversos dispositivos de medição, durante o funcionamento do equipamento. Esta realidade é evidenciada pelo modo como o conceito de manutenção condicionada é descrito na literatura mais recente (Tabela 20).

Tabela 20 – Definição do conceito de manutenção condicionada.

Definição	Autor
Estratégia de tomada de decisão para permitir o diagnóstico de falhas iminentes em tempo real e o prognóstico do estado de saúde futuro do equipamento, em que a decisão de realizar manutenção é definida observando a condição do sistema e dos seus componentes.	Peng <i>et al.</i> (2010)
Política que permite realizar ações de manutenção antes que as falhas aconteçam, avaliando a condição do ativo e o ambiente de operação, e prevenindo o risco de falha em tempo real, com base em dados recolhidos sobre o ativo em questão.	Shin & Jun (2015)
Estratégia destinada a recolher e avaliar informação em tempo real, e a recomendar decisões de manutenção com base na situação atual do sistema.	Alaswad & Xiang (2017)

De acordo com Guillén, Crespo, Gómez, *et al.* (2016), o objetivo da manutenção condicionada é controlar os modos de falha de um equipamento. Por isso, quando se pretende monitorizar a condição do equipamento ou dos seus componentes individualmente devem ser considerados todos os modos de falha potenciais que podem resultar em perdas financeiras (Al-Najjar, 2012). A manutenção condicionada baseia-se no pressuposto de que muitas falhas não ocorrem instantaneamente, sendo possível detetar o

seu aparecimento na fase de deterioração. O objetivo é determinar o momento exato em que a ação de manutenção deve ser efetuada e identificar a ação mais adequada (Ahmad & Kamaruddin, 2012a). Em geral, a durabilidade de um componente ou sistema será superior, se for possível prevenir desvios relativamente ao seu funcionamento normal (Prajapati *et al.*, 2012). A curva P-F (Figura 24) pode ser utilizada para representar a vida útil restante ou *Remaining Useful Life* (RUL) de um componente, considerando um modo de falha específico (Bousdekis, Magoutas, *et al.*, 2015).

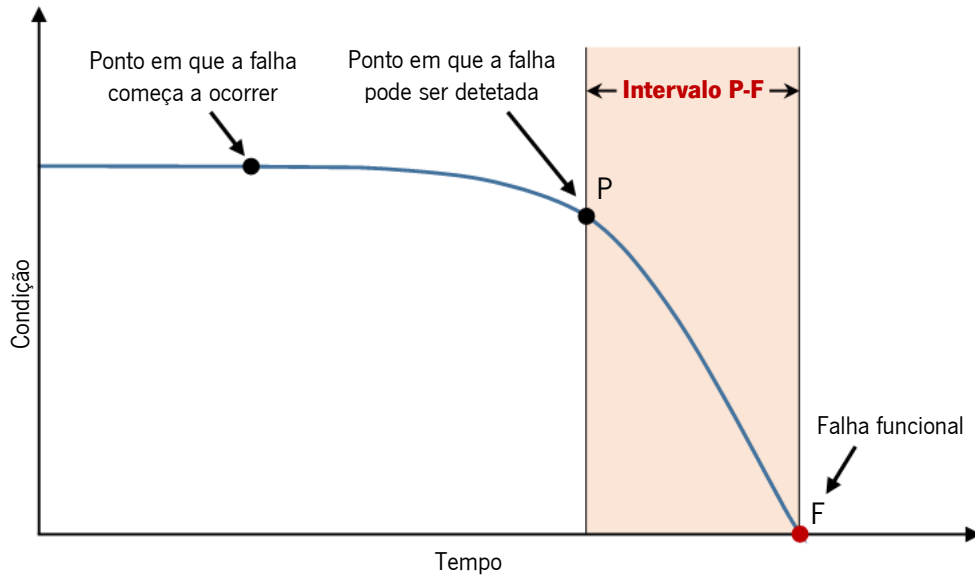


Figura 24 – Curva P-F (adaptado de Moubray, 1997).

A curva P-F mostra a evolução da condição ou do desempenho do componente monitorizado entre o instante em que a falha potencial pode ser identificada (P) e o instante em que se verifica a falha funcional (F). Assim, o tempo disponível para a realização de uma ação de manutenção apropriada está limitado a este intervalo. O intervalo P-F pode ser representado em diferentes unidades, tais como tempo de operação, número de ciclos de trabalho, unidades produzidas, etc. Segundo Moubray (1997), geralmente, é suficiente verificar a condição do componente com uma frequência igual a metade do intervalo P-F. No entanto, é importante considerar que a progressão dos modos de falha é, muitas vezes, influenciada por alterações das condições de operação, ações de manutenção, ou pela presença de outros modos de falha (Sikorska *et al.*, 2011).

Em geral, as falhas de desgaste são precedidas por uma diminuição gradual do desempenho do componente afetado (Jun & Kim, 2017). Neste caso, a aplicação de técnicas de manutenção condicionada permite que um componente possa continuar a ser utilizado enquanto tiver capacidade para alcançar o nível de desempenho pretendido. Assim, a reparação ou a substituição de um determinado componente são realizadas quando o desempenho medido for inferior a um limite

predeterminado (Prajapati *et al.*, 2012). Na literatura, este limite é designado de limite de aviso e pode ser calculado em relação a uma variável (ou parâmetro) simples ou composta representativa da degradação do componente. As variáveis compostas ou indicadores da condição resultam da combinação de diversas variáveis simples (Jiang, 2013). O limite de aviso é habitualmente definido com base na experiência, na análise de dados do passado e em normas recomendadas (Si *et al.*, 2011).

Quando são utilizados modelos de otimização para modelar o processo de deterioração de um componente, o limite de aviso é geralmente uma variável de decisão do modelo adotado. A ação de manutenção correspondente é planeada se o nível de deterioração exceder o limite de aviso considerado e deve ser realizada antes que a falha se verifique. Por isso, a aplicação da manutenção condicionada requer um planeamento dinâmico das ações de manutenção (De Jonge *et al.*, 2017; Niu *et al.*, 2010). A falha ocorre depois de um determinado nível de deterioração ter sido alcançado (limite de falha). No entanto, o limite determinístico de falha nem sempre pode ser determinado com o rigor desejado. Ahmad & Kamaruddin (2012a) defendem que o limite de falha deve ser definido e determinado considerando a perspetiva global do sistema em que o equipamento está inserido e as características de qualidade dos produtos fabricados. Assim, é importante compreender de que modo um nível específico de falha associado a um determinado componente pode influenciar o comportamento do sistema (Jaramillo *et al.*, 2017).

A substituição preventiva de componentes críticos em intervalos de tempo preestabelecidos para evitar os efeitos de uma eventual falha (manutenção preventiva sistemática) é uma prática comum em muitas empresas. Porém, a adoção desta política tem como consequência o desperdício de uma parte da vida útil dos componentes substituídos. Além disso, tem um impacto ambiental negativo (Si *et al.*, 2011). Neste contexto, a capacidade de prever com precisão a vida residual e a fiabilidade de um sistema proporciona informação relevante para programar ações de manutenção com um custo reduzido. Para esse efeito, é necessário desenvolver um modelo preditivo que emita um aviso com a antecedência necessária para ser realizada a ação de manutenção correspondente antes que a falha se verifique (Peng *et al.*, 2010). Esta estratégia de manutenção é habitualmente designada de manutenção preditiva. Na Figura 25, é representada a relação entre o custo de manutenção, a RUL e a fiabilidade de um sistema. A melhor altura para efetuar a ação de manutenção é o momento em que o custo de manutenção é mínimo e a fiabilidade começa a diminuir de modo significativo.

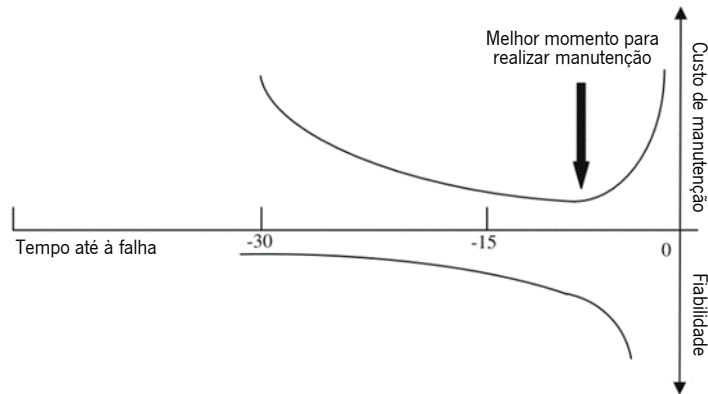


Figura 25 – Relação entre a RUL, a fiabilidade e o custo de manutenção (adaptado de Peng *et al.*, 2010).

Na opinião de Guillén, Crespo, Macchi, *et al.* (2016), a manutenção preditiva é parte integrante de um conceito amplo de manutenção condicionada que resultou da introdução progressiva de novos recursos para apoiar a função manutenção, tais como competências, tecnologias, técnicas e métodos.

O conceito de prognóstico e gestão da saúde ou *Prognostics and Health Management* (PHM) também é frequentemente utilizado no domínio da manutenção condicionada, sobretudo na literatura mais recente (Baur *et al.*, 2020; Dong *et al.*, 2019; Haddad *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2020). A designação PHM foi introduzida pela primeira vez no âmbito do programa do setor da aviação, promovido pelos Estados Unidos e países aliados, destinado a desenvolver o *Joint Strike Fighter*. Desde então, o PHM foi adaptado a diversos sectores da indústria (Nam-Ho Kim *et al.*, 2017). O principal objetivo do PHM é preservar a integridade dos ativos físicos e impedir desempenhos irregulares. Neste contexto, o termo prognóstico representa o processo para prever a RUL de um sistema ou componente, considerando o grau de degradação atual, o histórico de carga e as condições de operação esperadas (Rocha *et al.*, 2019). A gestão da saúde corresponde ao processo que permite estabelecer e aplicar ações de manutenção apropriadas e atempadas, e tomar decisões logísticas com base nos resultados do diagnóstico e do prognóstico. Para esse efeito, devem ser considerados os recursos disponíveis e os requisitos operacionais (Lee *et al.*, 2014).

Segundo Elghazel *et al.* (2015), o PHM é uma atividade fundamental da manutenção condicionada, que envolve as mesmas etapas. Guillén, Crespo, Macchi, *et al.* (2016) salientam que o PHM representa o conjunto de ferramentas que permitem gerar informação destinada a apoiar as decisões de manutenção. Estas ferramentas podem utilizar dados obtidos com base em técnicas de manutenção condicionada (Lee *et al.*, 2014). Assim, as ferramentas aplicadas no âmbito do PHM permitiram expandir o conceito de manutenção condicionada. A estimativa da RUL ou do tempo até à falha de um item, é um objetivo comum do PHM e da manutenção preditiva. Por isso, os dois conceitos estão relacionados. No entanto,

a manutenção preditiva distingue-se do PHM, porque pode gerar decisões baseadas na experiência das pessoas (análise sensorial) (Guillén, Crespo, Macchi, *et al.*, 2016).

O desenvolvimento da estratégia *Condition-Based Maintenance Plus* (CBM+) também contribuiu para a evolução do conceito de manutenção condicionada. Esta estratégia foi estabelecida em 2002 pelo *Deputy under Secretary of Defense for Logistics and Material Readiness* dos Estados Unidos e encontra-se descrita no *CBM+ DoD Guidebook*. Trata-se de uma estratégia abrangente que visa otimizar a aplicação da manutenção condicionada com base na análise RCM. O principal objetivo desta estratégia é o aumento progressivo da aplicação da manutenção condicionada e diminuição simultânea das ações de manutenção preventiva programada e das ações de manutenção corretiva (DoD, 2008). O sinal '+' representa a extensão do conceito de manutenção condicionada com tecnologias, processos e procedimentos destinados a melhorar as práticas de manutenção e as atividades logísticas (Niu *et al.*, 2010). Na Figura 26, é representada a relação entre o RCM, a manutenção condicionada e o CBM+.

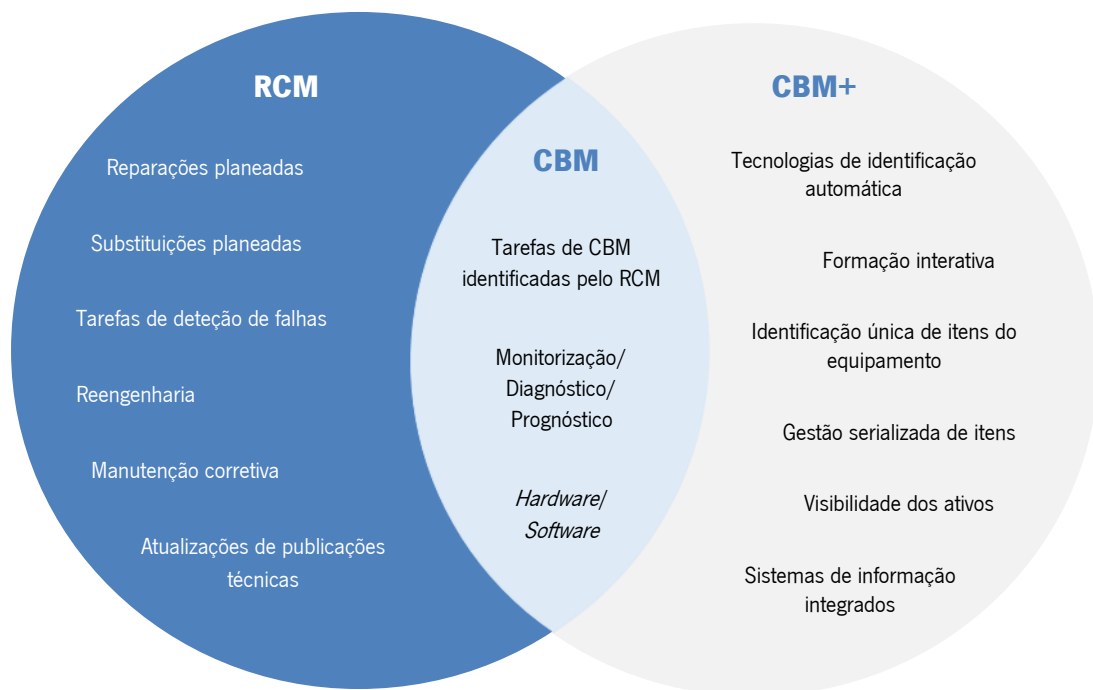


Figura 26 – Relação entre o RCM, CBM e CBM+ (adaptado de Niu *et al.*, 2010).

Segundo Millar (2008), o PHM constitui um complemento fundamental para o CBM+ e para o RCM, visto que contribui para mitigar a variabilidade introduzida pela manutenção condicionada no planeamento e execução das ações de manutenção com previsões mais precisas, e para atenuar o impacto das falhas na segurança, no ambiente, nas operações e nos custos. No entanto, à semelhança do RCM, o PHM requer um conhecimento profundo sobre os modos de falha e os seus efeitos ao nível do componente,

e conhecimento preciso sobre a probabilidade de falha em função da utilização e do estado. Por isso, as bases de dados de fiabilidade são essenciais para a aplicação do PHM (Millar, 2008).

Guillén, Crespo, Macchi, *et al.* (2016) e Guillén, Crespo, Gómez, *et al.* (2016) apresentam uma escala evolutiva da função manutenção (Figura 27). Nesta escala, são representados os principais tipos e subtipos de manutenção e os diferentes recursos que foram incorporados ao longo do tempo, com vista a aumentar a pró-atividade das decisões de manutenção. Na opinião de Guillén, Crespo, Macchi, *et al.* (2016), o último nível de pró-atividade poderá ser estabelecido pela integração de recursos de PHM e de *E-Maintenance* com os sistemas operacionais para desenvolver estratégias de controlo preditivo, aumentado assim a capacidade da função manutenção para cumprir os requisitos da produção.

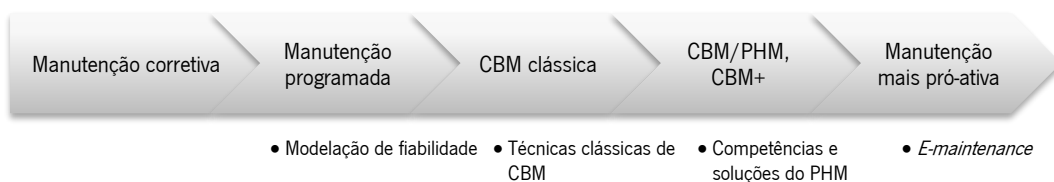


Figura 27 – Escala evolutiva da função manutenção (adaptado de Guillén, Crespo, Macchi, *et al.*, 2016 e Guillén, Crespo, Gómez, *et al.*, 2016).

O impacto das decisões de manutenção destinadas a gerir a condição de um sistema ao longo do tempo depende do momento em que a ação de manutenção é realizada. De acordo com Guillén, Crespo, Macchi, *et al.* (2016), a manutenção condicionada apoiada pelos recursos do PHM (CBM/PHM) é a estratégia de manutenção que permite realizar ações mais oportunas. Por isso, o seu valor associado é superior. Esta perspetiva é representada pela Figura 28. No primeiro gráfico, é apresentada a evolução da condição de um item ao longo do tempo, enquanto o segundo representa o valor associado a cada estratégia de manutenção em função do instante em que é realizada. De acordo com o exemplo apresentado, a aplicação das técnicas clássicas de monitorização da condição (CBM clássica), tais como a análise de vibrações, a termografia, a emissão acústica e a tribologia (Guillén, Crespo, Macchi, *et al.*, 2016; Guillén, Crespo, Gómez, *et al.*, 2016), permite realizar intervenções com um valor associado superior ao valor da manutenção corretiva e da manutenção programada. No entanto, a manutenção condicionada apoiada pelos recursos do PHM é a estratégia que proporciona o menor desperdício do tempo de vida do item, visto que permite prever com maior precisão a RUL. As linhas horizontais tracejadas representadas nos gráficos correspondem aos limites de manutenção. No caso da manutenção não programada, o limite é fixo, uma vez que a ação de manutenção é sempre realizada depois da falha. Os limites relativos à manutenção condicionada (CBM clássica e CBM/PHM) são flexíveis, visto que podem ser definidos tendo em conta previsões da condição do sistema, disponibilidade

de recursos, condições de utilização, etc. (Haddad *et al.*, 2012). Contudo, a manutenção condicionada nem sempre é a estratégia de manutenção mais conveniente. Cada uma das estratégias referidas pode representar a opção mais apropriada para um item específico, em função das características e do impacto dos seus modos de falha.

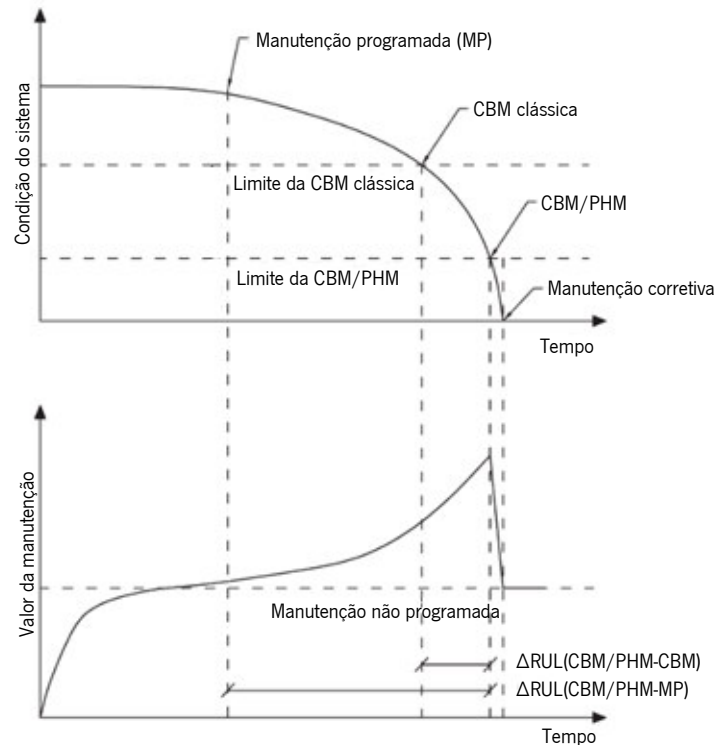


Figura 28 – Análise do valor associado a diferentes tipos de manutenção (adaptado de Haddad *et al.*, 2012 e Guillén, Crespo, Macchi, *et al.*, 2016).

Lee *et al.* (2014) salientam que a adequação das estratégias de manutenção depende da complexidade e da incerteza associadas ao sistema que se pretende manter. Estes autores apresentam um mapa que organiza diferentes estratégias de manutenção de acordo com as características de complexidade e de incerteza de um sistema. O esquema proposto mostra que a manutenção condicionada, apoiada pelas técnicas clássicas de monitorização da condição, pode ser aplicada em sistemas determinísticos, estáticos em certa medida e cuja condição pode ser representada por variáveis de baixa dimensionalidade que constituem indicadores de saúde do sistema. Enquanto o PHM deve ser aplicado a sistemas que funcionam em condições probabilísticas e estáticas, e que envolvem um grande número de variáveis, caso seja possível utilizar abordagens intrusivas (Lee *et al.*, 2014).

Embora o objetivo da manutenção condicionada seja realizar ações de manutenção precisas, este propósito nem sempre é fácil de alcançar devido à complexidade do ambiente, estrutura interna do equipamento, mecanismos de falha ocultos, entre outros fatores (Niu *et al.*, 2010). Por isso, Al-Najjar

(2012) defende que a modelação probabilística dos tempos de falha deve ser utilizada como complemento para as abordagens determinísticas aplicadas no âmbito da manutenção condicionada, a fim de aumentar a eficácia do processo de tomada de decisão. Enquanto os dados de monitorização da condição fornecem informação para previsões de curto prazo, os dados de fiabilidade permitem estender as previsões até à próxima janela de manutenção (Elghazel *et al.*, 2015).

2.3.2. Vantagens da implementação da manutenção condicionada

A implementação da manutenção condicionada geralmente requer a seleção dos componentes ou itens que devem ser monitorizados, a identificação de técnicas e tecnologias de monitorização, a instalação dos meios tecnológicos necessários e a definição de métodos de análise apropriados (Rastegari & Bengtsson, 2014). Por isso, o investimento envolvido pode ser considerável. As principais despesas incluem a aquisição de dispositivos de medição, *hardware* e *software*, a disponibilidade de conhecimento especializado e a necessidade de formação (Ahmad & Kamaruddin, 2012b; Shin & Jun, 2015). Assim, a viabilidade da implementação da manutenção condicionada deve ser analisada considerando as perspetivas organizacional, financeira e técnica. Niu *et al.* (2010) salientam que a viabilidade dos investimentos relacionados com a manutenção condicionada deve considerar a importância do equipamento, as suas características técnicas e a complexidade do ambiente externo. Segundo Al-Najjar (2012), também deve ser proporcionada justificação técnica que demonstre a capacidade do sistema de monitorização da condição e da estratégia de manutenção condicionada para alcançar os objetivos estratégicos da empresa.

Quando a manutenção condicionada é planeada de modo adequado, permite aumentar a eficácia e a eficiência global da função manutenção (Alaswad & Xiang, 2017; Shin & Jun, 2015). Na literatura, são destacadas diversas vantagens resultantes da implementação da manutenção condicionada, tais como:

- Reduzir os custos da manutenção, diminuindo as intervenções de manutenção preventiva desnecessárias (Ahmad & Kamaruddin, 2012a; Alaswad & Xiang, 2017; Bousdekis *et al.*, 2018; Jardine *et al.*, 2006);
- Aumentar a disponibilidade dos equipamentos, minimizando as paragens não planeadas e o tempo de inatividade (Cárcel *et al.*, 2014; Wiboonrat, 2018);
- Prevenir o fabrico de produto não conforme (Ahmad & Kamaruddin, 2012b) e aumentar a segurança, prevendo ou detetando falhas antes de problemas graves acontecerem (Shin & Jun, 2015);

- Evitar o funcionamento ineficiente de equipamentos em falha e impedir que os danos se estendam a outros componentes (Cárcel *et al.*, 2014);
- Otimizar o escalonamento das ações de manutenção (Elghazel *et al.*, 2015);
- Aumentar a eficácia das políticas de gestão de inventário de peças sobressalentes (Peng *et al.*, 2010);
- Assegurar maior eficácia no cumprimento de objetivos de manutenção e de suportabilidade de longo prazo (Prajapati *et al.*, 2012).

De Jonge *et al.* (2017) procuram identificar fatores que influenciam os benefícios da manutenção condicionada, para evitar que esta seja implementada em situações em que os benefícios não superam os custos. Neste estudo, é considerado o caso de uma unidade sujeita a um processo de deterioração estocástica representada por uma distribuição gama. Os fatores identificados pelos autores são: o tempo de planeamento da ação de manutenção, monitorização imperfeita da condição e incerteza relacionada com o nível de deterioração em que a falha se verifica. O tempo de planeamento corresponde ao tempo necessário entre a iniciação e a execução da ação de manutenção. Este fator depende, nomeadamente da disponibilidade de sobressalentes e de técnicos competentes. A monitorização imperfeita da condição resulta de erros de medição e de interpretação que podem afetar o rigor da avaliação da condição. Enquanto a incerteza relativamente ao nível de deterioração em que a falha se verifica, é influenciada pela variação associada ao processo de deterioração. Os resultados do estudo mostram que o custo relativo à manutenção condicionada é significativamente inferior se a variação for baixa. No entanto, a diferença de custo diminui rapidamente à medida que a variação aumenta. Quando a variação é elevada, ocorrem alterações súbitas no nível de deterioração que podem impedir uma intervenção atempada. Assim, deve ser definido um limite de aviso que tenha em conta os fatores referidos, de modo a evitar que o nível de falha seja excedido antes de ser realizada a ação preventiva. Na opinião destes autores, as distribuições aleatórias que permitem modelar o tempo de planeamento e o nível de falha, e os processos estocásticos destinados a modelar a monitorização imperfeita da condição devem ser baseados em dados reais. Além disso, De Jonge *et al.* (2017) defendem que devem ser estudadas as interações existentes entre os três fatores identificados.

Segundo Shin & Jun (2015) e Hwang *et al.* (2018), os benefícios da aplicação da manutenção condicionada são superiores quando a monitorização é realizada de modo integrado ao nível do sistema. Jaramillo *et al.* (2017) defendem que a capacidade de combinar informação proveniente de diversos componentes ou locais de medição permite realizar uma análise mais completa e fiável. Estes autores salientam ainda que as interações entre componentes devem ser consideradas pelas seguintes razões:

- Os efeitos resultantes da iniciação e desenvolvimento de uma falha num componente podem estender-se a outros componentes que se encontram em boas condições, contribuindo para que estes também manifestem um comportamento atípico;
- As interações de um componente em falha com os componentes mais próximos podem contribuir para que a falha se torne menos perceptível, aumentando a incerteza do diagnóstico;
- Diferentes modos de falha podem originar sintomas idênticos, por isso a comparação ou a fusão de dados provenientes de pontos distintos de um componente ou sistema pode ajudar a identificar mais facilmente o modo de falha presente.

De acordo com Guillén, Crespo, Gómez, *et al.* (2016), para gerir de modo apropriado a adoção dos recursos da manutenção condicionada, devem ser consideradas todas as fases do ciclo de vida de um programa de manutenção condicionada, tais como: conceção, implementação e operação. Por isso, é fundamental adquirir conhecimento prévio sobre o processo de manutenção condicionada.

2.3.3. Processo de manutenção condicionada

O processo de manutenção condicionada pode ser descrito com base numa sequência de etapas genéricas. Ahmad & Kamaruddin (2012b) identificaram duas etapas gerais: monitorização da condição e tomada de decisão. A monitorização da condição pode ser realizada quando o equipamento se encontra em funcionamento (monitorização *on-line*), ou durante o período de inatividade (monitorização *off-line*). Ambas as situações envolvem a comparação dos dados recolhidos ou de indicadores obtidos com base nos mesmos com um limite de aviso preestabelecido (monitorização objetiva). Em geral, a monitorização *on-line* é realizada continuamente e em tempo real (monitorização contínua), recorrendo a sensores para recolher dados sobre o estado do equipamento. Contudo, por vezes, a monitorização da condição é efetuada periodicamente em intervalos de tempo predefinidos (monitorização periódica), por exemplo devido a motivos financeiros ou às características de falha do equipamento. Os resultados da monitorização periódica são geralmente mais fiáveis e precisos, visto que é mais fácil identificar e eliminar imperfeições existentes nos dados durante o processamento (Niu *et al.*, 2010). Em casos particulares, a avaliação do estado do equipamento pode ser realizada apenas com base nos sentidos humanos (ex.: sujidade, cor atípica), sem recorrer a dados (monitorização subjetiva) (Ahmad & Kamaruddin, 2012a; Shin & Jun, 2015).

De acordo com Jardine *et al.* (2006) e Lee *et al.* (2014), a manutenção condicionada envolve a aquisição de dados, o processamento de dados e a tomada de decisão de manutenção. Esta representação é amplamente aceite na literatura, embora existam algumas variantes. A norma ISO 13374-1:2003

(*Condition monitoring and diagnostics of machines – Data processing, communication and presentation – General guidelines*) estabelece os requisitos básicos para especificações de *software* aberto, destinado a facilitar a obtenção, transmissão e utilização de dados sobre a condição. Esta norma organiza a avaliação da manutenção condicionada em seis blocos funcionais, tais como: aquisição de dados, manuseamento de dados, detecção do estado, avaliação da saúde, avaliação de prognóstico e geração de recomendações (Figura 29) (ISO 13374:2003).

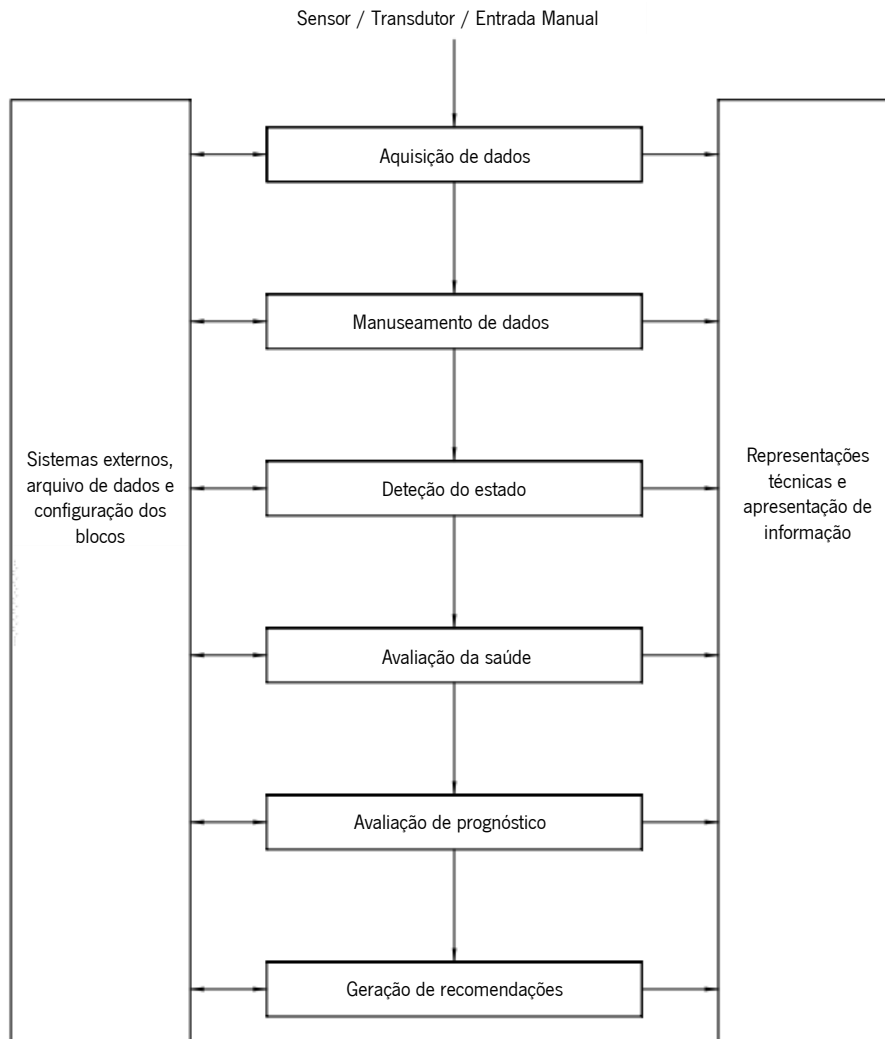


Figura 29 – Blocos de processamento e de transmissão de informação da norma ISO 13374 (adaptado de ISO 13374:2003).

Cada bloco funcional deve ser definido independentemente (MIMOSA, 2006). Os primeiros três blocos requerem funções de processamento de sinal e de análise de dados orientadas para tecnologias específicas (ex.: vibrações, tribologia, termografia, monitorização de desempenho, monitorização acústica e monitorização de corrente elétrica). Os últimos três blocos geralmente visam combinar tecnologias de monitorização, de modo a avaliar o estado de saúde atual do equipamento, prever falhas

futuras, e fornecer orientações ao pessoal operacional e aos técnicos de manutenção. Cada um dos seis blocos sequenciais interage individualmente com dois blocos verticais. O primeiro é composto por sistemas externos (ex.: informação do histórico de funcionamento), arquivo de dados (ex.: tendências evidenciadas nos dados do passado) e configuração dos blocos (ex.: identificação de locais de medição, orientação e posição relativa dos dispositivos de medição, frequência de medição, dados de configuração e parâmetros de calibração dos dispositivos de medição). Enquanto o segundo bloco inclui representações técnicas e a apresentação de informação (ex.: por escrito, numericamente e graficamente) (ISO 13374:2003).

Guillén, Crespo, Gómez, *et al.* (2016) construíram uma representação do processo de manutenção condicionada que integra os conceitos de detecção, diagnóstico e prognóstico, e duas perspectivas complementares: o processamento de dados e a informação de manutenção. Segundo estes autores, os três conceitos são dependentes e devem ser compreendidos e geridos considerando ambas as perspectivas. A primeira perspectiva diz respeito aos requisitos técnicos do processamento de dados e é baseada nos seis níveis de funcionalidade propostos pela norma ISO 13374-1:2003. Enquanto a segunda contempla a tradução dos requisitos de manutenção, para que o processo de manutenção condicionada possa estar alinhado com os objetivos da manutenção. Peng *et al.* (2010) também apresentam uma estrutura para representar o processo de manutenção condicionada que mostra as etapas gerais para converter dados de sensores em informação para a tomada de decisão de manutenção. Esta é uma representação simples que visa salientar direções para investigação futura no domínio da manutenção condicionada. Outros exemplos de etapas do processo de manutenção condicionada são apresentados por Lee *et al.* (2015), Elghazel *et al.* (2015) e Lei *et al.* (2018). Embora as etapas identificadas sejam comuns à maioria dos processos de manutenção condicionada, os seus requisitos para cada aplicação podem ser substancialmente diferentes. Assim, para obter resultados precisos e assegurar eficácia de custos, o processo de manutenção condicionada deve ser concebido, implementado e executado considerando o objetivo de cada aplicação, as restrições funcionais e as interdependências entre as etapas individuais. Em seguida, é apresentada uma descrição geral do processo de manutenção condicionada, considerando as etapas de aquisição de dados, processamento de dados e tomada de decisão de manutenção, identificadas na Figura 30.

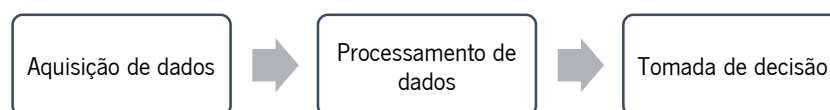


Figura 30 – Etapas do processo de manutenção condicionada (adaptado de Jardine *et al.*, 2006).

2.3.3.1. Aquisição de dados

A etapa de aquisição de dados envolve a captura e o armazenamento de dados relacionados com variáveis que evidenciam o processo de degradação dos componentes monitorizados (Prajapati *et al.*, 2012). Para cada variável, deve ser identificada a relação com os modos de falha do equipamento (Bousdekis, Magoutas, *et al.*, 2015). Além disso, a seleção de dispositivos de medição deve considerar a natureza das variáveis a monitorizar (Rocha *et al.*, 2019).

Segundo Jardine *et al.* (2006), os dados utilizados no âmbito da manutenção condicionada podem ser de dois tipos:

- Dados de eventos: fornecem informação sobre o que aconteceu (ex.: instalação, avaria, inspeção) e/ou o que foi feito (ex.: reparação, manutenção preventiva, mudança de óleo);
- Dados de monitorização: são as medições de parâmetros relacionados com a condição de um equipamento.

Os dados de eventos são úteis para avaliar o desempenho dos indicadores da condição e para apoiar ações de melhoria ou redefinir os indicadores estabelecidos previamente (Jardine *et al.*, 2006). Em geral, os dados de eventos relacionados com ativos críticos são escassos ou inexistentes porque a sua falha deve ser evitada (Lei *et al.*, 2018). Por isso, os dados monitorizados são uma importante fonte de informação (Si *et al.*, 2011). Estes dados são habitualmente classificados em três categorias: dados numéricos, dados de ondas e dados multidimensionais (Tabela 21) (Ahmad & Kamaruddin, 2012b; Jardine *et al.*, 2006).

Tabela 21 – Categorias de dados de monitorização da condição (adaptado de Jardine *et al.*, 2006 e Ahmad & Kamaruddin, 2012b).

Categoria	Descrição
Dados numéricos	São valores individuais recolhidos num período específico para uma variável monitorizada (ex.: temperatura, pressão, humidade e dados de análise de óleos).
Dados de ondas	São dados de séries cronológicas recolhidos num período específico para uma variável monitorizada (ex.: sinais de vibrações, emissões acústicas, sinais ultrassónicos, corrente do motor).
Dados multidimensionais	São dados diversificados recolhidos num período específico para uma variável monitorizada (ex.: termógrafos de infravermelhos, imagens de raio X e imagens visuais).

As medições realizadas pelos sensores podem ocorrer em intervalos regulares ou continuamente em tempo real. Caso a recolha de dados seja contínua, será necessária maior capacidade de

armazenamento. Por isso, os intervalos de recolha de dados devem ser definidos de acordo com cada circunstância específica. Além disso, deve ser identificada a opção de transmissão de dados mais vantajosa em termos de custo e de fiabilidade (Shin & Jun, 2015).

A seleção do tipo de sensor mais adequado em termos de desempenho poderá ser auxiliada por gráficos bidimensionais, conforme descrito por Shieh *et al.* (2001). Estes autores propõem gráficos destinados a apoiar a seleção de sensores de deslocamento, acelerómetros, sensores de força e sensores de temperatura. A sua utilização permite comparar o desempenho de tipos específicos de sensores que medem o mesmo parâmetro, tendo em conta dois critérios ou características, nomeadamente a resolução, a escala de medição, a frequência sensorial e a temperatura de operação.

2.3.3.2. Processamento de dados

O processamento é utilizado para extrair informação relevante dos dados obtidos na etapa de aquisição de dados, com vista a apoiar as decisões de manutenção. Esta etapa envolve a limpeza ou preparação de dados e a análise de dados (Jardine *et al.*, 2006). A preparação de dados assume uma grande importância, visto que os dados recolhidos em contexto real apresentam muitas vezes uma estrutura desorganizada e são imperfeitos (Tsang *et al.*, 2006). A presença de erros ou imperfeições pode dever-se a falhas dos sensores e ao fator humano (Jardine *et al.*, 2006). Na análise dos dados, devem ser utilizados métodos e *software* adequados ao tipo de dados recolhidos (Prajapati *et al.*, 2012).

O processamento de dados de ondas e de dados multidimensionais é designado de processamento de sinal. Enquanto o procedimento para extrair informação útil dos sinais originais é denominado extração de características. As características extraídas com base no processamento de sinal podem ser representadas sob a forma de valores numéricos (Jardine *et al.*, 2006). Estas dependem da natureza do sinal adquirido e podem resultar da combinação de outras características (Jaramillo *et al.*, 2017). É fundamental que as características proporcionem uma boa representação da condição de saúde do sistema (Lin *et al.*, 2018). Assim, as características devem ser selecionadas tendo em conta a sua capacidade discriminatória. Determinadas características reagem do mesmo modo na presença de modos de falhas distintos, enquanto outras são particularmente sensíveis relativamente a um modo de falha específico (Jaramillo *et al.*, 2017). A extração de características e a definição de indicadores a partir dos dados originais é representada pelo conceito de *data mining* (Liu *et al.*, 2019).

O *data mining* consiste na descoberta de estruturas e de padrões em conjuntos de dados complexos e de grande dimensão (Hand & Adams, 2015). Por isso, também é frequentemente designado de *Knowledge Discovery in Databases* (KDD). A utilização de técnicas de *data mining* permite reduzir a

complexidade dos dados originais, tornando os padrões existentes nos dados mais discrimináveis (Diez-Olivan *et al.*, 2019). Algumas das principais técnicas de *data mining* são descritas por Lee & Siau (2001), Liao *et al.* (2012), Agrawal & Agrawal (2015) e Salo *et al.* (2018).

Os dados numéricos podem ser compostos por um elevado número de variáveis e apresentar uma estrutura complexa de correlações. Por isso, as técnicas de estatística multivariada e a análise de regressão e séries temporais são frequentemente utilizadas na literatura científica para efetuar o processamento de dados numéricos adquiridos por sensores e a análise de características extraídas com base no processamento de sinal (Jardine *et al.*, 2006). Os dados de ondas geralmente contêm sinais indesejáveis gerados por outros equipamentos. Este ruído deve ser eliminado ou minimizado para facilitar a análise dos dados (Elghazel *et al.*, 2015; Shin & Jun, 2015). De acordo com Jardine *et al.* (2006), as técnicas de análise de dados de ondas podem ser classificadas nas categorias descritas na Tabela 22.

Tabela 22 – Técnicas de análise de dados de ondas (adaptado de Jardine *et al.*, 2006).

Categoria	Descrição	Exemplos
Domínio do tempo	O sinal original é analisado em função do tempo.	Estatística descritiva, tempo síncrono médio, séries temporais
Domínio da frequência	O sinal transformado é analisado no domínio da frequência.	Análise espectral
Tempo-frequência	A análise de sinal é realizada no domínio do tempo e da frequência.	Distribuições tempo-frequência, análise <i>Wavelet</i>

Em geral, as características do domínio da frequência são mais perceptíveis do que as características do domínio do tempo, permitindo que falhas específicas sejam determinadas. Por exemplo, em compressores e bombas, a análise do espectro de sinal permite identificar o desalinhamento, desequilíbrio, excentricidade, folga, cavitação e/ou turbulência (Jaramillo *et al.*, 2017). A análise no domínio da frequência permite identificar e isolar mais facilmente determinados elementos de frequência de interesse. No entanto, não é apropriada para lidar com sinais de ondas não estacionários. Estes sinais ocorrem habitualmente quando se verificam falhas. Os padrões resultantes são revelados mais facilmente utilizando distribuições tempo-frequência (Jardine *et al.*, 2006).

Muitas vezes, um único sensor não é suficiente para recolher dados para analisar a condição ou prever o comportamento futuro de um item. Neste caso, os dados recolhidos pelos sensores instalados em diferentes locais devem ser combinados. Este procedimento é designado de fusão de dados (Jardine *et*

al., 2006). A fusão de dados pode ser realizada em três níveis diferentes: dados originais, característica e tomada de decisão (Niu *et al.*, 2010).

2.3.3.3. Tomada de decisão

A tomada de decisão de manutenção requer uma análise detalhada da informação resultante da monitorização da condição para decidir se é necessário intervir no equipamento, qual é a ação de manutenção mais apropriada (ex.: inspecionar, reparar, substituir, etc.), e quando e como a ação de manutenção deve ser realizada (Guillén, Crespo, Gómez, *et al.*, 2016). Segundo Ahmad & Kamaruddin (2012a) e Ahmad & Kamaruddin (2012b), a tomada de decisão no âmbito da manutenção condicionada baseia-se em dois tipos de análise: a avaliação da condição atual e a previsão da condição futura.

➤ Os conceitos de diagnóstico e de prognóstico

A análise da condição atual e a previsão da condição futura são geralmente representadas pelos conceitos de diagnóstico e prognóstico, respetivamente. O diagnóstico está associado com a deteção, isolamento e identificação de falhas (potenciais ou funcionais) (Elghazel *et al.*, 2015; Jardine *et al.*, 2006; Peng *et al.*, 2010; Sikorska *et al.*, 2011). Enquanto o prognóstico visa prever falhas, permitindo o escalonamento antecipado de intervenções. A informação resultante do diagnóstico de falhas pode ser útil para refinar o prognóstico e introduzir melhorias no sistema (Jardine *et al.*, 2006). Assim, o diagnóstico deve ser realizado continuamente de modo a detetar novos eventos e a atualizar as estimativas do prognóstico (RUL).

Em contexto industrial, o prognóstico é utilizado para gerir o risco associado à falha inesperada do equipamento e prever se os efeitos de um modo de falha podem iniciar outros modos de falha (Sikorska *et al.*, 2011). Por isso, a capacidade de realizar um prognóstico preciso e fiável é fundamental para melhorar a segurança, planear as atividades logísticas e de manutenção, reduzir os custos de manutenção e o tempo de inatividade (Peng *et al.*, 2010). No entanto, Diez-Olivan *et al.* (2019) salientam que a eficácia do custo das decisões de prognóstico ainda é um tema pouco discutido, apesar deste critério determinar a sua viabilidade prática.

A interpretação dos conceitos de diagnóstico e de prognóstico na literatura não é consensual. Guillén, Crespo, Macchi, *et al.* (2016) consideram que existem dois momentos de diagnóstico: o diagnóstico de falhas iniciais ou potenciais (permite prevenir a falha funcional), e o diagnóstico de falhas funcionais. Na opinião de Lee *et al.* (2014), o diagnóstico é um processo reativo realizado somente depois da falha se ter verificado, ao passo que o prognóstico envolve a deteção de falhas incipientes e a previsão da RUL ou do desempenho restante até à falha. Sikorska *et al.* (2011) propõem uma descrição simples dos dois

conceitos: o diagnóstico envolve a identificação e a quantificação de danos ocorridos (natureza retrospectiva), enquanto o prognóstico está relacionado com a tentativa de prever o dano que poderá ocorrer.

Segundo Khan & Yairi (2018), o diagnóstico é uma classificação de comportamentos anômalos para falhas conhecidas. Por isso, quando são utilizados algoritmos genéricos de diagnóstico, as falhas devem ser identificadas previamente dentro de uma arquitetura de modelação que permita ligar as condições anômalas aos modos de falha. Por outro lado, o prognóstico proporciona a capacidade de prever a condição futura e pode ser aplicado a modos de falha de sistemas ou componentes governados pela condição do material ou perda funcional. Assim, o prognóstico é inerentemente probabilístico ou tem uma natureza incerta (Khan & Yairi, 2018).

A monitorização da progressão de uma falha pode requerer a utilização de parâmetros diferentes, daqueles que são utilizados nas atividades de diagnóstico. Por isso, é necessário compreender o modo como o sistema físico e os parâmetros observados se interrelacionam (Sikorska *et al.*, 2011). De acordo com Jardine *et al.* (2006), o prognóstico exige conhecimento ou dados sobre o processo de propagação da falha e sobre o mecanismo de falha. Lee *et al.* (2014) consideram que as arquiteturas relativas aos sistemas de diagnóstico e de prognóstico devem ser diferentes, visto que os seus objetivos também são distintos. Num sistema de diagnóstico, as características extraídas são habitualmente comparadas com uma base de informação sobre falhas, resultante de conhecimento de especialistas, modelos físicos e dados do histórico do equipamento, para determinar que tipo de falha ocorreu e porquê. De modo a dotar o sistema de capacidades de prognóstico, deve integrar-se a avaliação de desempenho, modelos de degradação, e a análise e previsão de falhas. Combinando a avaliação de desempenho com os modelos de degradação é possível caracterizar o estado de saúde do equipamento e indicar que padrões de falha podem estar presentes. A utilização de algoritmos preditivos permite estimar o momento em que o desempenho do equipamento irá atingir um nível inaceitável, conforme definido pela análise de falhas e pela avaliação de desempenho (Lee *et al.*, 2014).

Na opinião de Jun & Kim (2017), a aplicação da manutenção condicionada requer um método eficaz de análise de falhas com base em dados de sensores e consideram que o tema tem sido pouco abordado na literatura. Estes autores desenvolveram um método para a análise de falhas que aplica redes Bayesianas. A análise de falhas é baseada em estimativas de probabilidade condicional e contempla três etapas: a identificação da falha, inferência da falha e análise de sensibilidade. O estudo define tipos genéricos de falha e estabelece procedimentos para a sua identificação. Os tipos de falha são definidos

tendo em conta duas perspetivas: a velocidade de desenvolvimento da falha, e as relações entre causas, sintomas e falhas. No que diz respeito à velocidade de desenvolvimento, as falhas são designadas de catastróficas (súbitas) ou de desgaste. Segundo os autores, as falhas catastróficas e as falhas de degradação são precedidas de sintomas, porém, apenas as falhas de degradação são acompanhadas de uma diminuição do desempenho. Por isso, as falhas súbitas exigem ações de manutenção imediatas, enquanto as falhas de degradação requerem o estudo do comportamento do processo de degradação e dos respetivos sintomas, para que possam ser planeadas ações de manutenção oportunas. Do ponto de vista das relações entre as causas, os sintomas e as falhas, Jun & Kim (2017) identificam cinco comportamentos de falha distintos, tais como: a mesma causa origina múltiplos sintomas, o mesmo sintoma está relacionado com múltiplas falhas, múltiplas causas originam o mesmo sintoma, múltiplos sintomas estão relacionados com a mesma falha, e a falha é causada por falhas em série com origem em múltiplos componentes (falha em cascata).

Os conceitos de diagnóstico e de prognóstico são abordados em diferentes representações do processo de manutenção condicionada identificadas na literatura. Estas representações evidenciam a relevância das atividades de diagnóstico e de prognóstico no âmbito da tomada de decisão de manutenção.

Sikorska *et al.* (2011) desenvolveram uma representação das etapas envolvidas no diagnóstico e prognóstico, com base na norma ISO 13381-1:2004 (*Condition Monitoring and Diagnostics of Machines – Prognostics – Part 1: General Guidelines*). De acordo com o diagrama proposto, o diagnóstico envolve as etapas: deteção, isolamento e identificação de falhas. O principal resultado do diagnóstico é a emissão de um aviso de falha associado ao componente ou ao sistema. As etapas de deteção e isolamento permitem verificar que componente está a degradar-se, enquanto a identificação permite identificar o modo de falha que causou a degradação e qual a sua gravidade. O prognóstico é constituído por três níveis sequenciais de complexidade crescente e depende do diagnóstico. O nível 1 corresponde ao prognóstico de modos de falha existentes e envolve duas etapas: a previsão da RUL e a estimativa do intervalo de confiança associado à previsão. A primeira etapa destina-se a estimar o tempo entre o estado atual e a falha funcional, com base num modelo de previsão adequado ao modo de falha. Ao passo que a segunda etapa é justificada pela incerteza relativa ao processo de degradação, dúvidas sobre as condições futuras de funcionamento do sistema e eventuais erros associados aos métodos de diagnóstico e de prognóstico aplicados. No nível 2, inicialmente, são identificados modos de falha potenciais, que podem resultar dos efeitos dos modos de falha identificados anteriormente. Este nível requer o desenvolvimento de modelos de prognóstico para todos os modos de falha potenciais e a definição de modelos capazes de descrever as interações entre modos falha. Por fim, o nível 3 pressupõe a

identificação de potenciais ações de manutenção para retardar, travar ou prevenir a progressão da falha. Desta forma, pretende-se obter uma estimativa realista da RUL para o sistema afetado, tendo em conta a aplicação das ações identificadas (Sikorska *et al.*, 2011).

Bousdekis *et al.* (2015) estabeleceram uma estrutura para a tomada de decisão em tempo real no âmbito da manutenção condicionada. A estrutura proposta representa as etapas destinadas a gerar recomendações de manutenção a partir das atividades de diagnóstico e de prognóstico. As recomendações de diagnóstico são designadas de reativas e resultam das etapas de processamento de sinal, monitorização da condição e avaliação da saúde. Estas recomendações relacionam-se sobretudo com a estratégia de manutenção a adotar. As recomendações decorrentes do prognóstico são denominadas pró-ativas e incluem recomendações sobre a estratégia ou escalonamento da manutenção, o momento ótimo para uma ação pré-definida, e a ação ótima e o momento de aplicação. No entanto, para que a estrutura definida possa apoiar de forma automática a tomada de decisão, deve estar disponível uma lista de ações associadas a tipos específicos de falhas.

Bousdekis *et al.* (2018) desenvolveram uma abordagem computacional de apoio à tomada de decisão em tempo real baseada no princípio da pró-atividade: Detetar-Prever-Decidir-Atuar. Esta abordagem tem como finalidade detetar eventos e situações irregulares (fase de diagnóstico), prever eventos indesejados (fase de prognóstico), decidir as recomendações mais apropriadas, atuar sobre o sistema com base na decisão tomada e utilizar o *feedback* para melhorar as recomendações.

➤ **Vida útil restante (RUL)**

A vida útil restante ou RUL é o tempo que resta a um componente para desempenhar a sua função antes da falha (Okoh *et al.*, 2014). Trata-se de uma variável aleatória que pode ser estimada a partir de fontes de informação disponíveis. No entanto, não existe uma abordagem universal para obter a melhor estimativa. A RUL depende da idade atual do ativo, do ambiente de operação e da condição observada. Deste modo, quando não estão disponíveis informações relativas ao histórico de perfis operacionais e informação de monitorização até ao instante t (Y_t), a função densidade de probabilidade de uma variável aleatória que representa a RUL no momento t (X_t) condicional em Y_t é dada pela expressão (Si *et al.*, 2011):

$$f(X_t|Y_t) = f(X_t) = \frac{f(t + X_t)}{R(t)} \quad (2.14)$$

Em que t representa o tempo de utilização do ativo, $f(t + X_t)$ é a função densidade de probabilidade da vida em $t + X_t$ e $R(t)$ é a função de sobrevivência no momento t . A inclusão de Y_t na estimativa da RUL geralmente constitui uma tarefa mais complexa.

O planejamento adequado das ações de manutenção depende da estimativa rigorosa da RUL (Elghazel *et al.*, 2015). O tempo de vida do equipamento sujeito a degradação pode dividir-se em duas ou mais etapas distintas, considerando a tendência verificada pelos indicadores utilizados. A RUL deve ser determinada na etapa em que a tendência de degradação se torna evidente, mediante um limite de falha preestabelecido (Lei *et al.*, 2018). No entanto, o valor limite do parâmetro ou indicador monitorizado e a previsão da RUL estão geralmente sujeitos a incerteza (Elghazel *et al.*, 2015). Esta circunstância é ilustrada no gráfico da Figura 31. O gráfico representa a estimativa da RUL e o respectivo Intervalo de Confiança (IC).

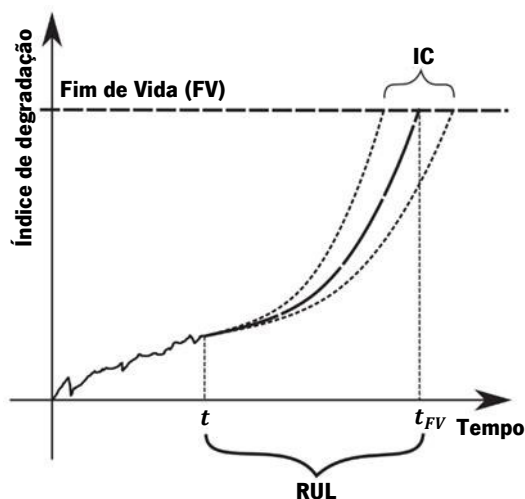


Figura 31 – Representação gráfica do cálculo da RUL e do respectivo IC (adaptado de Baur *et al.*, 2020).

De acordo com Elghazel *et al.* (2015), os estudos relacionados com a previsão da RUL apenas consideram circunstâncias em que existem dados disponíveis e não se verificam perdas, os sistemas de medição são fiáveis e não existem restrições de consumo de energia. Estes autores também salientam que os modelos preditivos existentes geralmente não contemplam o efeito da ação de manutenção realizada.

2.3.4. Modelos de diagnóstico e de prognóstico

As decisões de manutenção condicionada podem ser apoiadas por uma grande variedade de modelos que permitem estimar o estado atual ou prever a RUL de um componente específico (Bousdekis, Magoutas, *et al.*, 2015). A aplicação destes modelos permite que as empresas reduzam a dependência

dos funcionários especializados e tomem decisões mais eficazes. Muitos dos modelos e técnicas aplicáveis neste domínio são complexos e interdisciplinares. Além disso, a sua precisão é afetada pela quantidade e qualidade dos dados existentes (Hwang *et al.*, 2018), e pelos pressupostos e aproximações adotados (Sikorska *et al.*, 2011).

No âmbito de um estudo destinado a identificar as características subjacentes aos modelos de manutenção condicionada, Veldman *et al.* (2011) desenvolveram uma estrutura de classificação baseada em dois denominadores: o tipo de modelo utilizado para obter o valor esperado ou tendência, e o tipo de dados utilizados. De acordo com os autores, o modelo aplicado pode ser um modelo estatístico ou analítico e os dados utilizados podem ser dados do processo ou de falha. Estes autores salientam que a utilização de dados do processo é particularmente relevante, devido à frequente dificuldade em obter dados de falha. No entanto, neste caso, é essencial ter a capacidade de combinar conhecimento sobre o processo e conhecimento relacionado com a engenharia de manutenção.

Lee *et al.* (2014) apresentam uma lista de algoritmos frequentemente utilizados nas atividades de diagnóstico e de prognóstico de falhas de componentes críticos, tais como rolamentos, engrenagem, eixo, bomba e alternador. Para cada um dos componentes identificados, também são apresentados possíveis modos de falha, tipos de dados habitualmente disponíveis e características mais comuns.

Com base numa revisão da literatura, Sikorska *et al.* (2011) propõem um sistema de classificação destinado a apoiar a seleção de modelos de prognóstico (Tabela 23 e Apêndice II). Os autores identificam quatro categorias de modelos por ordem crescente de complexidade: modelos baseados no conhecimento, modelos de esperança de vida, redes neurais artificiais e modelos físicos. Para cada uma das categorias, são apresentadas as principais subcategorias (abrangentes e específicas) e descritos alguns dos modelos mais relevantes. O estudo também sintetiza as vantagens e as desvantagens associadas a cada modelo, e identifica as situações em que estes são apropriados e casos em que não devem ser aplicados. Devido à sua versatilidade, muitos dos modelos apresentados também podem ser utilizados em atividades de diagnóstico. Além disso, os autores do estudo salientam que existe na literatura um número crescente de modelos que resultam da combinação de duas ou mais abordagens de modelação. Estas abordagens são geralmente denominadas de abordagens híbridas.

Em geral, os modelos de diagnóstico e de prognóstico aplicados no âmbito da manutenção condicionada são classificados em duas categorias principais: modelos baseados em dados e modelos físicos (Hwang *et al.*, 2018). Os modelos baseados em dados incluem os modelos baseados no conhecimento, os modelos de esperança de vida e as redes neurais artificiais. As abordagens híbridas são frequentemente

apresentadas numa categoria distinta (Lee *et al.*, 2014). A combinação de modelos permite, por exemplo melhorar o desempenho de um modelo específico ou complementá-lo. Deste modo, é possível tirar partido dos pontos fortes de um ou mais modelos para limitar fragilidades individuais e assim fornecer estimativas mais fiáveis (Ayo-Imoru & Cilliers, 2018).

Tabela 23 – Principais categorias e subcategorias dos modelos de prognóstico (adaptado de Sikorska *et al.*, 2011).

Categorias	Subcategorias
Modelos baseados no conhecimento	Sistemas especializados Sistemas difusos
Modelos de esperança de vida	Modelos estocásticos <ul style="list-style-type: none"> Funções agregadas de fiabilidade Modelos condicionais de probabilidade Função densidade de probabilidade da RUL Redes Bayesianas estáticas Redes Bayesianas dinâmicas Modelos de Markov e de semi-Markov Modelos escondidos de Markov e de semi-Markov Estimativa Bayesiana com filtros <i>Kalman</i> Estimativa Bayesiana com filtros de partículas
	Modelos estatísticos <ul style="list-style-type: none"> Avaliação de tendência Modelos autorregressivos Outros modelos de séries temporais (não lineares) Modelo de riscos proporcionais
Redes neurais artificiais	Previsão direta da RUL Estimativa paramétrica para outros modelos
Modelos físicos	

2.3.4.1. Modelos baseados em dados

Os modelos baseados em dados utilizam dados provenientes da monitorização da condição do equipamento e dados de eventos para obter informação destinada a apoiar decisões de manutenção. Por isso, a sua aplicação depende da disponibilidade e da natureza dos dados existentes (Si *et al.*, 2011). Estes modelos permitem revelar correlações subjacentes e casualidades presentes nos dados (Li, Ding, & Sun, 2018). As principais aplicações dos modelos baseados em dados no domínio da manutenção condicionada são: a deteção de anomalias, a identificação e isolamento de falhas, e a estimativa da RUL (Rocha *et al.*, 2019). Estes modelos enquadram-se em duas áreas fundamentais: a estatística e a inteligência artificial (Jun & Kim, 2017; Peng *et al.*, 2010; Rocha *et al.*, 2019).

Si *et al.* (2011) classificam os modelos estatísticos baseados em dados da condição em duas categorias: modelos baseados em dados diretos e modelos baseados em dados indiretos. Os dados diretos permitem descrever o estado estrutural do sistema diretamente. Enquanto os dados indiretos apenas podem classificar indiretamente ou parcialmente o estado estrutural do sistema (ex.: dados de vibrações e dados de análise de óleos). Neste caso, pode ser necessário recorrer a dados de eventos para complementar a informação obtida a partir dos dados de monitorização da condição. Por isso, as categorias de modelos referidas anteriormente também podem ser designadas de modelos baseados em estados diretamente observados e modelos baseados em estados indiretamente ou parcialmente observados, respetivamente. Quando é possível extrair indicadores que representam diretamente os estados de um sistema a partir de dados indiretos, aplicando técnicas de processamento de sinal, os modelos baseados em dados diretos podem ser aplicados aos valores dos indicadores. Na Tabela 24, são apresentados os modelos relativos a cada uma das categorias. Os modelos apresentados permitem estimar a RUL, tendo em conta um limite predefinido.

Tabela 24 – Classificação dos modelos estatísticos baseados em dados (adaptado de Si *et al.*, 2011).

Categoria	Designação
Modelos baseados em dados diretos	Modelos regressivos, processos de Wiener, processos Gamma e modelos de Markov.
Modelos baseados em dados indiretos	Modelos estocásticos baseados em filtros, modelos de risco baseados em covariáveis, modelos escondidos de Markov e modelos escondidos de semi-Markov.

Segundo Si *et al.* (2011) e Alaswad & Xiang (2017), quando a condição é diretamente observável os modelos de deterioração estocástica podem ser classificados tendo em conta a natureza do processo de

deterioração que permitem modelar. Assim, os processos Gamma, o movimento Browniano e a distribuição gaussiana inversa assumem que a deterioração da condição é um processo contínuo. Enquanto os modelos de Markov e de semi-Markov consideram que a deterioração da condição é um processo discreto. No entanto, para sistemas em que a deterioração é causada por diversos fatores devido ao ambiente dinâmico de operação é frequentemente utilizado o modelo de riscos proporcionais (Alaswad & Xiang, 2017).

O modelo de riscos proporcionais é um procedimento de análise regressiva multivariada (Tsang, 1995) proposto por David Cox em 1972 (Vlok *et al.*, 2002; Zhu *et al.*, 2015). Começou por ser aplicado na área da biomedicina (Peng *et al.*, 2010; Tian *et al.*, 2012; Tian & Liao, 2011) para modelar o efeito de variáveis secundárias na sobrevivência (Durivage, 2017). A partir da década de 1990, a sua utilização também se tornou frequente na análise de fiabilidade e otimização da manutenção preventiva (Tian *et al.*, 2012).

No âmbito da análise de fiabilidade, o modelo de riscos proporcionais é aplicado com a finalidade de medir e prever a fiabilidade do equipamento utilizando covariáveis para descrever diferentes condições de operação (Tian *et al.*, 2012; Tian & Liao, 2011). As covariáveis são fatores concomitantes que descrevem as condições sob as quais um item desempenhou a sua função até ao instante em que é realizada a observação, ou variáveis de diagnóstico que descrevem o estado do item observado (Vlok *et al.*, 2002). Quando o modelo de riscos proporcionais é utilizado para otimizar decisões de manutenção preventiva, são combinados dados relativos à idade e dados de monitorização da condição, com vista a representar com maior rigor a condição de saúde do equipamento e a respetiva probabilidade de falha (Tian *et al.*, 2012; Tian & Liao, 2011). Assim, o modelo de riscos proporcionais permite avaliar a probabilidade de falha do equipamento numa idade específica, considerando a sua condição (Efthymiou *et al.*, 2012; Jardine *et al.*, 2006) e o seu histórico até ao momento da tomada de decisão (Banjevic *et al.*, 2001).

O modelo de riscos proporcionais baseia-se no pressuposto de que a função de risco de um sistema é composta por dois fatores multiplicativos: a função de risco de referência e a função de covariáveis (Lei *et al.*, 2018). A expressão matemática geral que representa o modelo é a seguinte:

$$h(t, Z(t)) = h_0(t) e^{\sum_{i=1}^m \gamma_i z_i(t)} \quad (2.15)$$

Em que $h(t, Z(t))$ representa a função de risco de falha no momento t tendo em consideração os valores $z_1(t), z_2(t), \dots, z_m(t)$, $h_0(t)$ é função de risco de referência, $z_i(t)$ é o valor da covariável i no momento t e γ_i é o coeficiente associado à covariável i .

A função de risco de referência tem em consideração a idade do equipamento no momento da inspeção e pode ser paramétrica ou não paramétrica (Tsui *et al.*, 2015). Esta função é frequentemente representada pela função de risco de *Weibull*, devido à sua adaptabilidade (Vlok *et al.*, 2002). Assim, o risco de falha pode ser estimado com base na seguinte expressão:

$$h(t, Z(t)) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{\sum_{i=1}^m \gamma_i z_i(t)} \quad (2.16)$$

Em que $(\beta/\eta)(t/\eta)^{\beta-1}$ corresponde à função de risco do modelo de *Weibull*. Os parâmetros do modelo (β , η e γ) podem ser estimados utilizando um procedimento baseado no método da máxima verosimilhança (Golmakani & Fattahipour, 2011; Tsui *et al.*, 2015; Vlok *et al.*, 2002).

Na aplicação do modelo de riscos proporcionais, não são utilizadas observações referentes à variável dependente (função de risco), as observações ou covariáveis disponíveis são dados de eventos e dados de sensores recolhidos num determinado momento. Por isso, o procedimento de modelação distingue-se da análise regressiva comum (Jardine *et al.*, 2006; Wakiru *et al.*, 2019). Em geral, para construir um modelo de riscos proporcionais relativo a um equipamento, são requeridos dados pertencentes às seguintes categorias: dados de falha/substituição, dados de inspeção, dados de ações de manutenção e dados de instalação (Tsang *et al.*, 2006). Por este motivo, a precisão das estimativas do risco de falha depende da qualidade e da quantidade dos dados relacionados com a condição e dos dados de eventos (Lei *et al.*, 2018).

Os dados sobre a condição formam um vetor de covariáveis que, individualmente, representam uma medição específica (Banjevic *et al.*, 2001). De forma a obter resultados fiáveis com a aplicação do modelo de riscos proporcionais, devem ser consideradas todas as covariáveis que afetam o tempo até à falha (Tian *et al.*, 2012). Alguns exemplos de covariáveis que contribuem para a deterioração dos componentes de um equipamento são: a temperatura, a pressão, a vibração, a velocidade de funcionamento, etc. A sua alteração geralmente ocorre de modo estocástico (Golmakani & Fattahipour, 2011).

Em muitas das aplicações do modelo de riscos proporcionais o risco de falha é determinado utilizando dados da análise de vibrações e dados da análise espectrográfica de amostras de óleo lubrificante. Por exemplo, a modelação da concentração de partículas metálicas resultantes de desgaste no óleo do motor permite definir o momento mais adequado para realizar uma intervenção destinada a impedir uma eventual falha, tendo em conta o risco de falha estimado (Wakiru *et al.*, 2019). Nos casos em que a falha ocorre devido à perda de função do óleo, a relação entre a condição do óleo e os eventos de falha deverá

ser determinada. Para esse efeito, é necessário obter dados sobre a condição no momento da falha, de forma a estimar os parâmetros do modelo. No entanto, estes dados muitas vezes não estão disponíveis, inviabilizando assim a aplicação do modelo (Scarf, 2007).

A utilização de modelos baseados em dados foi impulsionada pela evolução e disseminação crescente dos sistemas automáticos de aquisição e transmissão de dados na indústria (Zhao *et al.*, 2019). Estes modelos podem ser facilmente generalizados, visto que a sua aplicação não exige a compreensão das propriedades físicas das variáveis consideradas (Ayo-Imoru & Cilliers, 2018; Ding, *et al.*, 2018; Zhang & Ding, 2019). De acordo com Wu, *et al.* (2019), os modelos baseados em dados são mais eficazes do que os modelos físicos quando são considerados sistemas complexos (ex.: motores de avião e aerogeradores). A compreensão do mecanismo de falha destes sistemas é difícil ou inviável, sobretudo devido à sua dimensão e ao ambiente dinâmico de operação em que estão inseridos. Por este motivo, o seu processo de degradação não pode ser descrito com rigor com base em modelos físicos (Pan *et al.*, 2016). Contudo, os modelos baseados em dados têm a desvantagem de só permitirem reconhecer falhas que tenham sido identificadas previamente. Além disso, nem sempre é possível obter dados em quantidade suficiente e com o nível de qualidade necessário para obter resultados fiáveis (Ayo-Imoru & Cilliers, 2018). A ausência de evidência de falhas estruturais impede que a eficácia destes modelos possa ser validada com dados operacionais (Diez-Olivan *et al.*, 2019).

Os modelos baseados em dados apoiam-se essencialmente em técnicas de *machine learning* e modelos regressivos (Si *et al.*, 2011). As técnicas de *machine learning* são particularmente úteis, pois permitem analisar relações não lineares complexas entre variáveis (Ren *et al.*, 2019). O *machine learning* é utilizado no âmbito da inteligência artificial para transformar dados originais em informação relevante e para obter modelos de comportamento (Ayo-Imoru & Cilliers, 2018). Embora o *machine learning* também possa envolver a aplicação de técnicas estatísticas, não tem orientação probabilística (Si *et al.*, 2011). Algumas das principais técnicas de *machine learning* são: *Support Vector Regression* (SVR), redes neurais artificiais, redes Bayesianas e sistemas neurais difusos (Liu *et al.*, 2019).

Diez-Olivan *et al.* (2019) classificam os modelos de prognóstico baseados em dados, de acordo com os objetivos que lhe estão associados, em três categorias: modelos descritivos, modelos preditivos e modelos prescritivos (Tabela 25). Em casos específicos, pode ser realizada a combinação de modelos. A combinação de prognóstico preditivo (ex.: prever a probabilidade de uma máquina falhar) com o prognóstico prescritivo (ex.: afinar a configuração do equipamento para reduzir a probabilidade de falha) são os cenários mais representativos (Diez-Olivan *et al.*, 2019).

Tabela 25 – Classificação dos modelos de prognóstico baseados em dados (adaptado de Diez-Olivan *et al.*, 2019).

Categoria	Descrição
Descritivos	Descrevem o caso que está a ser estudado com base em dados capturados para o efeito, sem considerar suposições sobre as causas do problema e/ou a presença de padrões de interesse nos dados obtidos (<i>machine learning</i> não supervisionado).
Preditivos	Preveem o momento em que uma falha irá ocorrer, e eventualmente a sua gravidade e impacto na cadeia produtiva, com base em algoritmos que utilizam dados relativos a falhas ocorridas para aprender padrões que correlacionam os dados capturados com a variável que caracteriza a falha que se pretende prever (<i>machine learning</i> supervisionado).
Prescritivos	Prescrevem ações ótimas em resultado de um aviso de falha iminente com vista a reduzir o risco de ocorrência, ou de um aviso de falha verificada para minimizar o seu impacto (modelos de otimização).

A utilização de modelos baseados em dados assenta no pressuposto de que os dados de treino e os dados monitorizados seguem a mesma distribuição. Porém, este pressuposto nem sempre é válido. Em contexto industrial, a variação das condições de operação do equipamento e o ruído ambiental causam frequentemente alterações na distribuição dos dados, contribuindo para que o modelo de referência utilizado deixe de representar adequadamente as condições normais de operação (Li, Zhang, & Ding, 2018; Li, Zhang, Ding, & Sun, 2019). Por isso, o modelo deve ser revisto sempre que se verificarem alterações relevantes às condições normais de operação. Além disso, os modelos baseados em dados apresentam as seguintes limitações:

1. Os modelos de extração de características e os modelos para determinar a RUL influenciam-se mutuamente;
2. Risco de sobreajuste do modelo utilizado para determinar a RUL;
3. Os dados utilizados devem ser sequenciais.

A evolução das redes neurais artificiais, em particular *multilayer perceptron* e *autoencoder*, contribuiu para o surgimento do *deep learning* (Khan & Yairi, 2018; Zhao *et al.*, 2019), que tem vindo a assumir uma relevância cada vez maior no âmbito do diagnóstico e prognóstico de falhas baseado em dados (Nguyen & Medjaher, 2019). O *deep learning* é uma subcategoria do *machine learning* que não requer a participação humana na extração de características (Khan & Yairi, 2018; Nguyen & Medjaher, 2019), nem conhecimento prévio sobre o problema (Janssens *et al.*, 2016). As características ou representações hierárquicas de dados são aprendidas automaticamente utilizando dois ou mais níveis de processamento. A representação da informação útil é assim estabelecida de modo adaptativo, realizando transformações não lineares dos dados originais em cada nível. Os níveis mais avançados aprendem características

complexas que resultam da sobreposição de características mais simples extraídas nos níveis anteriores (Liu *et al.*, 2018).

2.3.4.2. Modelos físicos

Os modelos físicos utilizam modelos matemáticos construídos com base em princípios físicos fundamentais para representar a iniciação e a propagação de anomalias estruturais. A verificação de consistência entre medições do sistema real e os resultados do modelo é representada por resíduos. O aumento da dimensão dos resíduos pode indicar a presença de uma anomalia no equipamento. Os limites para detetar a presença de falhas são definidos recorrendo a ferramentas estatísticas (Dragomir *et al.*, 2009; Peng *et al.*, 2010). Estes modelos também são designados de física da falha ou modelos comportamentais (Bousdekis *et al.*, 2018), uma vez que permitem caracterizar quantitativamente o comportamento de um modo de falha aplicando leis físicas (Sikorska *et al.*, 2011).

Os modelos físicos geralmente são representados utilizando um conjunto de equações diferenciais ordinárias ou parciais. No entanto, os modelos de espaço de estado e os modelos de simulação também podem ser aplicados neste domínio. Para deduzir equações determinísticas, é necessário identificar os parâmetros relevantes inerentes ao sistema ou componente considerado. Quando os parâmetros são variáveis aleatórias, os modelos físicos devem incorporar as suas distribuições estatísticas para que possam ser estimados limites de confiança. Os dados necessários são habitualmente provenientes de conhecimento científico existente e de experiências laboratoriais ou de campo. Estes devem proporcionar um conhecimento profundo do comportamento físico causado pela tensão ao nível macroscópico e microscópico (Sikorska *et al.*, 2011). A tensão em cada local de falha pode ser determinada a partir das condições de carga, geometria e propriedades dos materiais (Rocha *et al.*, 2019).

Para os modos de falha resultantes de processos de desgaste, os modelos de prognóstico devem permitir monitorizar os danos agregados. Ao passo que para os modos de falhas originados por sobrecarga, deve ser monitorizada a condição atual, com vista a determinar o risco imediato de falha, e realizada uma análise estocástica da distribuição da força e da carga. Para definir modelos ao nível do sistema, os modelos representativos de cada modo de falha podem ser complementados com equações que permitam descrever a forma como estes interagem com o sistema, e caracterizar o seu impacto na iniciação e agravamento de outros modos de falha. No entanto, existem opções menos complexas, tais como a integração dos modelos estabelecidos para os diferentes modos de falha com modelos baseados na experiência e a utilização de técnicas de fusão de dados (Sikorska *et al.*, 2011).

Na Tabela 26, são apresentadas algumas das vantagens e desvantagens associadas aos modelos físicos.

Tabela 26 – Vantagens e desvantagens dos modelos físicos.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Requerem uma quantidade reduzida de dados para fins preditivos (Elghazel <i>et al.</i>, 2015); ▪ Quando são bem formulados, os resultados obtidos têm uma precisão elevada (Elghazel <i>et al.</i>, 2015; Hwang <i>et al.</i>, 2018) e um nível de incerteza reduzido (Bousdekis <i>et al.</i>, 2018); ▪ A sua aplicação em equipamentos recentes poderá ser vantajosa, devido à ausência de dados de eventos na fase inicial (Hwang <i>et al.</i>, 2018); ▪ À medida que a compreensão física do sistema melhora, o modelo pode ser adaptado para melhorar a sua precisão (Sikorska <i>et al.</i>, 2011); ▪ As alterações verificadas nos resíduos têm um significado físico fácil de traduzir (Sikorska <i>et al.</i>, 2011). 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ São concebidos para serem aplicados a componentes e modos de falha específicos (Elghazel <i>et al.</i>, 2015); ▪ Requerem conhecimento técnico detalhado sobre o mecanismo de falha (Bousdekis <i>et al.</i>, 2018) e acerca do comportamento do sistema (Elghazel <i>et al.</i>, 2015); ▪ Definir um modelo físico apropriado envolve um grau de dificuldade elevado (Bousdekis <i>et al.</i>, 2018; Elghazel <i>et al.</i>, 2015); ▪ Formular um modelo representativo do mecanismo de deterioração de um sistema complexo é muitas vezes inviável (Nguyen & Medjaher, 2019); ▪ A validade do modelo em contexto real pode ser afetada por diversas variáveis de operação (Nguyen & Medjaher, 2019); ▪ Nem sempre é possível compreender com rigor o comportamento do mecanismo de falha sob condições distintas de operação (Sikorska <i>et al.</i>, 2011); ▪ A definição de modelos capazes de combinar os processos de diagnóstico e de prognóstico pode não ser possível, visto que são necessários diferentes parâmetros para detetar a iniciação da falha (Sikorska <i>et al.</i>, 2011); ▪ Requerem um volume significativo de dados multivariados precisos e fiáveis para a atribuição de parâmetros apropriados (Sikorska <i>et al.</i>, 2011) e para validação do modelo (Elghazel <i>et al.</i>, 2015).

De acordo com Elghazel *et al.* (2015), quando existe conhecimento sobre o mecanismo de falha e estão disponíveis dados monitorizados, a utilização de uma abordagem que permita combinar modelos físicos com modelos baseados em dados poderá ser a opção mais adequada. Deste modo, é possível obter uma relação favorável entre complexidade e rigor. Segundo os mesmos autores, os modelos físicos devem ser considerados apenas se:

- O modelo matemático do sistema é conhecido;
- O modo de falha é bem compreendido;
- Estiver disponível um modelo físico para cada modo de falha;
- As condições de operação podem ser monitorizadas;
- Estiverem disponíveis dados que descrevem as condições relacionadas com cada um dos processos existentes.

2.3.5. Abordagens para apoiar a implementação da manutenção condicionada

Ao longo dos últimos anos, a necessidade de desenvolver mais investigação relacionada com a implementação e gestão da manutenção condicionada tem sido defendida por vários autores. Além disso, são salientadas diversas limitações na literatura existente. De acordo com Jardine, Lin, & Banjevic (2006), o desenvolvimento de abordagens robustas de diagnóstico de falhas e de abordagens rápidas e precisas para o prognóstico é uma área de investigação prioritária. Peng *et al.* (2010) defendem que deve ser dada prioridade a metodologias abrangentes no domínio do prognóstico de falhas em vez de modelos específicos, com vista a facilitar a adaptação às rápidas mudanças da indústria. Estes autores também salientam a importância de definir critérios para avaliar e comparar a exatidão e a precisão dos algoritmos de prognóstico. Lee *et al.* (2014) salientam a necessidade de desenvolver uma metodologia sistemática para implementar sistemas de PHM, que permitam a sua rápida integração em diferentes contextos. A ausência de uma abordagem holística para a aplicação do PHM também é enfatizada por Tsui *et al.* (2014) e López *et al.* (2014). Prajapati *et al.* (2012) defendem que é necessário desenvolver uma arquitetura de manutenção condicionada padrão e adaptável para assegurar interoperabilidade. Guillén, Crespo, Gómez, *et al.* (2016) sublinham que as estruturas metodológicas para a implementação da manutenção condicionada ou do PHM devem ir além dos aspetos tecnológicos. Assim, as questões de gestão também devem ser consideradas para assegurar maior eficiência (Al-Najjar, 2012; Guillén, Crespo, Gómez, *et al.*, 2016; Niu *et al.*, 2010).

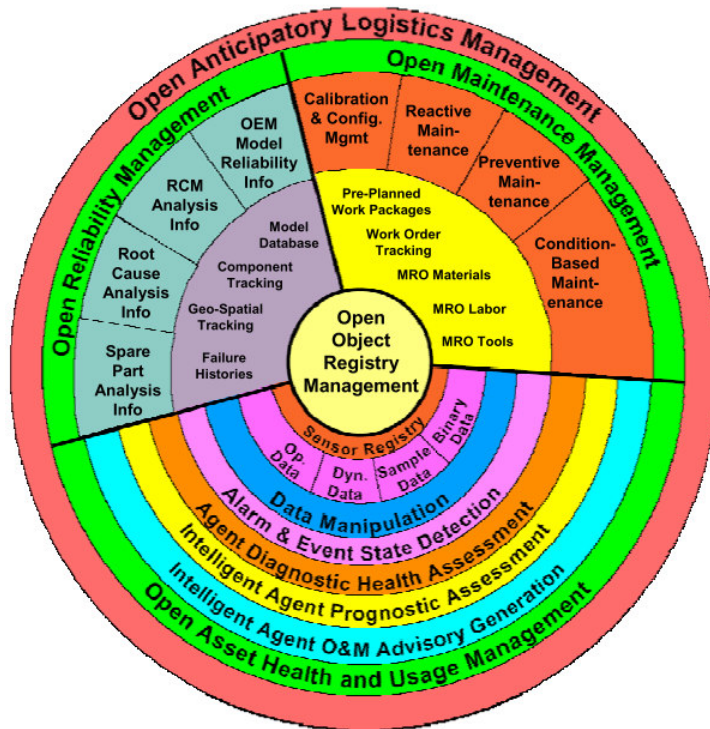
A implementação bem-sucedida da manutenção condicionada assume uma grande importância, devido às elevadas despesas envolvidas. Segundo Guillén, Crespo, Gómez, *et al.* (2016), a complexidade dos novos programas de manutenção impede a sua implementação eficaz em larga escala na indústria. Rastegari & Bengtsson (2014) defendem que a utilização de uma abordagem de implementação adequada pode aumentar a possibilidade de sucesso e o retorno do investimento. Para este propósito, é crucial compreender de que modo é mais conveniente aplicar os métodos de manutenção condicionada e controlar as suas implicações de forma sustentável e eficiente (Guillén, Crespo, Gómez, *et al.*, 2016). Al-Najjar (2012) sublinham que a ausência de procedimentos concretos para implementar a manutenção condicionada gera confusão entre os sistemas e as políticas de manutenção condicionada. Além disso, este autor também considera que a falta de sistematização no estabelecimento e administração da manutenção condicionada impede a avaliação, controlo e acompanhamento do seu impacto técnico e contribuição económica.

Devido à complexidade envolvida nas atividades de manutenção condicionada, é essencial obter orientação apropriada para apoiar o processo de implementação. Assim, são necessárias abordagens de implementação para facilitar a adoção da manutenção condicionada pelas empresas e aumentar as possibilidades de sucesso. As abordagens de implementação existentes na literatura foram classificadas em duas categorias: arquiteturas e metodologias. Em seguida, são descritas as abordagens identificadas no âmbito da revisão da literatura realizada em cada uma destas categorias.

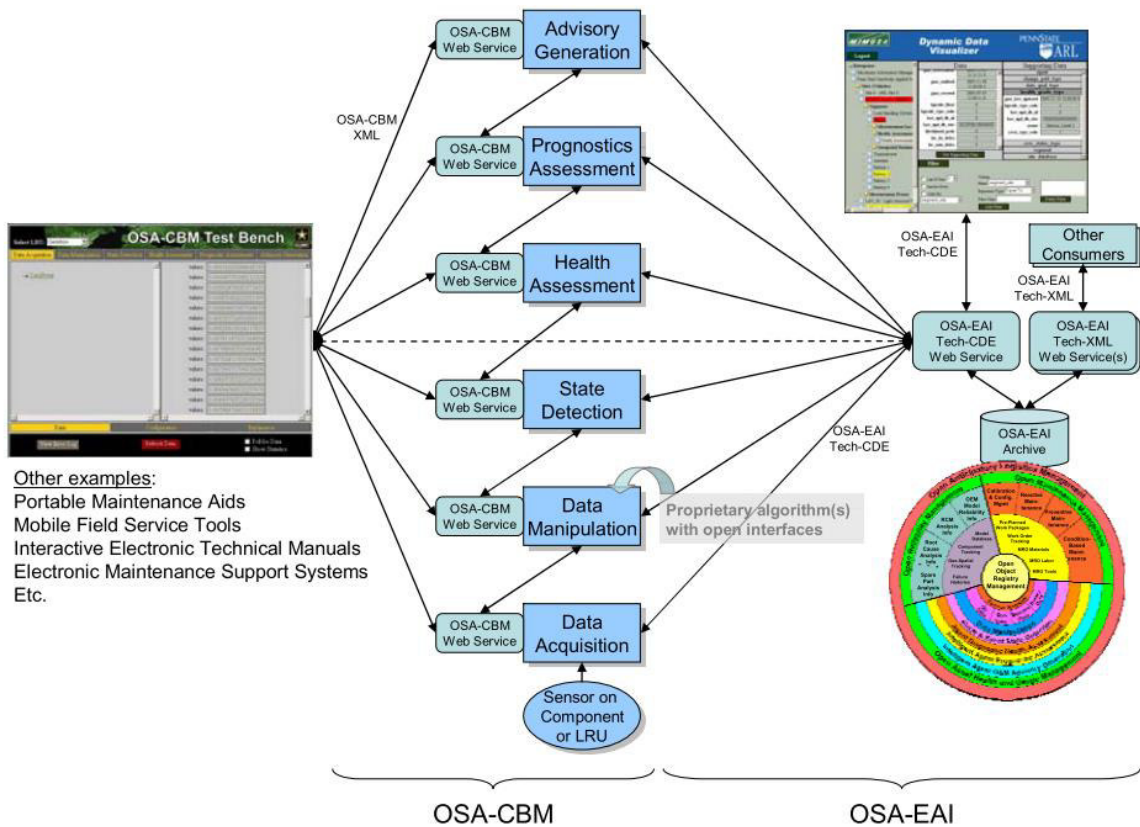
2.3.5.1. Arquiteturas

Os programas de manutenção condicionada podem ser extremamente difíceis de gerir, devido à necessidade de lidar com uma grande quantidade de informação que se altera ao longo do tempo e exibe relações complexas (Guillén, Crespo, Gómez, *et al.*, 2016). Para superar esta dificuldade, na literatura são propostas algumas arquiteturas, cuja análise pode fornecer informação útil para apoiar a implementação da manutenção condicionada.

A *Open Systems Architecture for Condition-Based Maintenance* (OSA-CBM), desenvolvida pelo organismo de normalização *Machinery Information Management Open Systems Alliance* (MIMOSA), proporciona uma arquitetura padrão para mover informação num sistema de manutenção condicionada. Inclui estruturas de dados e define métodos de interface para os seis blocos de funcionalidade definidos pela norma ISO 13374. A OSA-CBM utiliza elementos de dados definidos pela *Open Systems Architecture for Enterprise Application Integration* (OSA-EAI) e pode ser implementada sob a forma de serviços *Web*. A OSA-EAI também pertence à família de normas MIMOSA e visa definir estruturas para armazenar e mover informação conjunta sobre todos os aspetos do equipamento, incluindo a saúde e a capacidade futura da plataforma, para aplicações empresariais (MIMOSA, 2006). A Figura 32a apresenta as principais funções da OSA-EAI e a Figura 32b representa a integração da OSA-CBM com a OSA-EAI. A OSA-CBM enquadra-se na função Gestão Aberta da Saúde e Utilização de Ativos ou *Open Asset Health and Usage Management*.



(a)



(b)

Figura 32 – Principais funções da OSA-EAI (a) e integração da OSA-CBM com a OSA-EAI (b) (MIMOSA, 2006).

Nos documentos *CBM+ DoD Guidebook* (DoD, 2008) e *ADS-79D-HDBK* (2013), que descreve o sistema de manutenção condicionada aplicável às aeronaves do exército dos Estados Unidos, também podem ser obtidas orientações gerais sobre a implementação e gestão da manutenção condicionada. O *CBM+ DoD Guidebook* recomenda a aplicação da (OSA-EIA) para apoiar a conceção de estratégias de armazenamento e de partilha de dados. Esta publicação também apresenta um exemplo de uma arquitetura genérica para o CBM+ (Figura 33), denominada de *Operational Concept Graphic*. Trata-se de uma ilustração que visa descrever o problema abordado pela arquitetura e fornecer uma visão abrangente da estratégia CBM+. Além disso, permite descrever a estrutura geral e os elementos individuais de uma aplicação CBM+, e apoiar a validação e a justificação dos recursos requeridos. A criação de um esquema similar é recomendada quando se inicia o desenvolvimento de uma arquitetura específica. Depois, gradualmente deve ser conferido um nível maior de detalhe (DoD, 2008).

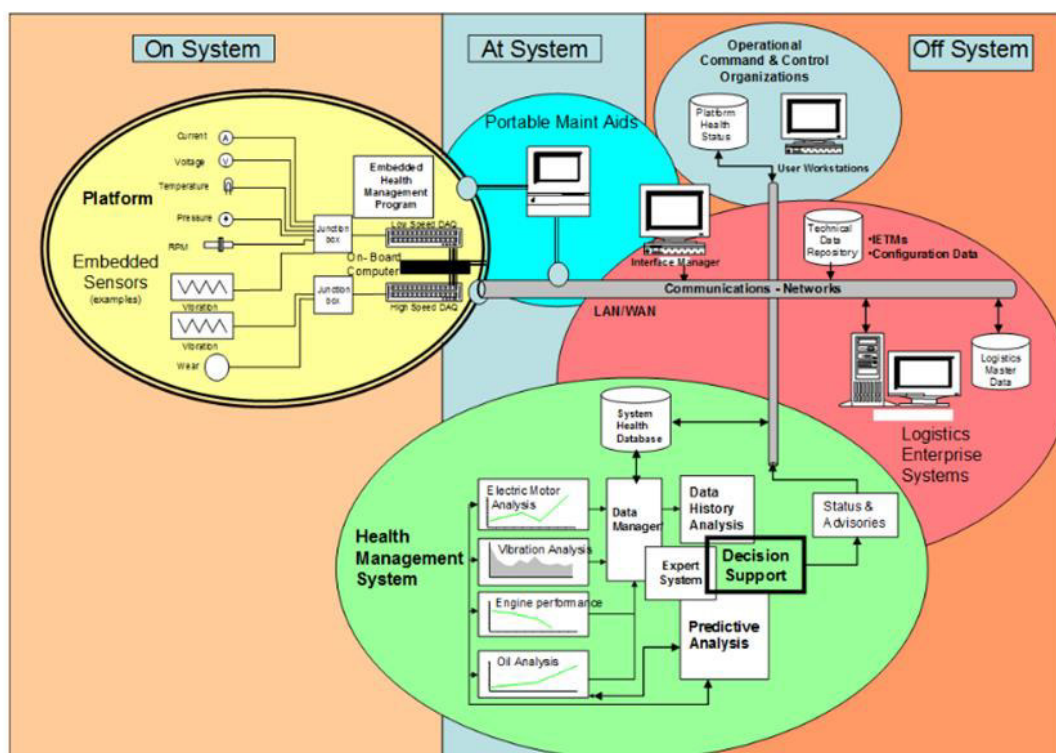


Figura 33 – Visão geral da arquitetura genérica CBM+ (DoD, 2008).

O desenvolvimento do documento normativo *ADS-79D-HDBK* (2013) foi apoiado pela MIMOSA e baseia-se na especificação OSA-CBM e na norma ISO 13374. Neste documento normativo, é apresentada uma arquitetura que mostra os elementos de nível superior de um sistema genérico de manutenção condicionada para aeronaves (Figura 34). O sistema representado é composto por quatro unidades de processamento principais, tais como: processador aéreo, estação terrestre, apoio portátil de manutenção e sistema de gestão da manutenção.

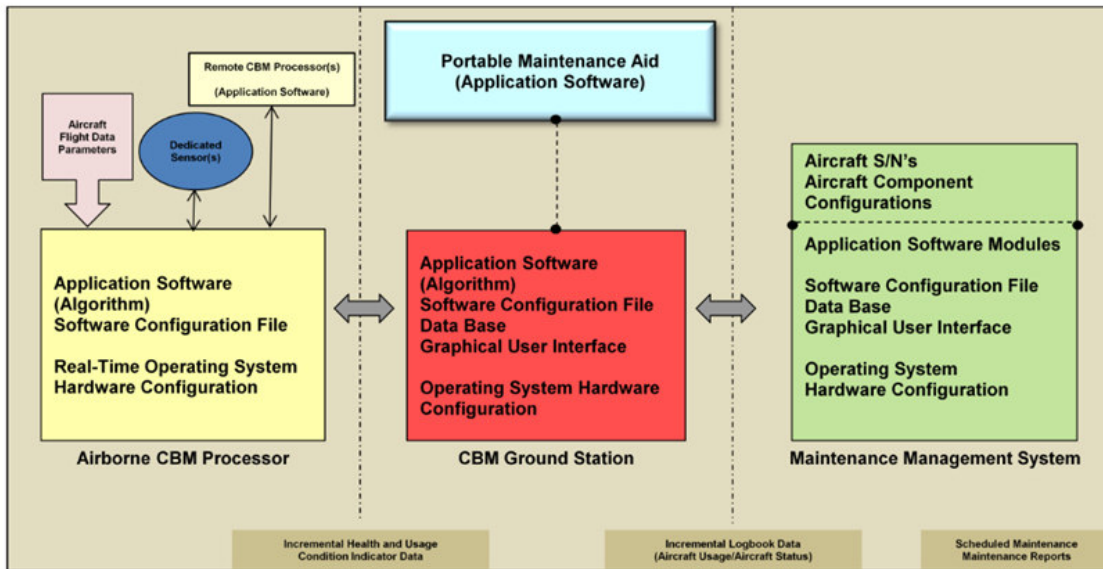


Figura 34 – Elementos da arquitetura do sistema de manutenção condicionada (ADS-79D-HDBK, 2013).

No âmbito da literatura científica, Niu *et al.* (2010) desenvolveram um sistema de manutenção condicionada baseado na arquitetura OSA-CBM, que aplica o RCM para minimizar o custo de manutenção, e explicita a estratégia de fusão de dados para monitorizar a condição do equipamento e para realizar atividades de diagnóstico e de prognóstico. O sistema de manutenção condicionada é composto por três blocos principais: RCM, manutenção condicionada e fusão de dados (Figura 35). Segundo os autores, o RCM deve ser utilizado para identificar componentes vitais, falhas potenciais e tarefas de manutenção apropriadas. Em seguida, estes recomendam a realização de uma análise de custos considerando as tarefas selecionadas e a definição de intervalos de manutenção com base na experiência. O sistema proposto envolve a aquisição de dados em tempo real utilizando diversos tipos de sensores. Através do sistema, Niu *et al.* (2010) propõem que a informação sobre a condição do equipamento seja obtida com base nas características extraídas depois do processamento de sinal. Segundo os autores, as características que permitem detetar falhas devem ser selecionadas para realizar o diagnóstico, enquanto as características que indicam uma tendência de degradação na condição do equipamento devem ser consideradas na previsão da RUL. Para proporcionar uma monitorização mais precisa e fiável, é proposta a fusão de múltiplos indicadores de degradação. De acordo com o processo desenvolvido para integrar o sistema e as técnicas de fusão de dados, a definição de ações de manutenção apropriadas deve ser apoiada pelos resultados da monitorização da condição, do diagnóstico e do prognóstico. A estratégia de fusão de dados foi aplicada em dois casos de estudo: diagnóstico de falhas num motor de indução e monitorização do estado de um compressor para efetuar o prognóstico de falhas. Esta investigação define uma estrutura geral para representar um programa

global de manutenção e propõem uma arquitetura para organizar um sistema de manutenção condicionada quando estão disponíveis dispositivos remotos de aquisição de dados. No entanto, não é proposto um procedimento formal ou metodologia para apoiar a implementação da manutenção condicionada. Para esse efeito, são necessárias orientações e ferramentas que facilitem a definição e a aplicação dos diferentes elementos da arquitetura de manutenção condicionada, e para avaliar a eficácia de custos. Além disso, este estudo não especifica como definir os parâmetros a monitorizar no equipamento e como seleccionar dispositivos ou técnicas de aquisição de dados.

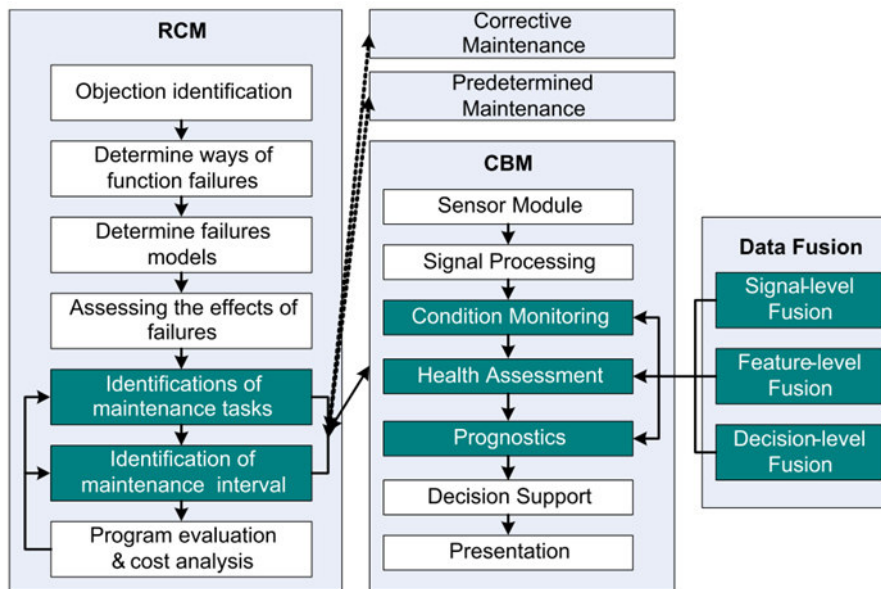


Figura 35 – Fluxograma do sistema de manutenção condicionada (Niu *et al.*, 2010).

Guillén, Crespo, Gómez, *et al.* (2016) desenvolveram uma estrutura com base em métodos e normas de referência, nomeadamente a norma ISO 13374 e a arquitetura OSA-CBM, e um formulário baseado na análise RCM para integrar a informação relacionada com cada modo de falha. A estrutura proposta representa e caracteriza os elementos fundamentais do ciclo de vida de um programa de manutenção condicionada. Este estudo estabelece um tratamento formal e uniforme para assegurar a inclusão de aspetos relevantes em cada solução de manutenção condicionada, a gestão apropriada do conhecimento, e a escalabilidade e replicabilidade das aplicações da manutenção condicionada. A estrutura proposta é composta por cinco blocos: descrição física, descrição funcional, fontes de informação, análise de sintomas e tomada de decisão (Figura 36). Cada bloco representa uma perspetiva ou área técnica que deve ser considerada na aplicação de um modelo de manutenção condicionada. A gestão da informação associada a cada bloco pode ser realizada utilizando sistemas individuais de *software*. A descrição física e a análise funcional permitem relacionar a manutenção condicionada com a perspetiva do RCM e definir os modos de falha. A estrutura restante é estabelecida considerando os modos de falha identificados. A

Unified Modelling Language (UML) foi utilizada para representar os diferentes elementos da estrutura e as suas relações. A estrutura desenvolvida foi testada num caso de estudo que visava realizar o prognóstico de um modo de falha relativo a um transformador de corrente, com base em estimativas do risco efetuadas em tempo real. Embora esta investigação apresente conceitos relevantes que devem ser abordados para definir uma solução de manutenção condicionada abrangente e evidencie as relações entre os mesmos, a sua contribuição é meramente teórica. Assim, para desenvolver uma aplicação específica de manutenção condicionada são necessárias mais orientações, sobretudo para apoiar a definição das fontes de informação, e a análise da viabilidade técnica e financeira da manutenção condicionada.

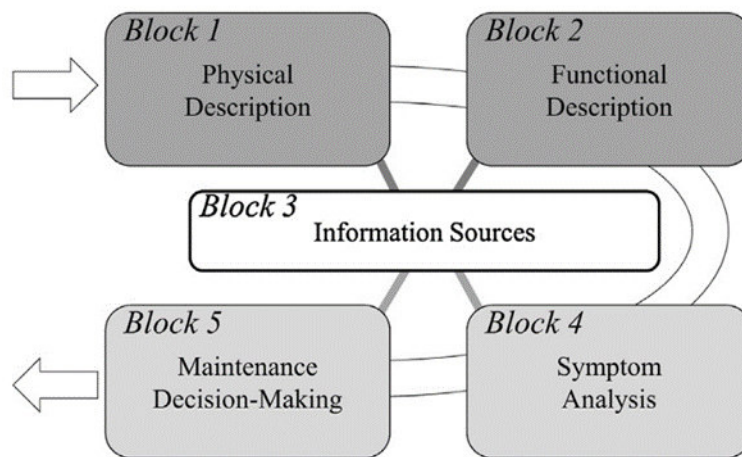


Figura 36 – Blocos da estrutura para a manutenção condicionada (Guillén, Crespo, Gómez, *et al.*, 2016).

A estrutura desenvolvida por Guillén, Crespo, Gómez, *et al.* (2016) distingue-se da estrutura proposta por Niu *et al.* (2010), visto que não aborda a análise dos custos associados à aplicação da manutenção condicionada e o seu principal objetivo é fornecer acesso a informação padronizada sobre a manutenção condicionada (gestão do conhecimento), de modo a apoiar a gestão de diferentes tipos de aplicações e a facilitar a sua integração. No caso da estrutura definida por Niu *et al.* (2010), procura-se retratar a integração da estratégia de fusão de dados no processo de manutenção condicionada e caracterizar o seu funcionamento. Além disso, a estrutura de Niu *et al.* (2010) aplica o RCM para apoiar a seleção do tipo de manutenção, enquanto a estrutura de Guillén, Crespo, Gómez, *et al.* (2016) não contempla a seleção do tipo de manutenção.

Nuñez & Borsato (2017, 2018) desenvolveram um modelo ontológico genérico, designado de *OntoProg*, que visa apoiar a implementação do PHM, de uma forma uniforme, em diferentes contextos produtivos. Este modelo permite armazenar conhecimento para a tomada de decisão, com vista a possibilitar

intervenções de manutenção baseadas na condição dos componentes do equipamento. Porém, a implementação do modelo requer conhecimentos especializados sobre ontologia. Segundo os autores do estudo, para definir a ontologia, foi necessário normalizar termos e conceitos relacionados com a análise de falhas e com as técnicas de análise da condição de componentes mecânicos. Os termos adotados foram obtidos a partir de normas internacionais e publicações científicas. Posteriormente, foram organizados em classes e subclasses, formando uma hierarquia de relações, conforme mostra a Figura 37.

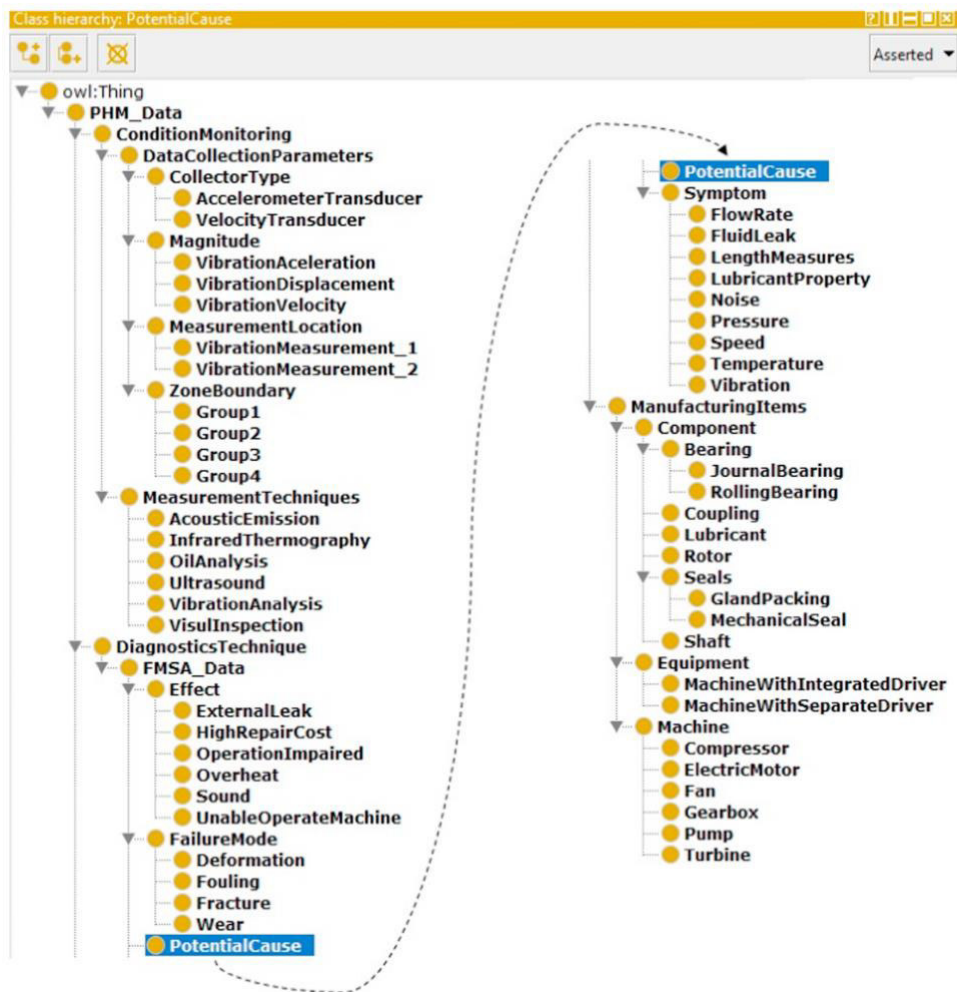


Figura 37 – Hierarquia de classes do modelo *OntoProg* (Nuñez & Borsato, 2018).

O processo de relação da ontologia foi realizado através da linguagem *Semantic Web Rule Language* (SWRL), para possibilitar a criação de regras transitivas nas propriedades dos objetos. Assim, a ontologia também inclui termos para estabelecer a relação entre classes (propriedades dos objetos) e termos destinados a dotar as classes de características com restrições (propriedades dos dados). Para representar os diferentes elementos físicos a analisar, associando-os a locais específicos de medição, são utilizadas instâncias. A ontologia também permite gerar avisos, considerando os valores dos parâmetros medidos

e os limites predefinidos para cada parâmetro. A aplicação do modelo ontológico foi demonstrada utilizando dados recolhidos a partir dos registos de funcionamento e de manutenção de uma bomba centrífuga. Inicialmente, selecionaram-se os componentes do equipamento e descreveram-se as funções de cada componente. Em seguida, definiram-se os modos de falha relevantes e as técnicas de medição mais adequadas aplicando a ferramenta *Failure Mode and Symptoms Analysis (FMSA)*, de acordo com o procedimento definido na norma ISO 13379–1:2012. A aplicação da ferramenta FMSA envolve a identificação de modos de falha, efeitos, causas e técnicas de medição referentes a cada componente. Os modos de falha prioritários são definidos em função da severidade do seu efeito. Enquanto a técnica de medição mais adequada é definida com base no valor do Número de Prioridade de Monitorização (NPM). Este indicador resulta da multiplicação do valor atribuído a quatro critérios relacionados com o modo de falha, nomeadamente a severidade do efeito, a probabilidade de deteção, a probabilidade de diagnóstico e a probabilidade de prognóstico. No entanto, o modelo proposto não considera critérios financeiros na seleção dos modos de falha, nem define critérios para apoiar a seleção de dispositivos de medição. Além disso, neste estudo não são proporcionadas orientações para analisar o impacto do desenvolvimento do modo de falha nos parâmetros a monitorizar. Por isso, considera-se que a utilização do modelo poderá ser útil para apoiar a implementação do PHM ou da manutenção condicionada, sobretudo, quando não existem dúvidas relativamente à sua viabilidade técnica e financeira.

As arquiteturas descritas anteriormente representam o modo como os diferentes elementos que compõem um sistema de manutenção condicionada se relacionam. No entanto, não definem atividades ou etapas para implementar a manutenção condicionada.

2.3.5.2. Metodologias

As metodologias e os procedimentos para implementar a manutenção condicionada identificados na literatura são descritos abaixo e resumidos na Tabela 27, apresentando as suas etapas.

Tabela 27 – Metodologias e procedimentos para a implementação da manutenção condicionada e do PHM.

Autor	Etapas para a implementação da manutenção condicionada ou PHM
Starr (1997)	Estudo da criticidade; auditoria de manutenção; selecionar unidades; associar a técnica ao modo de falha; monitorização de rotina; avaliar técnicas e avaliar a eficácia de custos.

Autor	Etapas para a implementação da manutenção condicionada ou PHM
Al-Najjar (2012)	Identificar áreas problemáticas; identificar componentes relevantes; identificar as causas dos danos e desenvolvimento; identificar sistemas relevantes de monitorização da condição; justificação técnica, selecionar os sistemas de monitorização da condição mais informativos; decidir um sistema e uma política de medição adequados; decidir o direcionamento de recolha de dados; determinar níveis normais de aviso e de substituição; análise de dados; apresentação dos resultados da análise; escalonar ações de manutenção; preparação para realizar tarefas de manutenção; avaliar os recursos humanos necessários; avaliar os impactos técnicos e financeiros; medidas para acompanhar as alterações no desempenho da manutenção; identificar o contributo da função manutenção.
Rastegari & Bengtsson (2014)	Estudo de conceito; definir responsabilidades; seleção de ativos; seleção de técnicas e tecnologias; instalação; tratamento de dados; formação; medição e estabelecimento de dados de referência; análise de dados; avaliação; melhoria.
López <i>et al.</i> (2014)	Tarefas preparatórias e plano de implementação; determinação de uma hierarquia de ativos; análise RCM do equipamento crítico; sinais e atribuição de métodos de deteção para modos de falha críticos; algoritmos para apoiar a tomada de decisão; transferir os resultados para o plano de manutenção e indicadores de negócio; acompanhar a eficiência e a eficácia da manutenção.
Lee <i>et al.</i> (2014)	Selecionar componentes críticos, organizar, filtrar e priorizar dados (<i>streamline</i>); selecionar características e ferramentas (<i>smart processing</i>); selecionar o <i>hardware</i> e a visualização da informação (<i>synchronize & see</i>); selecionar interface e conectividade (<i>standardize</i>); e selecionar ferramentas de gestão e cadeia de valor (<i>sustain</i>).
Semma <i>et al.</i> (2015, 2018)	Inventário; estudo de viabilidade, fase preparatória, fase de implementação, e avaliação e melhoria.
ISO 17359:2018	Análise custo-benefício; auditoria do equipamento; análise de fiabilidade e de criticidade; seleção de uma estratégia de manutenção apropriada; aquisição e análise de dados; determinar ação de manutenção; revisão.

Starr (1997) apresenta um procedimento para implementar a manutenção condicionada que contempla a seleção do equipamento a monitorizar e a escolha de técnicas de monitorização para a previsão de falhas. A seleção do equipamento é realizada considerando os resultados de uma análise de criticidade e suportada por uma auditoria de manutenção, destinada a priorizar as áreas cujos custos podem ser reduzidos de forma mais significativa. Para realizar a análise de criticidade, o autor recomenda a aplicação das ferramentas FTA e *Failure Mode Effects and Criticality Analysis* (FMECA). Depois da seleção do equipamento, os modos de falha mais relevantes são identificados com base no histórico de falhas do equipamento e as técnicas de monitorização são selecionadas para se adequarem aos modos de falha. De acordo com este autor, os modos de falhas podem ser ordenados utilizando um gráfico de Pareto, considerando a frequência e o tempo de inatividade associados. Este procedimento requer revisões regulares da seleção de técnicas, modos de falha e unidades do equipamento, com base numa análise custo-benefício. As revisões visam aperfeiçoar a seleção prévia e as configurações (ex.: intervalos

de monitorização e níveis de alarme), considerar modificações do equipamento, e tomar decisões sobre a extensão da manutenção condicionada a outros equipamentos. O procedimento apresentado foi aplicado em dois casos de estudo: robots para produção automatizada e instalação de serviços de construção. No entanto, devido a restrições temporais, as etapas de revisão e análise custo-benefício não foram concluídas. Embora este procedimento inclua etapas gerais para orientar a implementação da manutenção condicionada, não fornece orientações para selecionar os parâmetros a monitorizar, as técnicas de monitorização, a frequência de monitorização e os métodos de análise de dados, e para definir limites de aviso.

Al-Najjar (2012) desenvolveram um conjunto de etapas destinadas a implementar e organizar a manutenção condicionada de modo financeiramente eficiente. A abordagem definida não foi testada na prática, devido aos elevados recursos exigidos e à quantidade de tempo necessário para a aplicação. No entanto, foi comparada com procedimentos utilizados por três empresas para implementar técnicas de análise de vibrações. Depois de analisar as etapas dos procedimentos utilizados nas empresas, o autor verificou que a manutenção condicionada não foi implementada de um modo sistemático. Além disso, alguns dos procedimentos foram realizados de modo subjetivo, sem uma base científica. Mesmo assim, a aplicação das técnicas de análise de vibrações foi considerada financeiramente eficiente pelas empresas. Embora a abordagem proposta por Al-Najjar (2012) seja bastante abrangente, é sobretudo orientada para a aplicação da análise de vibrações e não proporciona orientações sobre o modo como deve ser realizada cada uma das etapas, nem métodos científicos para reduzir a dependência do conhecimento dos funcionários mais experientes.

Rastegari & Bengtsson (2014) definiram um processo de trabalho para implementar a manutenção condicionada, considerando as perspetivas técnica e organizacional. As etapas do processo de trabalho foram definidas com base nos resultados de um estudo destinado a apoiar a implementação *online* de duas técnicas de monitorização: a análise de vibrações e o método pulso de choque. Para obter informação relevante sobre o equipamento, foi utilizado um questionário. A informação recolhida inclui características técnicas, componentes críticos, modos de falha, indicadores de desempenho, frequência de falha, tipos de ações de manutenção realizadas, ações programadas, impacto na produção, e custos de falha e de manutenção. Posteriormente, a informação obtida foi considerada para definir uma abordagem de implementação estruturada. Estes autores salientam alguns dos fatores relevantes que devem ser considerados no processo de implementação, em particular no que diz respeito às técnicas aplicadas no caso de estudo. No entanto, não indicam de que modo deve ser realizada a implementação de cada etapa. Além disso, de acordo com os autores do estudo, as ferramentas e os métodos utilizados

ainda precisam de ser testados noutros tipos de equipamento industrial. Estes autores também consideram que deve ser realizada mais investigação sobre a aplicabilidade da manutenção condicionada a diferentes tipos de equipamento, técnicas e tecnologias para a manutenção condicionada, e avaliação da eficácia de custos da manutenção condicionada na indústria. O processo de trabalho desenvolvido por Rastegari & Bengtsson (2014) é comparável à abordagem de implementação apresentada por Starr (1997), embora seja dada mais importância aos aspetos organizacionais, nomeadamente a cultura e as competências necessárias dentro da organização.

López *et al.* (2014) identificaram um conjunto de etapas sequenciais que devem ser consideradas no desenvolvimento de uma metodologia prática para implementar uma solução de PHM. Estas tarefas foram definidas depois de uma análise teórica dos fatores de complexidade relacionados com a aplicação do PHM, tais como: tratamento de dados; comunicação e interfaces; elevado conhecimento tecnológico específico; e visão estratégica e holística e valor de negócio. Estes autores também recomendam a utilização do RCM para selecionar os itens mais apropriados do equipamento. Segundo López *et al.* (2014), esta tarefa pode ser suportada por ferramentas e metodologias, tais como FMEA, *Reliability Block Diagram* (RBD), *Reliability Prediction* (RP), FTA e *Event Tree Analysis* (ETA). Além disso, para acompanhar a eficácia e a eficiência da manutenção os autores sugerem a aplicação do método *Graphical Analysis for Maintenance Management* (GAMM). Para esse efeito, devem ser desenvolvidas duas ferramentas gráficas, nomeadamente intervenções de manutenção realizadas no equipamento em função do tempo, e nível de fiabilidade quando cada intervenção de manutenção é realizada em função do tempo.

Lee *et al.* (2014) apresentam uma metodologia para sistemas de máquinas rotativas destinada a converter dados multivariados em informação de prognóstico. A metodologia inclui procedimentos para identificar componentes críticos e ferramentas para selecionar os algoritmos mais adequados para aplicações específicas. Estes autores também propõem um conjunto de ferramentas visuais para exibir informação de diagnóstico para a tomada de decisão. A metodologia definida é designada de 5S, visto que os termos que representam cada uma das etapas são iniciados por S: *Streamline*, *Smart Processing*, *Synchronize & See*, *Standardize* e *Sustain* (Tabela 27). Estas etapas visam conceber e implementar gradualmente um sistema de PHM. Para identificar componentes críticos, é recomendado um gráfico de quatro quadrantes. Trata-se de um gráfico que permite representar a frequência de falha dos componentes em função do tempo médio de inatividade causado pelos componentes. Além disso, também permite avaliar a eficácia das políticas de manutenção. O principal objetivo é determinar a que quadrante os componentes relevantes pertencem. A definição dos quadrantes é baseada nos requisitos de produção e de manutenção. Assim, as atividades de prognóstico devem ser aplicadas a componentes

que se situam no quadrante que corresponde a uma baixa frequência de falha e a um elevado tempo médio de inatividade. Lee *et al.* (2014) também sugerem a utilização da ferramenta *Quality Function Deployment* (QFD) para selecionar algoritmos destinados a realizar o processamento e a classificação de sinal, e para estimar a condição futura do equipamento. O QFD permite criar uma lista ordenada de algoritmos associados a cada categoria, considerando as características dos dados que determinam a adequação de cada algoritmo. A informação resultante da aplicação dos algoritmos selecionados deve ser representada utilizando ferramentas visuais que facilitam a sua interpretação, nomeadamente gráfico de degradação, gráfico radar de desempenho, mapa de problemas e gráfico radar de risco. A metodologia proposta e as ferramentas visuais foram aplicadas em quatro casos de estudo: avaliação da condição de um alternador, manutenção preditiva de um refrigerador, monitorização da condição de um rolamento e gestão de risco de um motor. Embora esta metodologia forneça orientações úteis para apoiar a implementação do PHM, as perspetivas organizacional e financeira não são consideradas. Além disso, devem ser incorporadas outras ferramentas e procedimentos para melhor satisfazer os requisitos de diferentes domínios de aplicação.

Semma *et al.* (2015, 2018) desenvolveram uma abordagem para apoiar a implementação da manutenção baseada na análise de vibrações ou *Vibration-Based Maintenance* (VBM). A abordagem definida por estes autores é constituída por cinco fases: inventário, estudo de viabilidade, fase preparatória, fase de implementação, e avaliação e melhoria. A primeira fase envolve a realização de um inventário das máquinas existentes; a classificação, priorização e avaliação do desempenho das máquinas; e a avaliação das competências dos funcionários da área da manutenção. Na segunda fase, é verificada a viabilidade técnica, organizacional e financeira da VBM. A análise da viabilidade técnica contempla a identificação da velocidade de rotação das máquinas, a avaliação dos riscos associados ao processo de medição e a avaliação das dificuldades de acesso aos pontos de medição. Para analisar a viabilidade organizacional é recomendada a realização de uma auditoria, destinada a avaliar a maturidade da organização da manutenção. A análise da viabilidade financeira envolve a estimativa do lucro resultante da implementação do projeto. A terceira fase requer a elaboração de um cronograma, a definição de responsabilidades, a seleção do tipo de serviço (interno ou subcontratado), a seleção do equipamento crítico, a seleção dos parâmetros a monitorizar, a seleção dos dispositivos e da forma de monitorização, e a formação das pessoas envolvidas. Na quarta fase, são definidos procedimentos de atuação, indicadores de desempenho do processo de implementação, planos de formação e é realizada a análise de falhas. A quinta fase envolve a avaliação dos indicadores de desempenho do processo de implementação, para assegurar a correta execução das atividades definidas e promover uma lógica de

melhoria contínua. As duas primeiras fases foram implementadas numa empresa industrial (Semma *et al.*, 2018). No caso prático realizado, as máquinas foram classificadas e ordenadas com base em quatro critérios: tempo de reparação, grau de influência, probabilidade de falha e criticidade associada ao tempo de paragem da produção. O grau de influência corresponde ao efeito na segurança, ambiente, qualidade do produto e custos. Enquanto a probabilidade de falha é representada pela frequência de avarias num período predefinido. Cada critério tem associada uma escala fixa e a pontuação total de cada máquina resulta da soma dos valores relativos aos quatro critérios. O desempenho das máquinas foi avaliado com base no valor dos indicadores OEE, MTBF e MTTR. Em seguida, esta informação foi utilizada para realizar uma análise preliminar do impacto da implementação da VBM. As competências dos agentes envolvidos foram avaliadas recorrendo a uma matriz que permite pontuar o nível de conhecimento e de experiência de cada colaborador no âmbito das tarefas a realizar. A viabilidade técnica da aplicação da VBM foi definida tendo em conta a velocidade de rotação do equipamento, o risco inerente à medição das vibrações e a dificuldade de acesso aos pontos de medição. Para analisar a viabilidade organizacional, os autores desenvolveram uma matriz destinada a classificar o desempenho da empresa relativamente a um conjunto de dez fatores. Cada fator foi avaliado de acordo com três níveis de maturidade: inocência, compreensão e excelência. Por fim, a análise da viabilidade financeira da implementação da VBM, aos componentes considerados, foi realizada comparando o custo de investimento com a soma dos seguintes custos: custo resultante de perdas de produção devido a falhas que poderiam ser evitadas através da monitorização das vibrações, custo dos serviços de manutenção realizados devido à ocorrência de defeitos de vibração e custo do stock de peças sobressalentes. A análise da abordagem proposta por Semma *et al.* (2015, 2018), permitiu constatar que algumas das suas fases são suficientemente genéricas para apoiar a implementação de outras técnicas de manutenção condicionada, para além da análise de vibrações. Porém, a análise da viabilidade técnica é, essencialmente, focada no âmbito da análise de vibrações.

A norma ISO 17359:2018 (*Condition monitoring and diagnostics of machines – General guidelines*) estabelece um procedimento abrangente para implementar um programa de monitorização da condição, que é ilustrado num fluxograma. Além disso, descreve uma abordagem genérica para estabelecer critérios de aviso, e realizar atividades de diagnóstico e prognóstico. Esta norma também fornece exemplos de parâmetros a monitorizar para um grupo de dez tipos máquinas nas quais a monitorização da condição é habitualmente aplicada. Para cada máquina, é efetuada a correspondência de exemplos de possíveis falhas com parâmetros e técnicas de medição a utilizar. No entanto, esta norma não proporciona recomendações para selecionar métodos de análise de dados para apoiar a tomada de decisão. A

aplicação desta norma requer a consulta de outros documentos normativos. Por exemplo, a norma estabelece que o diagnóstico e o prognóstico de falhas devem ser realizados de acordo com os procedimentos definidos nas normas ISO 13379-1 (*Condition monitoring and diagnostics of machines – Data interpretation and diagnostics techniques – Part 1: General guidelines*) e ISO 13381-1 (*Condition monitoring and diagnostics of machines – Prognostics – Part 1: General guidelines*), respetivamente.

2.3.6. Análise crítica da literatura

A revisão da literatura realizada sobre a manutenção condicionada, teve como principal objetivo analisar e comparar as abordagens existentes para apoiar a implementação da manutenção condicionada, e identificar modelos de análise de dados sobre a condição do equipamento. A maioria dos estudos no domínio da manutenção condicionada limitam o seu âmbito aos modelos de diagnóstico e de prognóstico de falhas, e modelos de otimização. No entanto, para assegurar decisões precisas e financeiramente eficientes, a definição e aplicação dos métodos e modelos de manutenção condicionada devem ser realizadas no âmbito de uma abordagem de implementação abrangente. Nesse sentido, deve procurar-se definir procedimentos adequados, que possam ser adaptados de acordo com os requisitos de cada aplicação da manutenção condicionada.

A revisão da literatura permitiu identificar seis arquiteturas e estruturas que representam sistemas de manutenção condicionada (ADS-79D-HDBK, 2013; DoD, 2008; Guillén, Crespo, Gómez, *et al.*, 2016; MIMOSA, 2006; Niu *et al.*, 2010; Nuñez & Borsato, 2017, 2018). A arquitetura OSA-CBM permanece a principal referência neste domínio e constituiu a base para o desenvolvimento de duas das estruturas analisadas. Estas estruturas promovem uma melhor compreensão dos conceitos relacionados com a manutenção condicionada, no entanto não fornecem informação suficiente para implementar um sistema de manutenção condicionada. Assim, a utilização do RCM para sistematizar a aplicação da manutenção condicionada é recomendada por alguns dos autores, nomeadamente Niu *et al.* (2010) e Guillén, Crespo, Gómez, *et al.* (2016). Além disso, foram encontradas quatro metodologias que descrevem etapas para apoiar a implementação da manutenção condicionada (Al-Najjar, 2012; ISO 17359, 2018; Rastegari & Bengtsson, 2014; Starr, 1997), duas metodologias para apoiar o desenvolvimento de sistemas de PHM (Lee *et al.*, 2014; López *et al.*, 2014) e uma metodologia para apoiar, exclusivamente, a implementação da VBM (Semma *et al.*, 2015, 2018). No que diz respeito às metodologias identificadas na literatura académica, somente os procedimentos propostos por Starr (1997), Rastegari & Bengtsson (2014), Lee *et al.* (2014) e Semma *et al.* (2015, 2018) foram aplicados em casos de estudo. A aplicação em contexto real proporciona a oportunidade de refinar e validar os procedimentos definidos, no entanto é muitas

vezes dificultada por restrições de tempo e de recursos. Esta circunstância representa uma limitação para a investigação na área da manutenção condicionada. As abordagens de implementação propostas dependem consideravelmente da existência de experiência técnica no âmbito da manutenção condicionada. Este conhecimento nem sempre está disponível nas empresas e, muitas vezes, resulta em decisões subjetivas e pouco rigorosas. Por isso, tornar a manutenção condicionada acessível para um número maior de empresas e aumentar os benefícios associados à sua implementação é um grande desafio para os investigadores.

A revisão da literatura mostrou que algumas das tarefas mais relevantes que devem ser abordadas na implementação da manutenção condicionada são:

- Selecionar componentes, modos de falha e parâmetros a monitorizar;
- Identificar as causas e os sintomas dos modos de falha;
- Associar os parâmetros já monitorizados ou indicadores da condição a modos de falha específicos;
- Identificar e aplicar técnicas de medição apropriadas;
- Selecionar métodos e *software* para analisar dados sobre a condição;
- Estabelecer limites de aviso para os parâmetros monitorizados ou para os indicadores da condição;
- Definir métodos e ferramentas para apoiar a tomada de decisão de manutenção;
- Realizar uma análise custo-benefício.

Considera-se que a metodologia desenvolvida por Lee *et al.* (2014) é a contribuição mais relevante para apoiar a execução das tarefas apresentadas de um modo simples e direto. Esta metodologia inclui ferramentas gráficas para identificar componentes críticos, selecionar métodos de processamento de sinal e de análise de dados, e para apresentar informação útil para a tomada de decisão de manutenção. No entanto, este trabalho foca-se somente nas máquinas rotativas e não aborda a definição de limites de aviso e frequências de monitorização. Por isso, a metodologia deve ser complementada com outras ferramenta e métodos. As abordagens desenvolvidas por Al-Najjar (2012), Rastegari & Bengtsson (2014) e ISO 17359:2018 são as mais abrangentes, uma vez que é dada igual importância às perspetivas organizacional, financeira e técnica. No entanto, deve ser realizada mais investigação com vista a facilitar a sua implementação, nomeadamente definir ferramentas e técnicas para organizar e analisar a informação de cada etapa de implementação e apoiar a tomada de decisão.

A revisão da literatura mostrou que o número de estudos que fornecem abordagens para a implementação da manutenção condicionada é muito reduzido. Embora alguns dos procedimentos apresentem uma lista extensa de etapas de implementação, são necessárias orientações e ferramentas para facilitar a aplicação e aumentar a eficácia de cada etapa. Também devem ser estabelecidos métodos para avaliar a relação custo-benefício do processo de manutenção condicionada. Além disso, as abordagens propostas ainda precisam de validação prática e aperfeiçoamento, que apenas pode ser alcançado com base na sua aplicação em diferentes contextos.

Em geral, a implementação da manutenção condicionada em empresas depende da experiência dos técnicos de manutenção e não é realizada de modo sistemático. Esta circunstância pode originar decisões ineficazes e ineficientes ou desencorajar a aplicação da manutenção condicionada em empresas onde existe falta de conhecimento técnico. Por isso, o desenvolvimento de uma metodologia genérica e abrangente que possa apoiar a implementação da manutenção condicionada a diferentes tipos de equipamento assume uma grande relevância. A metodologia pode ser complementada com métodos, técnicas e ferramentas existentes.

REQUISITOS E ESPECIFICAÇÕES DA METODOLOGIA

A análise da literatura permitiu concluir que era necessária uma metodologia que fornecesse uma abordagem estruturada para apoiar a análise da viabilidade da manutenção condicionada, de forma a facilitar a sua implementação a diferentes tipos de equipamentos e em diversos contextos organizacionais. Por isso, procurou-se desenvolver uma metodologia simples que pudesse ser utilizada em empresas de diferentes dimensões, níveis de maturidade na gestão da manutenção e setores de atividade, designadamente a indústria transformadora e de produção de energia, o setor da construção e o setor da saúde.

O estudo da viabilidade da aplicação da manutenção condicionada recorrendo a sensores é, habitualmente, uma tarefa complexa e demorada, que requer a identificação e a análise dos modos de falha dos componentes do equipamento. Por este motivo, considerou-se que seria vantajoso que a metodologia desenvolvida comesçasse por apoiar a seleção de políticas de manutenção que podem ser aplicadas de imediato, com base na informação associada ao modo de falha e tendo em conta os custos associados a cada política. Assim, a metodologia poderá ser utilizada para definir, de uma forma rápida, o plano de manutenção dos equipamentos de uma empresa. Isto contribuirá para que os benefícios potenciais da sua aplicação sejam superiores e para se obter um retorno quase imediato do esforço empreendido.

Esta característica distingue a metodologia desenvolvida das abordagens de apoio à implementação da manutenção condicionada identificadas na literatura, visto que, em geral, não contemplam a possibilidade de serem aplicadas outras políticas de manutenção. Salienta-se ainda que, apesar de a utilização da metodologia RCM ser recomendada, em alguns estudos, para sistematizar a implementação da manutenção condicionada, não são fornecidas orientações para auxiliar a sua aplicação. Este facto reforça a relevância da definição de uma metodologia que apoie, de forma integrada, o planeamento da manutenção e a implementação da manutenção condicionada.

No âmbito da metodologia proposta, também se pretende que, sempre que possível, a implementação da manutenção condicionada possa começar por ser realizada recorrendo a equipamentos externos de fácil utilização e/ou a uma análise subjetiva realizada por um técnico, com base nos sentidos.

Posteriormente, se for vantajoso, estas práticas serão progressivamente substituídas por sistemas de monitorização utilizando sensores instalados no equipamento, depois de confirmada a sua eficácia.

Neste capítulo, apresentam-se os requisitos e as especificações em que se baseou o desenvolvimento da metodologia proposta para orientar a seleção de políticas de manutenção e apoiar a implementação da manutenção condicionada.

3.1. Requisitos

Este trabalho visou desenvolver uma metodologia destinada a orientar a definição de políticas de manutenção que, no seu conjunto, permitam obter uma redução do custo global da manutenção, através da diminuição dos custos das ações de manutenção e dos custos induzidos pelas falhas. Nesse sentido, pretendeu-se que a metodologia pudesse auxiliar a classificação das máquinas e dos respetivos componentes em função da sua criticidade, com base em critérios alinhados com os objetivos da empresa onde se pretende implementar a manutenção condicionada. Desta forma, os esforços poderão ser concentrados, em primeiro lugar, nos componentes cuja falha funcional tem um impacto mais significativo no processo produtivo e no contexto de operação, nomeadamente em termos de segurança, ambiente, qualidade, disponibilidade do equipamento, e custos de manutenção e de perdas de produção.

Para os modos de falha dos componentes mais críticos, pretende-se que a política de manutenção associada permita impedir a ocorrência da falha funcional. Assim, deverá verificar-se se já existem políticas de manutenção preventiva associadas a estes componentes e deverá ser efetuada uma análise das políticas existentes, de forma a identificar necessidades de melhoria. Nestes casos, a aplicação da manutenção condicionada deverá ser comparada com a manutenção preventiva sistemática, a fim de identificar a opção que apresenta a melhor relação de custo-benefício. Sempre que se verifique que a manutenção preventiva sistemática é o tipo de manutenção mais conveniente, pretendeu-se que a metodologia pudesse auxiliar a definição de periodicidades para as ações de manutenção preventiva sistemática, considerando o impacto dos modos de falha e o custo das ações de manutenção.

No que diz respeito à manutenção condicionada, pretendeu-se que a metodologia integrasse uma abordagem para apoiar a implementação da manutenção condicionada aos modos de falha de diferentes tipos de componentes. Esta abordagem destina-se a ser aplicada aos modos de falha selecionados, com base numa análise prévia orientada pela metodologia.

Pretendeu-se que a abordagem desenvolvida proporcionasse orientações para priorizar os modos de falha e analisar a viabilidade técnica da manutenção condicionada, considerando as características específicas de cada modo de falha selecionado e a disponibilidade de dispositivos de medição apropriados. No âmbito da análise da aplicabilidade da manutenção condicionada, são consideradas três situações distintas: parâmetros que já são monitorizados, parâmetros associados a sensores instalados no equipamento que não estão a ser monitorizados e parâmetros associados a sensores a instalar. Para as duas últimas situações, é necessário definir os parâmetros que serão efetivamente monitorizados.

Nos casos em que se verifica que a manutenção condicionada é aplicável, pretendeu-se que a abordagem fornecesse informação para analisar os custos associados à implementação da manutenção condicionada, de forma a permitir a sua comparação com os custos de outras políticas de manutenção aplicáveis e, assim, identificar aquela que é mais vantajosa financeiramente.

Do ponto de vista técnico, pretendeu-se que a abordagem de apoio à implementação da manutenção condicionada fornecesse orientações para associar parâmetros monitorizados ou a monitorizar no equipamento aos modos de falha dos componentes classificados como críticos, com vista a antever a ocorrência de falhas funcionais. Nesse sentido, definiu-se como requisito que a abordagem apoiasse a identificação de parâmetros que, individualmente ou em conjunto, permitam detetar a iniciação de cada modo de falha (falha potencial) com a antecedência necessária para impedir a falha funcional do componente, através da realização de uma ação de manutenção adequada.

Também se definiu como requisito que a abordagem desenvolvida permitisse orientar a análise do impacto da falha potencial em parâmetros relacionados com o funcionamento do equipamento, a fim de identificar alterações significativas nos valores medidos ou padrões de comportamento na iminência de falhas funcionais. Sempre que esta associação possa ser feita, a análise dos valores medidos deve permitir aferir se o intervalo de tempo entre o instante em que a falha potencial se inicia e o instante em que a falha funcional se verifica é suficientemente longo para permitir a realização da ação de manutenção correspondente. A associação de parâmetros a modos de falha poderá basear-se nos seguintes tipos de informação:

- Registos de falhas e dos valores dos parâmetros no mesmo intervalo de tempo;
- Recomendações do fabricante do equipamento;
- Parecer dos engenheiros/técnicos de manutenção;
- Artigos científicos e normas internacionais existentes no domínio da manutenção condicionada.

Depois de definir os parâmetros a monitorizar, caso seja necessário instalar dispositivos de medição no equipamento ou utilizar dispositivos externos de teste, pretendeu-se que a abordagem pudesse orientar a seleção da técnica de aquisição de dados a aplicar em função do parâmetro definido. Pretendeu-se ainda que a abordagem pudesse apoiar a análise dos valores medidos, possibilitando a avaliação e a classificação do estado do componente monitorizado ou a previsão do estado futuro.

Os requisitos descritos nesta secção encontram-se sumariados na Tabela 28.

3.2. Especificações

Para cada um dos requisitos relativos à metodologia de seleção da política de manutenção e de apoio à implementação da manutenção condicionada, foram identificadas especificações. Na Tabela 28, é estabelecida a relação entre os requisitos e as especificações.

Tabela 28 – Definição de especificações com base nos requisitos definidos previamente.

Requisitos	Especificações
Definir políticas que permitam reduzir o custo global da manutenção	Metodologia de seleção da política de manutenção e de apoio à implementação da manutenção condicionada
Classificar as máquinas em função da criticidade	Método para ranking dos equipamentos
Classificar os componentes em função da criticidade	Método de classificação multicritério dos componentes do equipamento
Identificar a política de manutenção mais apropriada em função da criticidade do modo de falha e do custo da política	Procedimento para definir a criticidade dos modos de falha Seleção da política de manutenção Análise de custos: <ul style="list-style-type: none"> • Manutenção corretiva; • Manutenção preventiva sistemática; • Manutenção preventiva condicionada; • Ação de melhoria.
Definir periodicidades para as ações de manutenção preventiva sistemática	Definição dos parâmetros da política de manutenção preventiva sistemática
Apoiar a implementação das atividades de manutenção condicionada	Abordagem de apoio à implementação da manutenção condicionada
Analisar a aplicabilidade da manutenção condicionada	Procedimento para identificar os modos de falha prioritários

Requisitos	Especificações
	Procedimento para analisar o impacto dos modos de falha em parâmetros do equipamento/processo
Definir os parâmetros do equipamento a monitorizar, relacionando-os com os modos de falha identificados	Procedimento para identificar os modos de falha prioritários Procedimento para analisar o impacto dos modos de falha em parâmetros do equipamento/processo
Selecionar o método de análise dos valores medidos	Procedimento para analisar o impacto dos modos de falha em parâmetros do equipamento/processo
Selecionar a técnica de aquisição de dados a aplicar em função do parâmetro definido	Procedimento para definir os dispositivos de medição de dados

No âmbito de cada uma das especificações, foram definidos elementos relevantes subjacentes à metodologia de seleção da política de manutenção e de apoio à implementação da manutenção condicionada. Estes elementos encontram-se descritos no Apêndice III.

METODOLOGIA DE SELEÇÃO DA POLÍTICA E DE APOIO À IMPLEMENTAÇÃO DA MANUTENÇÃO CONDICIONADA

Este capítulo apresenta a descrição da estrutura da metodologia de seleção da política de manutenção e de apoio à implementação da manutenção condicionada, e dos seus métodos e procedimentos.

4.1. Estrutura da metodologia

Foi definido que a metodologia de seleção da política de manutenção e de apoio à implementação da manutenção condicionada seria composta por um conjunto de métodos e de procedimentos relacionados. Os métodos e os procedimentos foram estabelecidos e organizados de forma a permitir que a metodologia seja aplicada gradualmente aos equipamentos de uma empresa, estabelecendo prioridades com base na criticidade dos equipamentos, dos seus componentes e dos modos de falha associados a cada componente.

O esquema da Figura 38 mostra a estrutura geral da metodologia. A estrutura apresentada identifica as atividades que os métodos e os procedimentos que compõem a metodologia permitem efetuar, e os formulários definidos para organizar a informação resultante da sua aplicação. Os métodos são representados pela letra “M”, os procedimentos pela letra “P” e os formulários pela letra “F”. O algarismo associado a cada um destes elementos permite que possam ser identificados de forma abreviada.

Na estrutura geral, também foram representadas atividades destinadas a complementar os métodos e os procedimentos definidos. Estas atividades envolvem a utilização de ferramentas de apoio à decisão (caixas a azul escuro), de técnicas de análise de custos e de modelos para a definição do intervalo de manutenção preventiva (caixas a cinzento).

Os diferentes elementos que integram a metodologia estão interligados e agrupados, de acordo com a função que desempenham (caixas a tracejado): “seleção da política de manutenção”, “apoio à implementação da Manutenção Preventiva Condicionada (MPC)”, “análise de custos” e “definição dos parâmetros da política de Manutenção Preventiva Sistemática (MPS)”. No âmbito da metodologia, a política de MPS é considerada como sendo a substituição preventiva de componentes do equipamento em intervalos de tempo predefinidos.

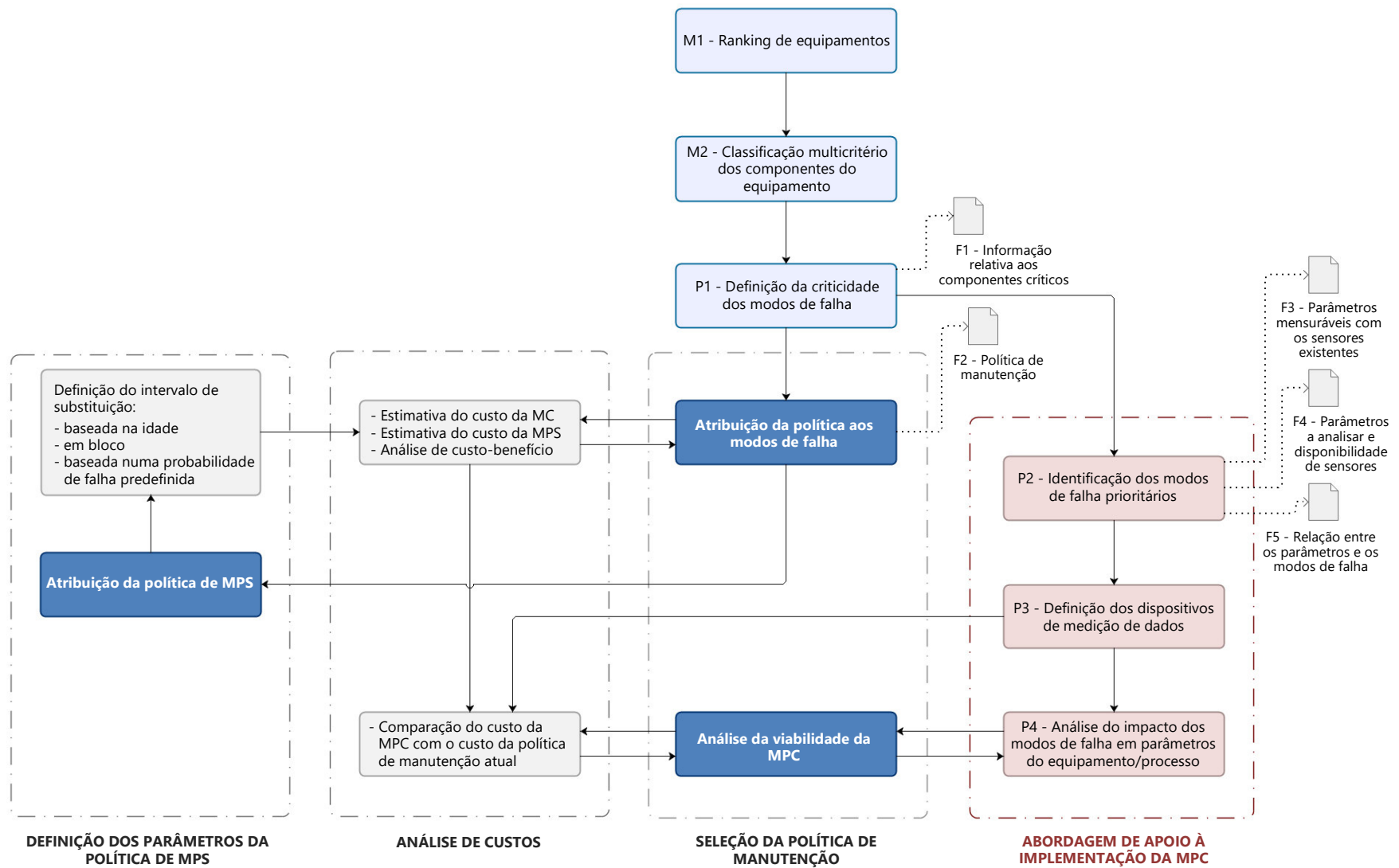


Figura 38 – Representação da estrutura da metodologia.

A “seleção da política de manutenção” contempla a atribuição de políticas de manutenção aplicáveis de imediato, com base em informação associada ao Modo de Falha (MF), e a análise da viabilidade da MPC, após a aplicação da abordagem de “apoio à implementação da MPC” a modos de falha previamente selecionados. Esta opção permite que a análise da viabilidade da aplicação da MPC possa ser efetuada de forma independente e com um ritmo adequado à sua complexidade. A “análise de custos” possibilita a estimativa e a comparação dos custos associados a diferentes tipos de políticas, com vista a auxiliar a “seleção da política de manutenção”. Desta forma, também é assegurada a seleção da política mais favorável do ponto de vista financeiro. Tendo em conta que a MPC nem sempre é aplicável e vantajosa financeiramente, definiu-se que a metodologia também deveria apoiar a “definição dos parâmetros da política de MPS”. Esta opção é particularmente útil, quando os modos de falha têm uma criticidade elevada e a sua função de risco é crescente.

Na aplicação da metodologia desenvolvida, é utilizada informação do histórico de manutenção (corretiva e preventiva) dos equipamentos, informação qualitativa sobre os componentes críticos de cada equipamento (registada no formulário F1) e informação relativa aos sensores existentes no equipamento (registada no formulário F3).

A implementação inicia-se com a aplicação do “M1 – Método para ranking dos equipamentos”. Este método tem como objetivo ordenar um conjunto de máquinas em função da sua criticidade, recorrendo aos critérios “Tempo de paragem” e “Custo de manutenção”. Os restantes métodos e procedimentos da metodologia destinam-se a ser aplicados a uma máquina de cada vez, começando sempre por aquela que tem o índice de criticidade mais elevado no ranking.

O “M2 – Método de classificação multicritério dos componentes do equipamento” é utilizado para classificar os componentes da máquina selecionada de acordo com a sua criticidade. A classificação é efetuada considerando critérios relacionados com a função desempenhada pelo componente e com o impacto da sua falha na produção. Posteriormente, com base no resultado da classificação, são identificados os componentes críticos. Os critérios de classificação foram selecionados de forma a que a criticidade do componente também defina a sua importância no âmbito da gestão de peças sobressalentes.

O “P1 – Procedimento para definir a criticidade dos modos de falha” é aplicado aos modos de falha dos componentes críticos. Este procedimento proporciona orientações para classificar os modos de falha em

função da natureza da falha funcional que originam e do respetivo impacto, organizando-os em categorias e subcategorias predefinidas, e para caracterizar o comportamento da função de risco de cada modo de falha.

A seleção da política de manutenção para cada modo de falha é realizada recorrendo a árvores de decisão. De forma a simplificar o processo de atribuição da política, foi definida uma árvore de decisão aplicável aos modos de falha com função de risco não crescente (AD1) e uma árvore de decisão aplicável aos modos de falha com função de risco crescente (AD2). Em ambos os casos, a decisão relativamente à política a adotar baseia-se na subcategoria do modo de falha e no custo de aplicação das políticas recomendadas para os modos de falha dessa subcategoria. Os custos associados às diferentes políticas são estimados e comparados utilizando os métodos de análise propostos no âmbito da metodologia.

As políticas Manutenção Corretiva (MC), Tarefa de Detecção (TD) e ação de melhoria são consideradas nas árvores de decisão AD1 e AD2. Enquanto a MPS e a Tarefa de Inspeção (TI) só são consideradas na AD2. A TI é um subtipo da MPC, que envolve a análise da condição do componente, com base nos sentidos (ex.: análise visual) e/ou recorrendo a dispositivos externos de medição.

Sempre que a MPS é recomendada, aplica-se a árvore de decisão para a atribuição da política de MPS (AD4). Esta árvore de decisão foi definida com vista a selecionar uma política de MPS específica para cada modo de falha. Posteriormente, a definição do intervalo de substituição preventiva é efetuada utilizando modelos propostos na literatura, associados às políticas de substituição baseada na idade, substituição em bloco e substituição baseada numa probabilidade de falha predefinida. O custo da política de MPS é estimado tendo em conta o intervalo de substituição.

A informação resultante da aplicação do procedimento P1 permite selecionar de forma direta os modos de falha candidatos à aplicação da MPC utilizando sensores. Posteriormente, a adoção da MPC pode ser considerada de forma gradual, começando pelos modos de falha prioritários.

Em geral, a aplicação da MPC utilizando sensores exige a disponibilidade de recursos humanos com competências técnicas adequadas e um esforço significativo devido à necessidade de analisar grandes quantidades de dados. Além disso, poderá motivar gastos elevados, relacionados com a aquisição de sensores e de tecnologias de informação e comunicação. Assim, a definição de políticas de MPC e a tomada de decisão relativamente à adoção de uma política específica requerem frequentemente longos períodos de tempo. Por este motivo, optou-se por não considerar a MPC com recurso a sensores na AD2.

A metodologia definida inclui uma abordagem destinada a apoiar a implementação da MPC de uma forma organizada e progressiva. Esta abordagem é composta por três procedimentos sequenciais, cuja aplicação permite analisar a viabilidade técnica da política de MPC e obter a informação necessária para efetuar a análise da sua viabilidade financeira, recorrendo ao método de análise de custos proposto no âmbito da metodologia.

O "P2 – Procedimento para identificar os modos de falha prioritários" fornece orientações para definir os parâmetros a monitorizar para aplicar a MPC a cada modo de falha e para priorizar os modos de falha para a análise da viabilidade técnica e financeira da política de MPC. Na aplicação deste procedimento, são considerados todos os modos de falha selecionados com base na análise da informação resultante da aplicação do procedimento P1. Sempre que se justifique, também podem ser selecionados modos de falha para analisar a viabilidade da implementação de uma TD utilizando sensores.

Caso o equipamento não disponha de sensores adequados para medir os parâmetros relacionados com os modos de falha selecionados, é aplicado o "P3 – Procedimento para definir os dispositivos de medição de dados". Este procedimento proporciona orientações para apoiar a seleção de sensores com características técnicas apropriadas e com o menor custo possível. A sua aplicação é realizada considerando um parâmetro de cada vez e começando pelos parâmetros relacionados com o modo de falha que tem a prioridade mais elevada.

Os custos relativos aos dispositivos de medição são considerados na análise da viabilidade financeira da MPC. A análise da viabilidade financeira envolve a comparação do custo de aplicação da MPC com o custo associado à política de manutenção atual, através do método proposto no âmbito da metodologia. Nesta análise, são contemplados todos os custos relacionados com a implementação e com a utilização da política de MPC, para o modo de falha considerado.

O "P4 – Procedimento para analisar o impacto dos modos de falha em parâmetros do equipamento/processo" é aplicado após a definição dos dispositivos de medição de dados, caso se verifique que a política de MPC é financeiramente viável. Neste procedimento, são fornecidas orientações para apoiar a análise da aplicabilidade e da eficácia da MPC, com base nos valores dos parâmetros monitorizados.

A decisão relativamente à aplicação da MPC utilizando sensores é tomada recorrendo a uma árvore de decisão (AD3). A MPC é recomendada somente se o custo associado for inferior ao custo da política de

manutenção atual e se a técnica utilizada for considerada eficaz. De outra forma, opta-se pela política de manutenção existente.

A aplicação da metodologia desenvolvida requer um conjunto de recursos tecnológicos específicos, destinados a adquirir e analisar dados sobre a condição dos equipamentos, manter os dados obtidos e a informação resultante da sua análise, e apresentar a informação de uma forma organizada e interativa. Estes recursos incluem meios físicos e digitais, tais como:

- Dispositivos de medição e transmissão de dados;
- Dispositivos de armazenamento;
- *Software* de análise de dados;
- Interface entre os sistemas de transmissão de dados e o *software* de análise de dados;
- Interface com o utilizador.

Nas secções seguintes, é efetuada uma descrição detalhada das funções, dos métodos e dos procedimentos da metodologia.

4.2. Método para ranking dos equipamentos

O método para ranking dos equipamentos visa identificar as máquinas prioritárias para aplicar os métodos e procedimentos subsequentes da metodologia de seleção da política de manutenção e de apoio à implementação da manutenção condicionada. Nesse sentido, é definido um ranking baseado na criticidade dos equipamentos de uma empresa ou de uma linha de produção. O equipamento que apresentar o índice de criticidade mais elevado é analisado em primeiro lugar. Os restantes equipamentos são analisados posteriormente, de acordo com a prioridade obtida no ranking.

No âmbito do método proposto, entendeu-se que o cálculo da criticidade deve ser realizado com base nos critérios “Tempo de paragem” e “Custo de manutenção”. Estes critérios foram definidos tendo em conta a sua relevância na literatura científica relacionada com a gestão da manutenção e a facilidade de acesso aos dados. Os dados associados estão habitualmente disponíveis nas empresas, através dos registos de avarias e dos consumos dos equipamentos. No entanto, sempre que se justifique, poderão ser contemplados outros critérios. O “Tempo de paragem” resulta da soma dos tempos de paragem resultantes da ocorrência de

avarias do equipamento para um período predefinido. Enquanto o “Custo de manutenção” corresponde ao custo dos componentes substituídos nas ações de manutenção.

Cada critério tem um peso relativo, que é atribuído em função da sua importância para a empresa. O índice de criticidade é determinado com base na soma ponderada dos dois critérios. Para esse efeito, os valores de ambos os critérios são normalizados.

O valor normalizado do critério “Tempo de paragem”, Tn_i , é calculado com base na expressão seguinte:

$$Tn_i = \frac{T_i - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (4.1)$$

Em que,

T_i é o tempo de paragem observado na máquina i .

T_{min} é o tempo de paragem mínimo observado.

T_{max} é o tempo de paragem máximo observado.

Tn_i é valor normalizado de T_i para a máquina i .

O valor normalizado do critério “Custo de manutenção”, Cn_i , é obtido da seguinte forma:

$$Cn_i = \frac{C_i - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} \quad (4.2)$$

Em que,

C_i é o custo de manutenção observado na máquina i .

C_{min} é o custo de manutenção mínimo observado.

C_{max} é o custo de manutenção máximo observado.

Cn_i é o valor normalizado de C_i para a máquina i .

De forma a obter o ranking dos equipamentos, após a normalização do valor dos critérios, procede-se ao cálculo do índice de criticidade, Cr_i , através da seguinte expressão:

$$Cr_i = w_T \times Tn_i + w_C \times Cn_i \quad (4.3)$$

Em que,

Cr_i é o índice de criticidade da máquina i .

w_T é o peso atribuído ao critério tempo de paragem, T .

w_C é o peso atribuído ao critério custo de manutenção, C .

O índice de criticidade está compreendido entre zero e um. Assim, quanto mais próximo o valor obtido estiver de um, mais crítico é considerado o equipamento.

4.3. Método de classificação multicritério dos componentes do equipamento

Este método tem como objetivo classificar os componentes do equipamento selecionado anteriormente. O método proposto foi definido por Teixeira, Lopes, & Figueiredo (2018), para apoiar a gestão de stocks de peças sobressalentes. Por isso, a utilização deste método tem a vantagem de permitir obter uma classificação que serve dois propósitos: identificar os componentes críticos do equipamento e definir a sua importância no âmbito da gestão de peças sobressalentes, com vista a definir políticas de gestão de stocks adequadas. Este método baseia-se em dois critérios: a “Função” e o “Impacto na produção”. Os níveis de cada critério são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Níveis dos critérios para classificar a criticidade dos componentes.

Função	Impacto na produção
1. Função auxiliar	0. Sem impacto
2. Função de segurança	1. Perdas de qualidade
3. Função indispensável ao processo	2. Redução de produtividade (desempenho)
	3. Paragem súbita

O critério “Função” representa a função desempenhada pelo componente no processo produtivo e tem os níveis descritos em seguida.

- **Função auxiliar:** A função desempenhada pelo componente é de auxílio ou de suporte ao processo de transformação do produto ou à função principal do equipamento, isto é, não interfere diretamente neste processo.

- **Função de segurança:** A falha de um componente com função de segurança poderá colocar em causa a segurança dos intervenientes. O componente geralmente não interfere diretamente na função do equipamento.
- **Função indispensável ao processo:** O componente contribui para a função principal do equipamento.

O critério “Impacto na produção” representa a consequência da falha do componente no processo produtivo e inclui os seguintes níveis:

- **Sem impacto:** A falha do componente não tem qualquer impacto no processo produtivo.
- **Perdas de qualidade:** A falha do componente origina produto defeituoso.
- **Redução de produtividade:** A falha do componente causa uma redução da quantidade produzida.
- **Paragem súbita:** A falha do componente provoca a paragem imediata da máquina e/ou do processo produtivo.

Para identificar a categoria de criticidade dos componentes, é aplicada uma matriz de combinações (Figura 39). As categorias de criticidade contempladas na matriz são: “Desejável”, “Essencial” ou “Vital”.

		Impacto na produção			
		0	1	2	3
Função	1	1	2	3	4
	2	2	-	4	5
	3	-	4	5	6

Desejável
Essencial
Vital

Figura 39 – Matriz de combinações.

Considera-se que, para os componentes classificados como “Desejável”, a falha tem um impacto baixo no processo produtivo, para os componentes classificados como “Essencial”, a falha tem um impacto médio no processo produtivo, e para os componentes classificados como “Vital”, a falha tem um impacto elevado no processo produtivo.

Os modos de falha dos componentes que desempenham uma função auxiliar (nível 1) e têm impacto na produção (níveis 1, 2 e 3), uma função de segurança (nível 2) ou uma função indispensável ao processo (nível 3) serão analisados com vista a definir a sua criticidade, utilizando o procedimento P1. A ocorrência da falha destes componentes poderá motivar perdas financeiras significativas. No caso dos componentes que desempenham uma função de segurança, a ocorrência da falha também poderá colocar em risco a segurança das pessoas. Por isso, estes componentes foram definidos como críticos. Assim, os modos de falha dos componentes com função auxiliar e sem impacto na produção (combinação 1x0 da matriz de combinações) não serão considerados na análise, visto que se entende que a sua ocorrência irá resultar em perdas financeiras moderadas ou ligeiras.

Na Figura 40, são evidenciadas as combinações da matriz da Figura 39 que correspondem aos componentes críticos.

		Impacto na produção			
		0	1	2	3
Função	1	1	2	3	4
	2	2	-	4	5
	3	-	4	5	6


Componentes críticos 

Figura 40 – Identificação das combinações correspondentes aos componentes críticos.

O método apresentado não considera como impacto a segurança. Este impacto é aferido com base na informação sobre os efeitos dos modos de falha, durante a aplicação do procedimento P1.

4.4. Procedimento para definir a criticidade dos modos de falha

A definição da criticidade tem como objetivo obter informação que permita apoiar a atribuição da política de manutenção a cada modo de falha, de acordo com a natureza da falha funcional que origina e tendo em conta o seu impacto. Depois de serem identificados todos os modos de falha possíveis, associados aos componentes críticos, são selecionados aqueles que poderão ter um impacto mais adverso no processo produtivo e/ou no contexto de operação (modos de falha críticos).

No sentido de apoiar a definição da criticidade dos modos de falha, foi definido um método de caracterização/classificação, apresentado de seguida.

As consequências da falha funcional de alguns componentes críticos poderão não ser imediatamente perceptíveis. Nestes casos, é fundamental assegurar a rápida deteção da falha, para não prolongar a indisponibilidade da função desempenhada pelo componente afetado e para impedir o consequente agravamento do estado do equipamento. Devido à sua natureza, considera-se que estas falhas requerem uma abordagem diferenciada. Assim, a definição da criticidade pressupõe a classificação de cada modo de falha, em função da natureza da falha funcional que origina, numa das seguintes categorias:

- **Categoria A:** a falha é detetada durante o funcionamento normal do equipamento (falha evidente).
- **Categoria B:** para detetar a presença da falha é necessário realizar uma tarefa de deteção específica (falha oculta).

Um modo de falha da Categoria A com impacto na segurança ou ambiente é classificado na subcategoria A.4. Caso o modo de falha não tenha impacto na segurança ou ambiente, se causar a paragem súbita do equipamento, é classificado na subcategoria A.3; se originar uma redução significativa de desempenho, é classificado na subcategoria A.2; e se resultar em perdas elevadas de qualidade, é classificado na subcategoria A.1. Os modos de falha das subcategorias A.2 e A.3 resultam geralmente em perdas elevadas de produção. Estas perdas poderão ser agravadas por tempos de intervenção longos, motivados pela dificuldade de acesso ao componente afetado ou pela propagação da falha a outros componentes do equipamento. Por sua vez, as perdas de qualidade advêm do fabrico de produto defeituoso devido à presença do modo de falha considerado. Caso o modo de falha resulte em perdas financeiras moderadas ou ligeiras, é classificado na subcategoria A.0. Esta circunstância verifica-se quando o tempo necessário para restabelecer o funcionamento normal do equipamento é reduzido e se o modo de falha em questão não tiver um impacto relevante na qualidade do produto.

Em geral, a ocorrência dos modos de falha da Categoria B poderá originar a perda de função ou redução de desempenho não detetável do componente afetado, o aumento do consumo de energia e/ou contribuir para o desenvolvimento de modos de falha da Categoria A. Um modo de falha da Categoria B que afeta dispositivos com funções de segurança ou contribui para o desenvolvimento de modos de falha da subcategoria A.4 é classificado na subcategoria B.4. Os dispositivos com funções de segurança têm como finalidade prevenir ou mitigar danos humanos, ambientais e/ou materiais durante o funcionamento do equipamento. Por isso,

importa assegurar que estejam disponíveis de forma permanente, mesmo quando a sua utilização é esporádica. Os modos de falha cuja ocorrência poderá afetar outras funções do equipamento são analisados de forma distinta. Estes modos de falha verificam-se em componentes que não desempenham funções de segurança e poderão contribuir para o desenvolvimento de modos de falha das subcategorias A.3, sendo classificados na subcategoria B.3; A.2, sendo classificados na subcategoria B.2; A.1, sendo classificados na subcategoria B.1; e A.0, sendo classificados na subcategoria B.0.

Na Tabela 30, são identificadas as categorias e as subcategorias definidas para classificar os modos de falha.

Tabela 30 – Categorias e subcategorias relativas aos modos de falha dos componentes críticos.

Categoria	Subcategoria
A – Falha evidente	A.0 – Causa perdas financeiras moderadas ou ligeiras
	A.1 – Causa perdas elevadas de qualidade
	A.2 – Causa redução significativa do desempenho
	A.3 – Causa a paragem súbita do equipamento
	A.4 – Tem impacto adverso na segurança ou ambiente
B – Falha oculta	B.0 – Contribui para originar modos de falha da subcategoria A.0
	B.1 – Contribui para originar modos de falha da subcategoria A.1
	B.2 – Contribui para originar modos de falha da subcategoria A.2
	B.3 – Contribui para originar modos de falha da subcategoria A.3
	B.4 – Afeta dispositivos de segurança e/ou contribui para originar modos de falha da subcategoria A.4

O índice incluído na designação das subcategorias (índice de criticidade) está em consonância com a designação dos níveis do critério “Impacto na produção” utilizados para a classificação dos componentes, com exceção do índice 4. Quando um modo de falha puder ser classificado em mais do que uma subcategoria, opta-se por aquela que apresenta um índice de criticidade mais elevado. Para os modos de falha de ambas as categorias, o índice de criticidade mais elevado é representado pelo algarismo 4 e o mais baixo pelo 0.

Os modos de falha pertencentes às subcategorias A.1, A.2, A.3, A.4, B.1, B.2, B.3 e B.4 são os modos de falha críticos. Devido ao seu impacto adverso, estes modos de falha serão analisados com vista a selecionar a política de manutenção mais apropriada (secção 4.5). Os modos de falha das subcategorias A.0 e B.0 não serão alvo de análise. Para estes modos de falha, poderá optar-se por manter a política de manutenção preventiva existente ou pela atribuição da MC.

A aplicação deste procedimento também pressupõe a identificação do comportamento da função de risco, ao longo do tempo, dos modos de falha críticos, de forma a possibilitar a seleção de uma política de manutenção adequada. A identificação do comportamento da função de risco será efetuada tendo em consideração evidências obtidas com base na análise das causas do modo de falha.

Em geral, a função de risco é crescente quando o modo de falha resulta de um processo de degradação progressiva, motivada pelo uso do componente (ex.: desgaste, fadiga e deformação) ou pela exposição do componente às condições físico-químicas do ambiente de operação (ex.: corrosão). Por outro lado, considera-se que a função de risco não é crescente, se o modo de falha resultar de defeitos de fabrico do componente, de erros humanos (ex.: colocação incorreta do componente no equipamento) ou de eventos aleatórios, tais como tensões súbitas (mecânicas, elétricas ou térmicas) e impactos acidentais. Geralmente, a função de risco dos modos de falha mais comuns dos componentes mecânicos é crescente, enquanto a função de risco dos modos de falha que ocorrem mais frequentemente nos componentes eletrónicos é aproximadamente constante.

A criticidade dos modos de falha e o comportamento da função de risco serão registados com o auxílio de um formulário inspirado na estrutura da ferramenta FMEA. O formulário desenvolvido reúne toda a informação relevante sobre os componentes críticos de cada equipamento. Este formulário foi definido com a finalidade de sistematizar a recolha de informação relacionada com os modos de falha e para possibilitar a sua análise juntamente com a informação resultante da classificação dos componentes aos quais estão associados. Em algumas empresas, a informação relativa aos modos de falha encontra-se dispersa e desorganizada. Além disso, muitas vezes, recorre-se a termos inadequados ou a termos diferentes para fazer referência ao mesmo conceito. Esta circunstância pode originar falta de rigor na elaboração dos registos de falha e equívocos na sua interpretação. Por isso, considera-se que o preenchimento do formulário definido também permitirá identificar a necessidade de redefinir ou uniformizar os termos e expressões relacionados com os modos de falha. Nesse sentido, serão preenchidos os campos descritos em seguida:

- **Máquina:** Designação e/ou código de identificação dos equipamentos em análise.
- **Subconjunto:** Designação e/ou código de identificação dos subconjuntos do equipamento onde se situam os componentes críticos.
- **Componente:** Designação e/ou código de identificação dos componentes críticos existentes em cada subconjunto.
- **Função:** Identificação da função do componente, nomeadamente “função auxiliar”, “função de segurança” ou “função indispensável ao processo”. A função refere-se ao critério utilizado no método M2.
- **Impacto na produção:** Identificação do nível de impacto do componente na produção, tendo em consideração os níveis “sem impacto”, “perdas de qualidade”, “redução de produtividade (desempenho)” e “paragem súbita”. O impacto na produção refere-se ao critério utilizado no método M2.
- **Criticidade:** Identificação da criticidade do componente, considerando as categorias “Desejável”, “Essencial” e “Vital”. Corresponde ao resultado da aplicação do método M2. Tem como finalidade apoiar a identificação da subcategoria de cada um dos respetivos modos de falha.
- **Modo de falha:** Designação dos modos de falha que podem afetar os componentes críticos do equipamento. Para cada tipo de componente, identificam-se os modos de falha que já se verificaram e aqueles que são evitados através das ações de manutenção preventiva. A identificação dos modos de falha é realizada com base na análise de registos de falhas e registos de manutenção preventiva, e a partir de conhecimento técnico sobre os componentes do equipamento.
- **Efeito:** Descrição do possível impacto da falha funcional, resultante da ocorrência de cada modo de falha, ao nível da máquina. Este campo visa fornecer informação suficiente para que seja possível identificar a categoria e a subcategoria à qual pertence o modo de falha.
- **Causas:** Descrição das causas potenciais dos modos de falha. Esta informação visa permitir identificar o comportamento da função de risco dos modos de falha críticos.
- **Sintomas:** Identificação de desvios relativamente às condições normais de operação que se verificam quando cada modo de falha considerado ocorre. Preferencialmente, destina-se a identificar

alterações perceptíveis em parâmetros mensuráveis do equipamento e do processo, nomeadamente temperatura, pressão, frequência de vibração, quantidade de contaminantes, etc. Esta informação será registada, sempre que identificável, e utilizada para avaliar o possível impacto dos modos de falha e identificar parâmetros a monitorizar no equipamento, com vista a analisar a aplicabilidade e a eficácia da MPC.

- **Subcategoria:** Identificação da subcategoria relativa a cada modo de falha considerado (A.0, A.1, A.2, A.3, A.4, B.0, B.1, B.2, B.3 ou B.4), tendo em conta a descrição dos respetivos efeitos e sintomas.
- **Função de risco:** Identificação do comportamento da função de risco (crescente ou não crescente).

As designações atribuídas no preenchimento dos campos “Máquina”, “Subconjunto”, “Componente”, “Modo de falha”, “Efeito” e “Causa” devem estar em conformidade com as designações atribuídas no campo correspondente do registo de falhas do equipamento. Desta forma, pretende-se evitar a duplicação de termos e de expressões para designar objetos, conceitos e eventos similares. Isto é particularmente relevante no caso dos modos de falha, visto que, para analisar a aplicabilidade da MPC, é necessário cruzar dados do registo de falhas com os valores dos parâmetros monitorizados. Ou seja, o registo de falha deve permitir identificar se os modos de falha especificados no formulário ocorreram e quando ocorreram. No entanto, sempre que se verifique que os termos e expressões existentes nos registos de falha são inadequados, recomenda-se que sejam revistos.

A Tabela 31 apresenta o formulário que será utilizado para apoiar a definição da criticidade dos modos de falha. Este formulário é designado de “F1 – Informação relativa aos componentes críticos”. O exemplo mostra informação respeitante a um modo de falha que afeta um tipo específico de componente de uma máquina de inserção de dispositivos eletrónicos em placas de circuito impresso ou *Printed Circuit Boards* (PCBs). Em geral, a falha funcional resultante deste modo de falha é facilmente detetada pelo operador. Trata-se, por isso, de um modo de falha da Categoria A. Com base na análise dos efeitos da falha, constatou-se que o modo de falha identificado poderá originar perdas significativas de qualidade. Assim, este modo de falha foi classificado na subcategoria A.1.

Tabela 31 – Exemplo da aplicação do formulário F1.

Máquina	Subconjunto	Componente	Função	Impacto na produção	Criticidade	Modo de falha	Efeito	Causas	Sintomas	Subcategoria	Função de risco
Inserção 8+8 <i>Nozzles</i>	Cabeça de inserção 1/ Canhão 1	Tubo de silicone	Função indispensável ao processo (nível 3)	Perdas de qualidade (nível 1)	Essencial	Fissurado	Dispositivos eletrônicos soltos ou em falta no PCB	Desgaste acumulado Espessura reduzida da camada de silicone na extremidade do tubo	Alteração das condições normais de pressão no interior do tubo	A.1	Crescente

4.5. Seleção da política de manutenção

A seleção da política de manutenção mais adequada para cada um dos modos de falha classificados como críticos, aplicando o procedimento P1, será realizada com o auxílio de árvores de decisão. Nesse sentido, foram desenvolvidas três árvores de decisão destinadas a apoiar a atribuição da política de manutenção aos diferentes modos de falha, considerando a natureza e o impacto da falha funcional correspondente, o comportamento da função risco de falha e os custos associados à política de manutenção.

No âmbito da metodologia, são utilizados métodos de análise de custos referentes às seguintes políticas (ver secção 4.7):

- Manutenção preventiva condicionada;
- Manutenção preventiva sistemática;
- Manutenção corretiva;
- Ação de melhoria.

A árvore de decisão da Figura 41 (AD1) é aplicada quando se verifica que a função de risco do modo de falha não é crescente. Se a função de risco for crescente, será utilizada a árvore de decisão apresentada na Figura 42 (AD2). Esta árvore de decisão deve ser complementada com a árvore de decisão da Figura 43 (AD3), nas situações em que se pretende analisar a viabilidade técnica e financeira da MPC. Assim, para definir a árvore de decisão a aplicar a cada modo de falha crítico, o comportamento da respetiva função de risco ao longo do tempo deverá ser conhecido. Posteriormente, a seleção da política de manutenção é realizada de acordo com a subcategoria atribuída ao modo de falha considerado.

Para registar as políticas de manutenção selecionadas para os modos de falha de um equipamento, foi definido o formulário “F2 – Política de manutenção”. Este formulário inclui alguns campos pertencentes ao formulário F1 (Tabela 31) e apresenta a mesma estrutura. Por isso, a informação de ambos pode ser reunida numa tabela única. A informação relativa aos campos do formulário F1 destina-se a auxiliar a aplicação das árvores de decisão.

Caso exista uma política de manutenção já definida, é registada no campo “política atual”. No campo “política proposta”, é apresentada a designação da política de manutenção associada ao modo de falha em resultado da aplicação da árvore de decisão (MPC, MPS, MC, TI, TD ou ação de melhoria). Os resultados da

análise de custos, realizada para apoiar a tomada de decisão relativamente à política de manutenção a adotar, podem ser apresentados num formulário específico. No caso da informatização, recomenda-se que este formulário esteja acessível de forma automática, através de uma ligação ao registo efetuado no campo “política proposta”.

Na Tabela 32, é exemplificada a aplicação do formulário F2 a um caso genérico. Neste exemplo, a função de risco é crescente e a TI foi a política de manutenção selecionada.

Tabela 32 – Exemplo da aplicação do formulário F2.

Definição da criticidade dos modos de falha						Seleção da política	
Máquina	Subconjunto	Componente	Modo de falha	Subcategoria	Função de risco	Política atual	Política proposta
Máquina 1	Subconjunto 1.1	Componente 1.1.1	Modo de falha 1	A.2	Crescente	MPS	TI

4.5.1. Função de risco não crescente

Na árvore de decisão destinada aos modos de falha críticos com função de risco não crescente (Figura 41), não é considerada a aplicação de políticas de manutenção preventiva. Neste caso, a adoção de uma política preventiva não reduz a probabilidade de falha. Por isso, a manutenção preventiva só é aplicada se a função de risco for crescente.

Quando a função de risco do modo de falha não é crescente, é recomendada a identificação uma ação de melhoria ou a definição de uma TD. A ação de melhoria pode, por exemplo, envolver a utilização de um componente com a mesma função e fiabilidade superior ou a colocação de um componente redundante. Enquanto a TD implica a realização de uma inspeção ao componente ao qual o modo de falha está associado. Esta inspeção pode ser efetuada visualmente ou recorrendo a um dispositivo externo simples.

Para os modos de falha das subcategorias A.4 e B.4, a adoção de uma ação de melhoria é considerada essencial. Nestes casos, pretende-se que a ação definida permita eliminar o modo de falha ou reduzir o seu índice de criticidade. Para modos de falha de outras subcategorias, a aplicação da MC é recomendada se a relação de custo-benefício da ação de melhoria não for favorável (subcategorias A.1, A.2 e A.3) ou se a TD não for aplicável e eficaz (subcategorias B.1, B.2 e B.3). Esta decisão baseia-se no pressuposto de que estes casos são pouco comuns e, por isso, os custos associados à falha terão um impacto reduzido nos custos gerais de manutenção de uma empresa. Por outro lado, tendo em conta que a definição de uma ação de

melhoria adequada, por vezes, requer a realização de um estudo aprofundado, em alguns destes casos, a aplicação da MC pode ser apenas temporária.

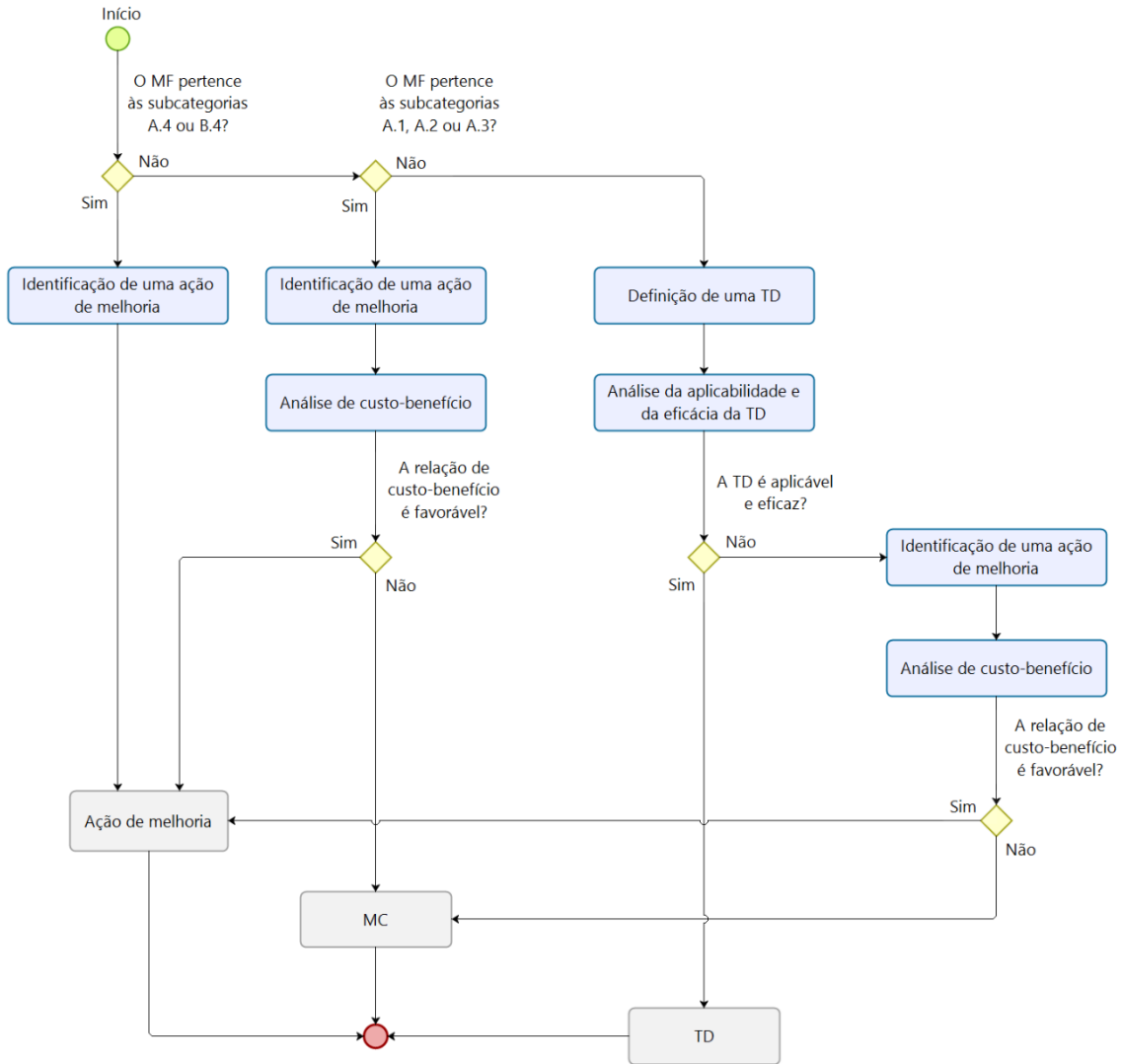


Figura 41 – Árvore de decisão relativa aos modos de falha com função de risco não crescente (AD1).

4.5.2. Função de risco crescente

A seleção da política de manutenção para os modos de falha críticos com função de risco crescente é realizada com base na árvore de decisão apresentada na Figura 42. Nesta árvore de decisão, são consideradas as políticas MPS, TI, MC, TD e ação de melhoria.

A MPC com recurso a sensores instalados no equipamento não está contemplada na árvore, visto que a decisão relativamente à implementação da MPC requer a realização de uma análise de viabilidade técnica e

financeira que pode ser demorada. Assim, a árvore de decisão definida pode ser utilizada para atribuir políticas de manutenção, aplicáveis de imediato, a todos os modos de falha críticos com função de risco crescente, incluindo aqueles que são candidatos à aplicação da MPC. Os modos de falha candidatos à aplicação da MPC utilizando sensores são selecionados com base na informação registada no formulário F1 e priorizados para a análise da viabilidade da MPC recorrendo aos critérios especificados no procedimento P2.

A aplicação da MPS é recomendada para os modos de falha da Categoria A, visto que o seu impacto no funcionamento do equipamento é imediato, e para os modos de falha da subcategoria B.4, devido à sua criticidade elevada. No âmbito da metodologia, é proposta a utilização da árvore de decisão AD4 para atribuir uma política de MPS específica, tendo em conta a subcategoria do modo de falha, e são recomendados modelos destinados a definir o intervalo de substituição preventiva, considerando os objetivos da política selecionada (ver secção 4.6). Contudo, a decisão relativamente à sua aplicação depende do resultado da análise de custos.

A aplicação da TI é recomendada para os modos de falha das subcategorias A.1, A.2, A.3 e B.4. No entanto, esta política só é aplicada caso se verifiquem as duas condições seguintes:

- O modo de falha pode ser detetado, de forma eficaz, na sua fase de desenvolvimento, através da inspeção visual do componente ou recorrendo a um dispositivo de medição externo;
- A TI é a política que apresenta o custo mais reduzido.

A utilização da TI é vantajosa sobretudo nos casos em que a substituição do componente requer tempos de paragem longos e a ocorrência do modo de falha é pouco frequente. Porém, esta política não é recomendada para os modos de falha da subcategoria A.4, porque se assume o pressuposto de que a MPS é mais eficaz para prevenir a ocorrência da falha.

Para os modos de falha que não têm impacto na segurança ou ambiente, a MC é proposta como alternativa às políticas TI e MPS, se tiver um custo mais reduzido, e à TD, caso esta não seja aplicável e eficaz. Contudo, a MC só é aplicada se não puder ser definida uma ação de melhoria com uma relação de custo-benefício favorável. Em alguns casos, a comparação entre os custos das políticas de manutenção preventiva e da MC poderá basear-se numa análise qualitativa. Por exemplo, se a TI e a MPS puderem ser efetuadas fora do período de produção e a MC resultar em tempos de paragem longos, poderá concluir-se que a intervenção preventiva é mais económica sem que seja necessário estimar os custos associados. Caso a ocorrência do

modo de falha seja pouco frequente e o tempo de inspeção seja reduzido, também poderá assumir-se que o custo da TI é inferior ao custo da MPS.

A TD é recomendada somente para os modos de falha das subcategorias B.1, B.2 e B.3. Se a detecção da ocorrência do modo de falha puder ser realizada com base na inspeção visual do componente ou utilizando um dispositivo de medição externo, a decisão relativamente à sua aplicação não depende dos custos associados. Neste caso, assume-se o pressuposto de que o custo associado à utilização da TD é inferior ao custo da detecção tardia do modo de falha. Porém, também poderão ser selecionados modos de falha das subcategorias B.1, B.2 e B.3, com função de risco crescente, para verificar a viabilidade técnica e financeira de uma TD utilizando sensores. A utilização de técnicas de MPC para apoiar a detecção de falhas ocultas é particularmente relevante, sobretudo quando os componentes sujeitos a este tipo de falhas estão situados em locais de difícil acesso do equipamento ou quando a ocorrência do modo de falha é frequente. Assim, o tempo despendido na aplicação da TD poderá ser substancialmente reduzido.

Durante a aplicação da árvore de decisão, a identificação de uma ação de melhoria é proposta quando se verificam as seguintes situações:

1. A MPS é a política recomendada e o seu custo é considerado elevado;
2. A MC é a política recomendada;
3. A TD não é aplicável e eficaz.

A necessidade de definir uma ação de melhoria baseia-se no pressuposto de que os custos gerados pelo modo de falha considerado nestas situações não são aceitáveis. No entanto, se a relação de custo-benefício da ação identificada não for favorável, na situação 1, admite-se a aplicação da MPS e, nas situações 2 e 3, a aplicação da MC. A situação 1 verifica-se quando o modo de falha considerado tem impacto na segurança ou ambiente e/ou quando origina uma falha evidente da qual resultam custos elevados. Nas situações 2 e 3, o modo de falha não tem impacto na segurança ou ambiente e a sua ocorrência gera custos mais aceitáveis do que na situação 1.

Conforme foi referido na subsecção anterior, nem sempre é possível identificar uma ação de melhoria apropriada num intervalo de tempo razoável. Por isso, a aplicação da MPS ou da MC nestas situações poderá ser meramente temporária. Assim, reitera-se a importância de se realizar um estudo mais aprofundado, nos casos em que não é possível definir de imediato uma ação de melhoria com uma relação de custo-benefício favorável.

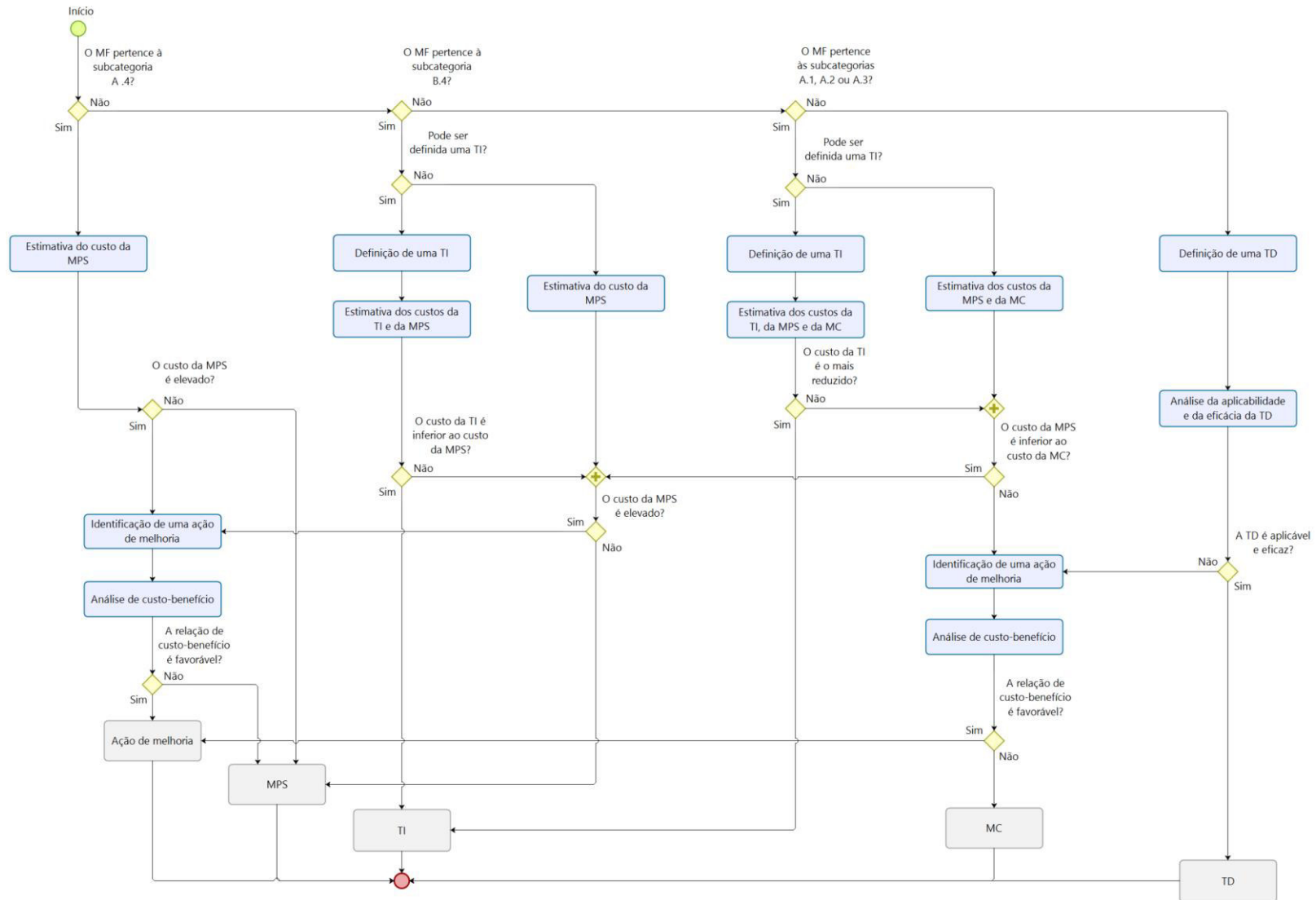


Figura 42 – Árvore de decisão relativa aos modos de falha com função de risco crescente (AD2).

A árvore de decisão da Figura 43 ilustra o processo de decisão em que se baseia a atribuição de uma política de MPC/TD utilizando sensores a um modo de falha específico, selecionado através dos critérios especificados no procedimento P2.

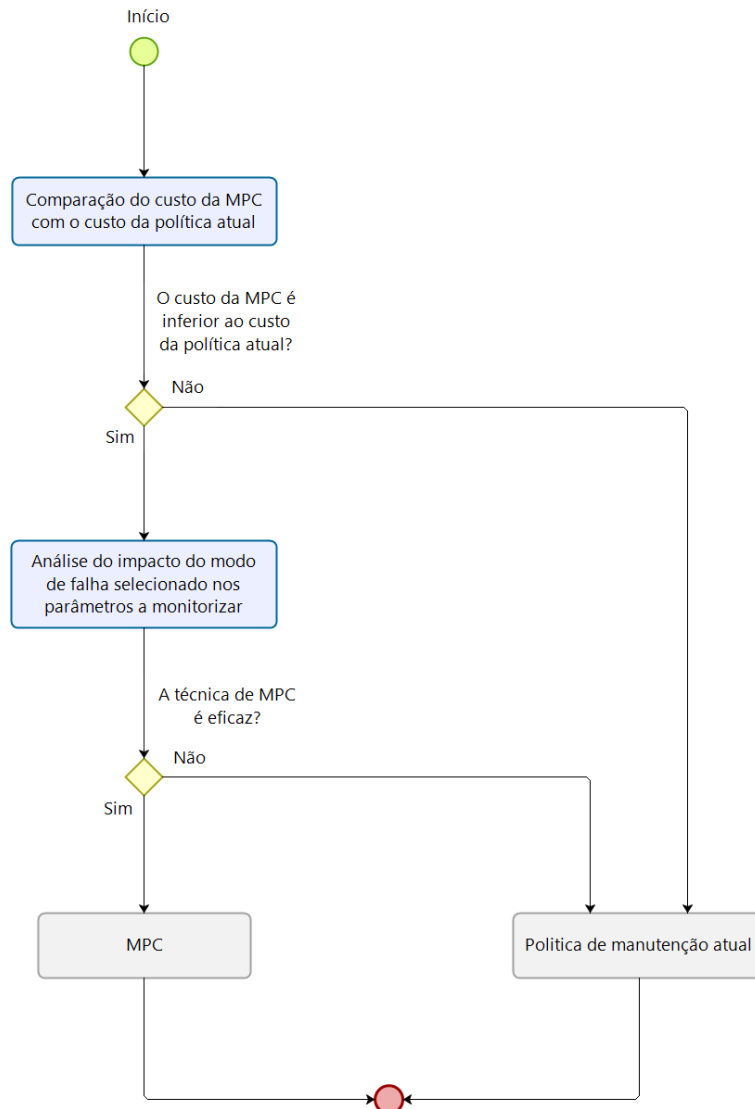


Figura 43 – Árvore de decisão relativa aos modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores (AD3).

No âmbito da metodologia, a “comparação do custo da MPC com o custo da política atual” é realizada de acordo com o método definido na subsecção 4.7.3. Enquanto a “análise do impacto do modo de falha seleccionado nos parâmetros a monitorizar” é efetuada tendo em conta as orientações fornecidas no procedimento P4. Se for necessário instalar novos sensores no equipamento, a seleção destes dispositivos é apoiada pelo procedimento P3.

4.6. Definição dos parâmetros da política de manutenção preventiva sistemática

Nesta secção, são fornecidas orientações destinadas a selecionar uma política de MPS específica para os modos de falha aos quais foi associada a MPS, percorrendo a árvore de decisão apresentada na Figura 42. Para os modos de falha das subcategorias A.1, A.2, A.3, são recomendadas políticas de substituição que têm associados modelos matemáticos destinados a otimizar o custo de manutenção ou a disponibilidade do equipamento (Apêndice IV.2.2 e IV.2.3). Em relação aos modos de falha das subcategorias A.4 e B.4, recomenda-se a substituição baseada numa probabilidade de falha predefinida (Apêndice IV.2.1), visto que a sua ocorrência poderá afetar a segurança das pessoas e do equipamento, e/ou originar danos ambientais. Assim, quanto mais grave for o impacto associado à ocorrência do modo de falha em questão, menor deverá ser a probabilidade de falha predefinida no âmbito da política de substituição correspondente.

Na Tabela 33, são identificadas as políticas de MPS propostas para as diferentes subcategorias dos modos de falha e os critérios de decisão associados a cada política.

Tabela 33 – Políticas de MPS recomendadas e os respetivos critérios de decisão.

Categoria	Subcategoria	Política	Crítérios de decisão
A – Falha evidente	A.1, A.2 e A.3	Substituição baseada na idade	Custo de manutenção Disponibilidade
		Substituição em bloco	Custo de manutenção Disponibilidade
	A.4	Substituição baseada numa probabilidade de falha predefinida	
B – Falha oculta	B.4	Substituição baseada numa probabilidade de falha predefinida	

A árvore de decisão proposta para atribuir a política de MPS (AD4) a cada um dos modos de falha considerados é ilustrada na Figura 44.

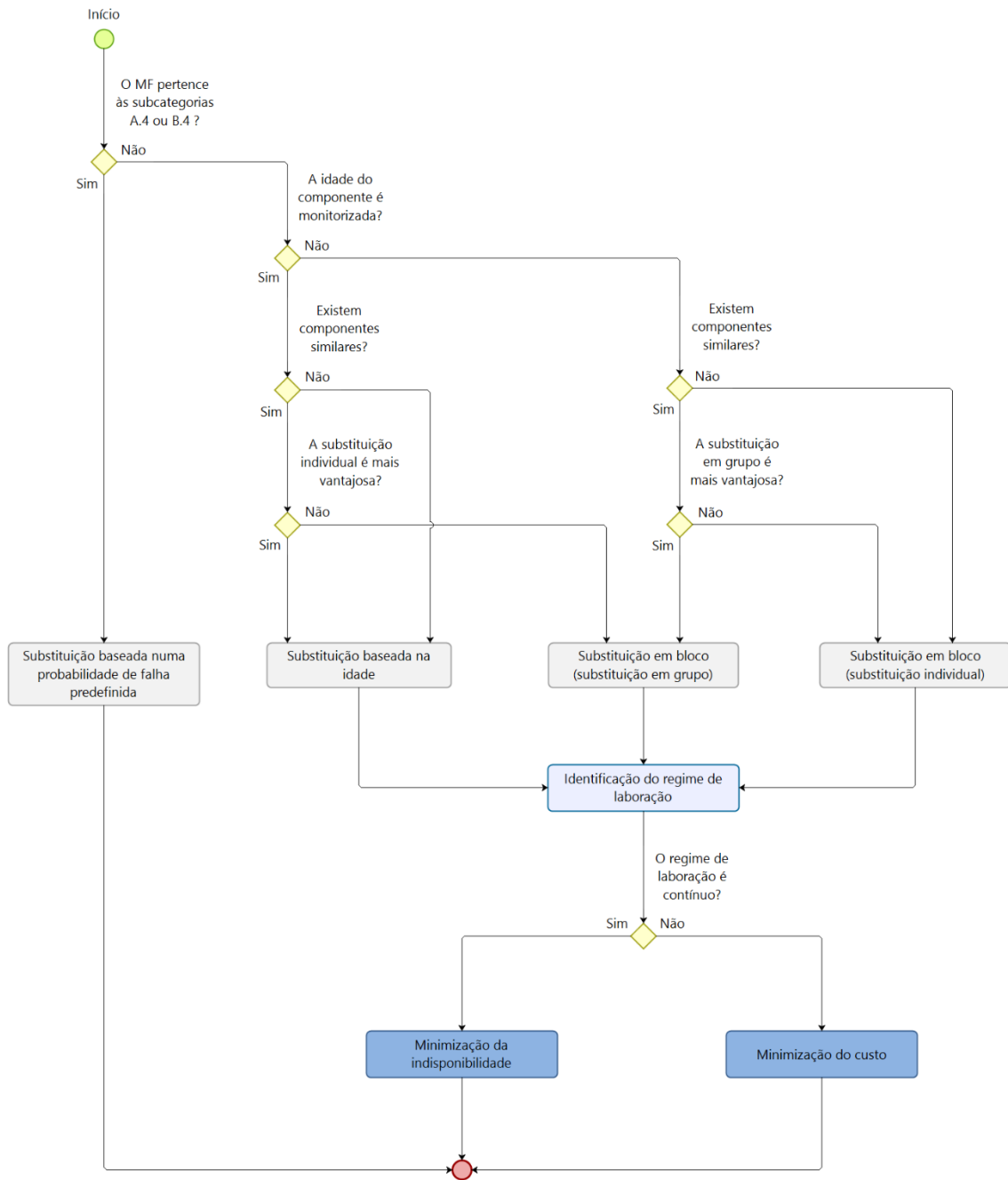


Figura 44 – Representação do procedimento para a atribuição da política de MPS (AD4).

A árvore de decisão baseia-se no pressuposto de que a minimização da indisponibilidade é o objetivo mais conveniente para as políticas de substituição baseada na idade e de substituição em bloco, quando se pretende que o equipamento esteja disponível 24 horas por dia (regime de laboração contínuo).

Os modelos matemáticos propostos no âmbito das políticas de MPS (Apêndice IV.2) só poderão ser aplicados caso se verifiquem as seguintes condições:

1. Disponibilidade de dados de falha (valores de tempo até à falha) relativos ao modo de falha considerado;

2. Os dados de falha podem ser descritos por uma distribuição de probabilidade;
3. Existência de informação sobre os custos da substituição preventiva e da substituição devido a falha do componente, caso o objetivo seja a minimização do custo;
4. Existência de informação sobre os tempos médios da substituição preventiva e da substituição devido a falha do componente, caso o objetivo seja a minimização da indisponibilidade.

Se as condições requeridas para a aplicação do modelo pretendido não se verificarem, o intervalo de MPS referente aos modos de falha das subcategorias identificadas na Tabela 33 poderá ser definido com base em recomendações do fornecedor e/ou na experiência.

Caso existam dados de falha, propõe-se que os valores sejam sujeitos a uma análise preliminar que envolve as duas etapas seguintes:

- Estimativa dos parâmetros da distribuição de *Weibull*
- Avaliação do grau de ajuste da distribuição de *Weibull*

Estas etapas são descritas no Apêndice IV.1. A dimensão do conjunto de dados a considerar na análise não deve ser inferior a 4.

4.7. Análise de custos de manutenção

Esta secção apresenta os métodos desenvolvidos para estimar os custos associados à aplicação da MC e da MPS, comparar os custos de aplicação da MPC com os custos da política de manutenção atual, e orientar a análise de custo-benefício das ações de melhoria.

4.7.1. Estimativa do custo da política de MC

O custo associado à aplicação da política de MC é representado pela soma dos custos que poderão resultar da ocorrência do modo de falha em questão, num determinado período de tempo. Estes custos incluem o custo de aquisição do componente (peça sobressalente) onde o modo de falha tem origem, o custo de mão de obra direta (engenheiros e/ou técnicos de manutenção), o custo relativo a potenciais perdas de qualidade que advêm do fabrico de produto defeituoso, e o custo das perdas de produção motivadas pela paragem do equipamento e/ou pela redução do seu desempenho. Aos custos especificados poderá acrescer o custo de aquisição de outros componentes que são habitualmente afetados pela ocorrência do modo de falha e que, por esse motivo, precisam de ser substituídos na ação de manutenção corretiva de forma a reestabelecer o funcionamento normal do equipamento.

A soma dos custos associados à ocorrência de um modo de falha é designada de custo de falha, C_f , e é representada pela expressão matemática seguinte:

$$C_f = C_{ps} + C_{mo} + C_{pq} + C_{pp} + C_{ops} \quad (4.4)$$

Em que,

C_{ps} é o custo de aquisição da peça sobressalente à qual o modo de falha está associado.

C_{mo} é o custo de mão de obra direta.

C_{pq} é o custo das perdas de qualidade.

C_{pp} é o custo de perdas de produção.

C_{ops} é o custo associado à aquisição de outras peças sobressalentes.

Desta forma, propõe-se que o custo relativo à aplicação da política de MC por unidade de tempo, C_{MC} , seja estimado com base na expressão:

$$C_{MC} = \lambda \times C_f \quad (4.5)$$

Sendo que, λ é o número de ocorrências do modo de falha por unidade de tempo e é dado pela expressão:

$$\lambda = \frac{1}{MTTF} \quad (4.6)$$

O $MTTF$ representa o tempo médio até à falha. Pode ser calculado somando os tempos até à falha de n componentes idênticos instalados sucessivamente na mesma posição do equipamento e dividindo o valor obtido por n , conforme mostra a expressão matemática seguinte:

$$MTTF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (4.7)$$

Em que,

t_i é o tempo até à falha do componente i .

n é o número de componentes considerados.

Se a distribuição de probabilidade dos tempos até à falha for conhecida, o valor do $MTTF$ pode ser obtido através da expressão:

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (4.8)$$

Para a distribuição de *Weibull*, quando $\gamma=0$, o valor do $MTTF$ é dado pela expressão:

$$MTTF = \eta\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = \eta\Gamma(x) \quad (4.9)$$

Sendo que, Γ representa a função gama. Os valores da função gama, $\Gamma(x)$, para $1 \leq x \leq 2$, encontram-se tabelados em diversas fontes e podem ser determinados com base na expressão:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1}e^{-t}dt \quad (4.10)$$

4.7.2. Estimativa do custo da política de MPS

O valor do custo da política de MPS varia em função do intervalo de substituição preventiva (t_p). A estimativa do custo da política de MPS requer a determinação do custo da substituição preventiva (C_p) do componente e do custo associado à ocorrência do modo de falha em questão (C_f).

Na estimativa do custo de uma substituição preventiva, são considerados o custo de aquisição das peças sobressalentes substituídas, o custo de mão de obra direta e o custo das perdas de produção motivadas pela indisponibilidade do equipamento durante a ação de manutenção. Caso a substituição preventiva do componente ao qual está associado o modo de falha contemplado na política de MPS implique a substituição de outros componentes do equipamento, os respetivos custos de aquisição também deverão ser considerados. Esta necessidade poderá verificar-se quando existe relação de dependência entre componentes. Assim, o valor do custo total de uma substituição preventiva, C_p , é obtido como base na expressão matemática seguinte:

$$C_p = C_{ps} + C_{mo} + C_{pp} \quad (4.11)$$

Em que,

C_{ps} é o custo de aquisição das peças sobressalentes substituídas.

C_{mo} é o custo de mão de obra direta.

C_{pp} é o custo de perdas de produção.

Caso as ações de MPS sejam programadas para períodos em que não é necessário utilizar o equipamento, considera-se que não existem custos de perdas de produção.

Se o componente for substituído no âmbito de uma política de substituição em grupo, o respetivo custo de substituição, C_g , é estimado através da expressão:

$$C_g = C_{ps} + \frac{C_{mo} + C_{pp}}{N} \quad (4.12)$$

Sendo que N representa o número total de itens no grupo.

4.7.2.1. Estimativa do custo da política de substituição baseada na idade

A estimativa do custo de aplicação da política de substituição baseada na idade por unidade de tempo, C_{SBI} , é dada pela expressão matemática (Gold, 2013):

$$C_{SBI} = \frac{C_p \times R(t_p) + C_f \times [1 - R(t_p)]}{t_p \times R(t_p) + M(t_p) \times [1 - R(t_p)]} \quad (4.13)$$

Em que,

t_p é a idade de substituição.

$f(t)$ é a função densidade de probabilidade dos tempos de falha do item.

$R(t_p)$ é a fiabilidade até ao instante t_p .

$M(t_p)$ é a média da distribuição de probabilidade truncada em t_p (ver Apêndice IV.2.2).

4.7.2.2. Estimativa do custo da política de substituição em bloco

A estimativa do custo de aplicação da política de substituição em bloco a um componente, individualmente, por unidade de tempo, C_{SB} , é determinada com base na expressão matemática (Gold, 2013):

$$C_{SB} = \frac{C_p + C_f H(t_p)}{t_p} \quad (4.14)$$

Em que,

t_p é a dimensão do intervalo de substituição.

$H(t_p)$ é o número esperado de falhas no intervalo $[0, t_p]$ (ver Apêndice IV.2.3).

Por outro lado, se a política de substituição em bloco envolver a substituição de um grupo de componentes similares, a estimativa do respetivo custo de aplicação por unidade de tempo, C_{SG} , é obtida através da expressão matemática (Gold, 2013):

$$C_{SG} = \frac{NC_g + NH(t_p)C_f}{t_p} \quad (4.15)$$

4.7.3. Comparação do custo da MPC com o custo da política de manutenção atual

A aplicação de uma política de MPC requer um investimento inicial destinado a definir e implementar um sistema que permita cumprir o seu objetivo com a eficácia pretendida. Neste contexto, os principais custos poderão envolver a aquisição dos seguintes recursos ou serviços:

- Dispositivos com o nível de precisão necessário para medir os valores dos parâmetros a monitorizar no equipamento;
- Tecnologias de informação e comunicação para realizar o registo e a transmissão dos dados obtidos pelos dispositivos de medição;
- Dispositivos de armazenamento e de processamento com uma capacidade adequada, tendo em conta o volume de dados que serão recolhidos;
- *Software* para a aplicação dos métodos de análise, destinados a extrair informação dos dados recolhidos para apoiar a tomada de decisão;
- Formação das pessoas envolvidas na aplicação da política.

A estes custos acrescem ainda despesas relativas à instalação e teste dos recursos requeridos para a aplicação da política de MPC, de acordo com a arquitetura definida previamente.

A soma de todos os custos especificados anteriormente é designada de custo de implementação (C_I). A análise do custo de implementação é efetuada após a definição dos dispositivos de medição de dados (procedimento P3) e do *software* a utilizar na análise dos dados. Tendo em conta que alguns dos elementos que compõem um sistema de MPC podem ser partilhados por diferentes políticas de MPC

(ex.: computadores, dispositivos de armazenamento, *software*, etc.), sempre que a sua aquisição seja necessária, os custos associados deverão ser repartidos de forma proporcional.

O custo referente à utilização da política de MPC contempla o custo de operação e manutenção do sistema de MPC (C_{OM}) e o custo de substituição preventiva do componente do equipamento onde o modo de falha em questão tem origem (C_{SMPC}).

Em geral, o custo de operação e manutenção inclui os seguintes encargos:

- Mão de obra para assegurar o correto funcionamento do sistema de MPC;
- Aquisição de dispositivos destinados a substituir elementos do sistema de MPC que estão sujeitos a falha (ex.: sensores e placas de aquisição de dados).

A estimativa do custo de substituição preventiva resultante da aplicação da política de MPC por unidade de tempo, C_{SMPC} , é obtida multiplicando as expressões (4.6) e (4.11), conforme representado na expressão seguinte:

$$C_{SMPC} = \lambda \times C_p \quad (4.16)$$

A expressão proposta para estimar o custo de substituição preventiva baseia-se nos dois pressupostos seguintes:

1. O componente ao qual está associado o modo de falha considerado é utilizado aproximadamente até ao fim do seu tempo de vida útil;
2. A falha funcional resultante da ocorrência do modo de falha considerado é sempre evitada.

De forma a verificar se os benefícios da política de MPC, face à política de manutenção existente, são superiores ao valor do capital investido na sua implementação, propõe-se a determinação do Valor Atualizado Líquido (VAL). Os benefícios da aplicação da MPC face à MPS geralmente estão relacionados com a diminuição do número de substituições preventivas e com a eliminação dos custos de falha. A utilização deste indicador para comparar os custos da MPC com os custos da MC ou da MPS é proposta por Tiddens *et al.* (2017).

Neste caso, recomenda-se que a estimativa do VAL contemple os custos anuais atualizados da política de manutenção atual, os custos anuais atualizados da utilização da política de MPC e o custo de implementação. Assumindo que o sistema de MPC será utilizado até ao final da vida útil do equipamento no qual se pretende implementar, o somatório dos custos anuais atualizados deverá ser determinado para o período entre o ano de implementação ($t=0$) e o último ano de vida útil do equipamento (T). Este

período poderá ser estimado com base em informação disponibilizada pelo fornecedor ou definido pela empresa tendo em conta as perspetivas financeira e/ou estratégica. Assim, o VAL pode ser estimado da seguinte forma:

$$VAL = \sum_{t=0}^T \frac{C_{PA,t} - (C_{SMPC,t} + C_{OM,t})}{(1+i)^t} - C_I \quad (4.17)$$

Em que,

t representa um período com a duração de um ano.

T é o tempo de vida útil restante do equipamento em anos.

i é a taxa anual de atualização.

$C_{PA,t}$ é o custo da política de manutenção atual no ano t .

$C_{SMPC,t}$ é o custo de substituição preventiva no ano t .

$C_{OM,t}$ é o custo de operação e manutenção do sistema de MPC no ano t .

C_I é o custo de implementação no ano $t=0$.

Considera-se que o investimento requerido para a implementação da MPC é vantajoso financeiramente se $VAL > 0$.

Sendo assim, o custo total de aplicação da política de MPC, C_{MPC} , pode ser estimado com base na expressão seguinte:

$$C_{MPC} = \sum_{t=0}^T \frac{C_{SMPC,t} + C_{OM,t}}{(1+i)^t} + C_I \quad (4.18)$$

As expressões (4.17) e (4.18) baseiam-se nas expressões propostas por Feldman *et al.* (2009) e Tiddens *et al.* (2017), para estimar o retorno do investimento ou *Return on Investment* (ROI) associado à implementação da manutenção condicionada/PHM. No entanto, a aplicação da MPC nem sempre envolve a realização de um investimento. Nestes casos, propõe-se que a taxa de atualização não seja considerada na comparação do custo da MPC com o custo da política de manutenção atual e na estimativa do C_{MPC} .

O método apresentado nesta subsecção também poderá ser utilizado para comparar o custo de uma TD utilizando sensores com o custo da política de manutenção atual. Neste caso, a estimativa do custo de substituição associado à aplicação da TD baseia-se no pressuposto de que a falha funcional do componente é detetada imediatamente após a sua ocorrência, impedindo que esta se propague a outros componentes.

4.7.4. Análise de custo-benefício das ações de melhoria

Para realizar a análise de custo-benefício das ações de melhoria, propõe-se a determinação do rácio de custo-benefício. O rácio de custo-benefício consiste no quociente entre o valor presente dos fluxos monetários futuros gerados por um investimento (benefícios) e o valor do investimento inicial (custos) (Ross *et al.*, 2010). Este indicador permite medir de uma forma simples a eficiência de um projeto (Hoskins, 1974).

Em geral, os benefícios decorrentes de uma ação de melhoria estão relacionados com a eliminação de um modo de falha específico, ou com a redução da sua frequência e/ou impacto. O valor dos benefícios da ação de melhoria deverá ser estimado subtraindo o custo de manutenção esperado depois da realização da ação ao custo de manutenção correspondente à situação atual. Estes custos deverão abranger o período de vida útil restante do equipamento. Neste caso, o valor atualizado dos benefícios, B , pode ser obtido da seguinte forma:

$$B = \sum_{t=0}^T \frac{CM_{A,t} - CM_{M,t}}{(1+i)^t} \quad (4.19)$$

Em que,

$CM_{A,t}$ é o custo de manutenção da situação atual no ano t .

$CM_{M,t}$ é o custo de manutenção depois da ação de melhoria no ano t .

O rácio de custo-benefício, RCB , de uma ação de melhoria é representado pela expressão seguinte:

$$RCB = \frac{B}{I_M} \quad (4.20)$$

Sendo que I_M representa o montante investido na realização da ação de melhoria no ano $t=0$.

A relação de custo-benefício será considerada favorável se o valor do RCB for superior a 1. Somente neste caso a ação de melhoria é recomendada.

Porém, caso se pretenda decidir entre projetos mutuamente exclusivos geralmente é recomendada a comparação do *VAL* dos diferentes projetos (Hoskins, 1974; Ross *et al.*, 2010; Schwab & Lusztiq, 1969). Este indicador permite que a tomada de decisão seja baseada no valor absoluto de cada investimento. Assim, o projeto que apresentar o *VAL* superior é o mais vantajoso financeiramente.

O *VAL* de uma ação de melhoria pode ser estimado utilizando a seguinte expressão matemática:

$$VAL = \sum_{t=0}^T \frac{CM_{A,t} - CM_{M,t}}{(1+i)^t} - I_M \quad (4.21)$$

Nos casos em que a aplicação da ação de melhoria não envolve a realização de um investimento, propõe-se que a taxa de atualização não seja considerada no cálculo do *RCB*.

4.8. Abordagem de apoio à implementação da MPC

A abordagem de apoio à implementação da MPC é composta pelos três procedimentos sequenciais apresentados nas subsecções seguintes. Estes procedimentos destinam-se a analisar a viabilidade técnica da MPC utilizando sensores e apoiar a sua implementação de uma forma organizada e progressiva, tendo em conta informação fornecida através da aplicação de outros métodos e procedimentos da metodologia.

4.8.1. Procedimento para identificar os modos de falha prioritários

Este procedimento fornece orientações para definir os parâmetros do equipamento/processo a monitorizar, tendo em conta a sua relação com os modos de falha selecionados e a disponibilidade de sensores, e priorizar os modos de falha para a análise da viabilidade técnica e financeira da MPC/TD utilizando sensores.

O procedimento é destinado aos modos de falha críticos com função de risco crescente, que têm pelo menos um sintoma associado. No âmbito da metodologia desenvolvida, definiu-se que os modos de falha das subcategorias A.1, A.2, A.3, A.4 e B.4 são candidatos à aplicação da MPC e os modos de falha das subcategorias B.1, B.2 e B.3 são candidatos à aplicação de uma TD utilizando sensores. A seleção dos modos de falha é realizada com base na informação registada no formulário F1.

Na Tabela 34, são sintetizadas as principais etapas do procedimento definido e identificadas as fontes de informação recomendadas para cada etapa.

Tabela 34 – Etapas do procedimento para identificar os modos de falha prioritários para a implementação da MPC e respetivas fontes de informação.

Etapas	Designação	Fontes de informação
1	Listagem dos parâmetros mensuráveis com os sensores existentes	- Manual do equipamento - Observação direta do equipamento
2	Identificação dos parâmetros relacionados com os modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD	- Formulário “F1 – Informação relativa aos componentes críticos” (“Sintomas”) - Recomendações e pareceres técnicos - Normas - Artigos científicos
3	Classificação da relação entre os parâmetros e os modos de falha	- Recomendações e pareceres técnicos - Normas - Artigos científicos
4	Definição de prioridades	- Formulário “F1 – Informação relativa aos componentes críticos” (“Criticidade” e “Subcategoria”) - Formulário “F5 – Relação entre os parâmetros e os modos de falha” - Histórico do equipamento

Em seguida, é efetuada uma descrição detalhada de cada uma das etapas identificadas.

4.8.1.1. Listagem dos parâmetros mensuráveis com os sensores existentes

A primeira etapa envolve a elaboração de uma lista de parâmetros potencialmente mensuráveis com os sensores já instalados no equipamento selecionado. Este levantamento tem como objetivo obter informação que possa contribuir para reduzir os custos de implementação da MPC/TD, evitando gastos desnecessários relacionados a aquisição de sensores.

Para organizar a informação recolhida, foi definido o formulário “F3 – Parâmetros mensuráveis com os sensores existentes” (Tabela 35). O formulário proposto destina-se a identificar os tipos de sensores disponíveis, o parâmetro que cada tipo de sensor permite medir, e o subconjunto e/ou o componente onde cada tipo de sensor pode efetuar medições.

Tabela 35 – Exemplo genérico do formulário F3.

Máquina	Subconjunto	Componente	Tipo de sensor	Parâmetro
Máquina 1	Subconjunto 1.1	Componente 1.1.1	Sensor 1	Parâmetro 1
...

4.8.1.2. Identificação dos parâmetros relacionados com os modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD

Esta etapa visa identificar todos os parâmetros relacionados com os modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores e verificar se os parâmetros podem ser medidos com sensores já instalados no equipamento. Propõe-se que a identificação dos parâmetros associados a cada modo de falha seja realizada a partir dos sintomas descritos no formulário F1. Porém, caso se constate que esta informação é insuficiente, poderão ser consultadas outras fontes de informação, tais como:

- Recomendações do fabricante do equipamento;
- Parecer dos engenheiros/técnicos de manutenção;
- Informação proveniente de estudos científicos e de normas internacionais no domínio da manutenção condicionada.

Para sistematizar a análise, foi definido um formulário que estabelece a correspondência entre o parâmetro e o respetivo modo de falha, e identifica a disponibilidade de sensores. Este formulário é designado de “F4 – Parâmetros a analisar e disponibilidade de sensores” (Tabela 36). A informação apresentada no formulário F4 permite verificar a possibilidade de serem utilizados sensores já instalados no equipamento para cada combinação “modo de falha – parâmetro”, tendo em conta a lista elaborada previamente utilizando o formulário F3. Desta forma, pretende-se evidenciar as necessidades existentes.

Tabela 36 – Exemplo genérico do formulário F4.

Máquina	Subconjunto	Componente	Modo de falha	Parâmetro	Sensores
Máquina 1	Subconjunto 1.1	Componente 1.1.1	Modo de falha 1	Parâmetro 1	Sim
			Modo de falha 1	Parâmetro 2	Não
			Modo de falha 2	Parâmetro 3	Sim
	Componente 1.1.2	Modo de falha 3	Parâmetro 2	Não	
		-	Parâmetro 4	Sim	

Recomenda-se que os parâmetros mensuráveis com sensores já instalados no equipamento, que não possam ser relacionados com os modos de falha considerados, também sejam listados no formulário F4, associados ao componente onde podem ser medidos (ex.: parâmetro 4). Pretende-se assim estimular o desenvolvimento de soluções que permitam tirar partido dos dispositivos de medição disponíveis no equipamento.

4.8.1.3. Classificação da relação entre os parâmetros e os modos de falha

O objetivo desta etapa é identificar os parâmetros cuja monitorização é prioritária, tendo em consideração a sua relação com os modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores. Assim, propõe-se que a relação entre os parâmetros e os modos de falha seja classificada individualmente num dos níveis descritos em seguida:

- 1. Muito evidente:** as evidências técnicas e/ou científicas que demonstram que a iniciação ou o desenvolvimento do modo de falha tem impacto no parâmetro são consistentes.
- 2. Evidente:** as evidências técnicas e/ou científicas que demonstram que a iniciação ou o desenvolvimento do modo de falha tem impacto no parâmetro são satisfatórias, porém não são totalmente consistentes.

Para registar os resultados da classificação, foi criado o formulário “F5 – Relação entre os parâmetros e os modos de falha” (Tabela 37). Este formulário também visa proporcionar uma perspetiva global das diferentes opções que podem ser consideradas com vista a aplicar a MPC/TD aos modos de falha do equipamento analisado e fornecer informação relevante para apoiar a definição de prioridades.

Tabela 37 – Exemplo genérico do formulário F5.

Máquina 1	Criticidade	Parâmetro 1	Parâmetro 2	Parâmetro 3	Parâmetro 4	...	Parâmetro n
Subconjunto 1.1							
Componente 1.1.1	Vital	Sensor 1	-	Sensor 3			-
Modo de falha 1	A.1	2	1				
Modo de falha 2	A.2			1			
Componente 1.1.2	Essencial	-	-	-	Sensor 4		-
Modo de falha 3	B.1		2				
...							
Subconjunto 1.2							
Componente 1.2.1	Vital	-	-	-	-		-
...							
Subconjunto n							

O formulário proposto especifica os parâmetros registados no formulário F4 e os modos de falha com os quais estão relacionados, o nível de relação entre os parâmetros e os modos de falha (1 ou 2), a subcategoria do modo de falha, a criticidade do componente ao qual o modo de falha está associado, e a designação do sensor relacionado com cada componente e parâmetro.

4.8.1.4. Definição de prioridades

Esta etapa visa priorizar os modos de falha selecionados para a análise da viabilidade técnica e financeira da MPC/TD utilizando sensores. Para esse efeito, são propostos cinco critérios. Os critérios foram definidos com vista a assegurar que é dada maior prioridade a aplicações da MPC/TD com custo de implementação mais baixo, e eficácia e benefícios mais elevados. Pretendeu-se ainda utilizar critérios que recorressem a informação fácil de obter.

No âmbito deste procedimento, propõe-se que a aplicação dos critérios definidos seja realizada sequencialmente, de forma a obter uma lista geral de modos de falha, ordenados do mais prioritário para o menos prioritário. Em seguida, apresentam-se os critérios propostos, pela ordem definida para a sua aplicação.

- **Existência de sensores:** A análise é prioritária se a monitorização da condição puder ser realizada utilizando sensores já instalados no equipamento. Pretende-se assim minorar os custos e o esforço envolvidos na aplicação da MPC.
- **Relação entre o parâmetro e o modo de falha:** A análise é prioritária se a relação entre o parâmetro e o modo de falha é “Muito evidente”.
- **Custo total dos componentes substituídos:** A análise de um determinado componente é prioritária se o valor do custo total dos componentes substituídos, devido à ocorrência do modo de falha ou à necessidade de o prevenir, for mais elevado do que os restantes. Este valor é calculado multiplicando o número de substituições do componente em questão pelo respetivo custo unitário. Caso a diferença entre dois valores seja considerada pouco significativa (ex.: inferior a 5% do valor mais elevado), a prioridade conferida por este critério poderá ser alterada tendo em conta os critérios subsequentes. Recomenda-se que a estimativa do custo seja referente ao período total de utilização do equipamento, desde a sua aquisição. Caso o equipamento não tenha um histórico de funcionamento significativo, poderá ser utilizada informação relativa a equipamentos idênticos. Se tal não for possível, este critério não é considerado.
- **Criticidade do componente:** A análise é prioritária para os modos de falha dos componentes com criticidade mais elevada. A ordem de criticidade dos componentes, começando pela categoria com criticidade mais elevada, é a seguinte: “Vital”, “Essencial” e “Desejável”.
- **Criticidade do modo de falha:** A análise é prioritária para o modo de falha candidato à aplicação da MPC que tem o índice de criticidade mais elevado. A ordem de criticidade dos

modos de falha, começando pela subcategoria com criticidade mais elevada, é a seguinte: A.4, B.4, A.3, A.2, A.1, B.3, B.2 e B.1.

Caso a mesma combinação seja obtida para dois ou mais modos de falha, propõe-se que se opte pelo modo de falha para o qual se estima que a aplicação da MPC terá o custo mais reduzido.

4.8.2. Procedimento para definir os dispositivos de medição de dados

Com este procedimento, pretende-se orientar a seleção dos sensores a instalar no equipamento para aplicar a MPC aos modos de falha selecionados, de acordo com as prioridades definidas com base no procedimento P2. Os novos sensores destinam-se a medir parâmetros relacionados com os modos de falha candidatos à aplicação da MPC que não podem ser medidos pelos sensores já instalados no equipamento. Estes parâmetros são identificados no formulário F5 (subsubsecção 4.8.1.3).

A definição do tipo específico de sensor a considerar no processo de seleção, em função do parâmetro que se pretende medir, exige conhecimento sobre as opções disponíveis no mercado. Assim, em primeiro lugar, é feita uma consulta de mercado destinada a identificar os sensores existentes para medir o parâmetro em questão. Depois, o sensor mais adequado é selecionado utilizando o método proposto por Jones *et al.* (2018). Este método consiste na aplicação de três matrizes, exemplificadas no Apêndice V (Figura 68).

As matrizes visam comparar sensores destinados a medir o mesmo parâmetro através de um ou mais requisitos comunicados aos potenciais fornecedores no âmbito da consulta de mercado. Cada requisito é constituído por um critério (C_n) e pelos respetivos limites. Assim, a utilização deste método requer a identificação dos critérios de seleção mais relevantes. No Apêndice VI (Tabela 76), é apresentada uma lista de critérios recomendados na literatura científica, aplicáveis na seleção de diferentes tipos de sensores (Baranwal *et al.*, 2020; Cheng *et al.*, 2010; Jones *et al.*, 2018; Shieh *et al.*, 2001). A utilização de um conjunto predefinido de critérios tem como objetivo assegurar a seleção de sensores com características técnicas adequadas ao sistema de MPC que se pretende definir e com o menor custo possível.

4.8.3. Procedimento para analisar o impacto dos modos de falha em parâmetros do equipamento/processo

O procedimento definido fornece orientações para verificar a aplicabilidade e a eficácia da MPC/TD utilizando sensores aos modos de falha selecionados com base na aplicação do procedimento P2. Esta verificação é baseada na análise do impacto originado pelo modo de falha nos parâmetros com os quais

está relacionado. Os parâmetros a considerar nesta análise são identificados no formulário F5 (subsubsecção 4.8.1.3).

A análise da aplicabilidade e da eficácia da MPC visa confirmar se é possível detetar a iniciação do modo de falha com a antecedência necessária para permitir a realização de uma ação de manutenção adequada, que evite a ocorrência da falha funcional do componente (ação preventiva). Enquanto a análise da aplicabilidade e da eficácia da TD é realizada com o propósito de verificar se é possível detetar a ocorrência do modo de falha com a antecedência necessária para permitir a realização uma ação de manutenção apropriada, com vista a evitar prejuízos financeiros subsequentes (ação corretiva).

A análise do impacto de um modo de falha nos parâmetros do equipamento/processo pode ser efetuada da seguinte forma:

- Comparando os valores de indicadores determinados a partir de medições dos parâmetros realizadas no período que antecedeu a falha funcional à qual o modo de falha deu origem, com os valores dos mesmos indicadores estimados com base em medições efetuadas quando as condições de operação se encontravam estáveis;
- Procurando identificar tendências na evolução dos valores medidos durante o tempo de vida útil do componente afetado pela falha.

Esta análise envolve o cruzamento de dados dos registos de falhas, com dados relativos a um ou mais parâmetros relevantes. Por isso, são necessários registos referentes a um período em que se verificou pelo menos uma ocorrência do modo de falha candidato à aplicação da MPC/TD utilizando sensores e registos dos valores dos parâmetros relacionados com o modo de falha em questão num período coincidente. A realização desta análise também requer que os registos estejam organizados de forma a facilitar a utilização de técnicas de análise de dados, sobretudo técnicas de *machine learning*.

As etapas do procedimento proposto são representadas no fluxograma da Figura 45. Este procedimento foi definido com base na análise de estudos relacionados com o tema identificados na literatura científica. Dos estudos analisados, destacam-se Tran & Yang (2012), Hwang *et al.* (2018), Latyshev (2018), Tsui *et al.* (2019), Bekar *et al.* (2020) e Oluwasegun & Jung (2020).

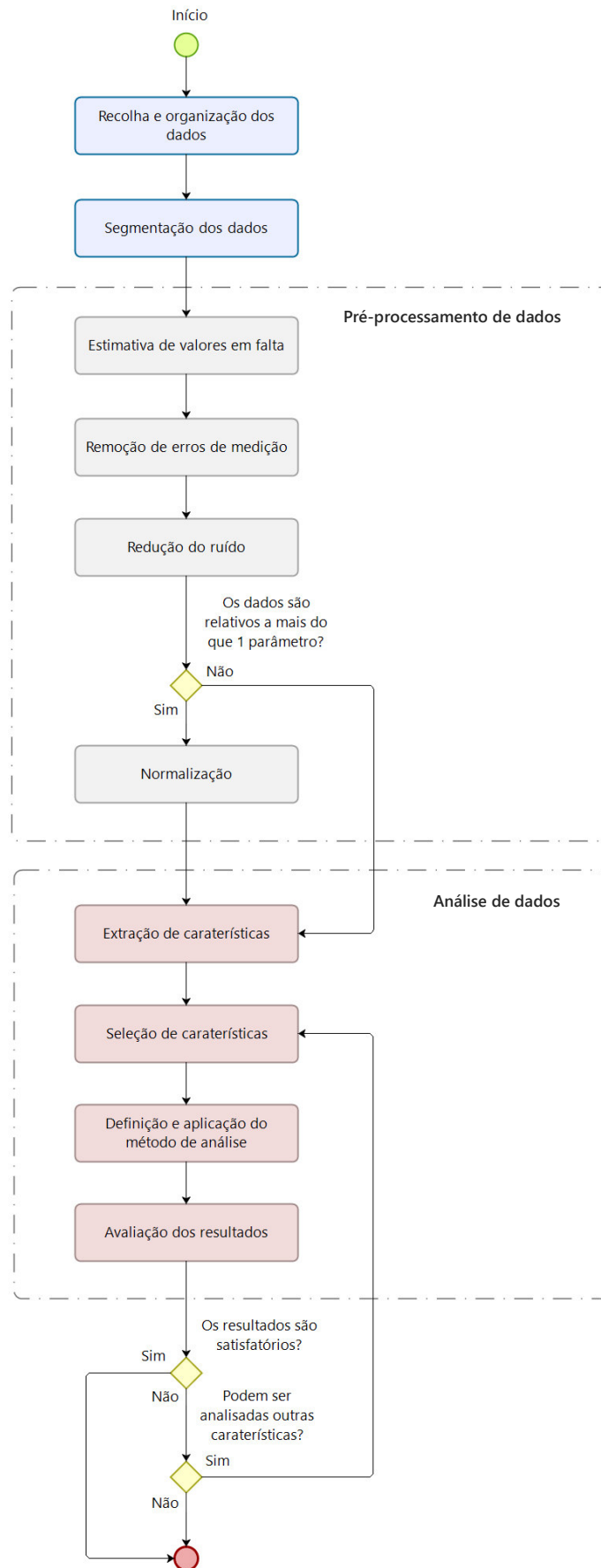


Figura 45 – Etapas do procedimento para analisar o impacto dos modos de falha em parâmetros do equipamento/processo.

As subsubsecções seguintes descrevem as etapas sequenciais do procedimento proposto.

4.8.3.1. Recolha e organização dos dados

Com esta etapa, pretende-se assegurar a recolha dos dados necessários para analisar o impacto do modo de falha nos parâmetros com os quais está relacionado, e definir uma organização uniforme para o registo de falhas e para os registos de parâmetros monitorizados.

➤ **Registo de falhas**

Os dados do registo de falhas são organizados por ordem cronológica num ficheiro que indique a data e hora de abertura do registo. Esta informação destina-se a identificar o instante até ao qual devem ser analisados os valores dos parâmetros monitorizados, a fim de detetar comportamentos que possam ser relacionados com a iniciação e/ou o desenvolvimento do modo de falha considerado.

➤ **Registos de parâmetros monitorizados**

Os registos relativos aos parâmetros do equipamento e do processo são organizados por ordem cronológica num ficheiro com os seguintes campos:

- **Data e hora de medição:** visa facilitar o cruzamento com a informação do registo de falhas. Comparando ambos os registos, podem ser definidos conjuntos de dados que representam as condições normais de operação e conjuntos de dados relativos ao período que antecedeu a ocorrência do modo de falha.
- **Designação do parâmetro:** tem como finalidade identificar o parâmetro medido.
- **Referência do sensor:** destina-se a identificar a localização no equipamento do sensor que realizou as medições. Desta forma, pretende-se assegurar que são utilizados somente valores medidos por sensores relacionados com o componente ao qual está associado o modo de falha.

Os registos relativos aos parâmetros do processo também devem incluir um campo que identifique a referência do produto fabricado no período em que foram efetuadas as medições, visto que os seus valores podem alterar-se de forma significativa de produto para produto. Nesse caso, esta informação será útil para caracterizar o padrão de comportamento de cada parâmetro durante o fabrico de diferentes produtos.

4.8.3.2. Segmentação dos dados

A segmentação dos dados envolve a definição de conjuntos de dados de dimensão adequada para representar as condições normais de operação e o período que antecedeu a falha funcional do componente. Os conjuntos de dados podem ser definidos utilizando:

- Valores relativos a um parâmetro medido pelo mesmo sensor;
- Valores relativos a um parâmetro medido por dois ou mais sensores;
- Valores relativos a dois ou mais parâmetros.

➤ **Condições normais de operação**

São definidas por um conjunto de dados sequenciais que representa um período em que as condições de operação do equipamento se encontravam estáveis. Caso o equipamento disponha de regimes de funcionamento distintos, devem ser definidos conjuntos de dados representativos das condições normais de operação para cada regime de funcionamento.

➤ **Período que antecedeu a falha**

Para cada uma das ocorrências do modo de falha considerado, é definido um conjunto de dados sequenciais representativo do período que antecedeu a falha funcional do componente. Os conjuntos de dados disponíveis são depois utilizados com os seguintes objetivos:

- Definir indicadores destinados a identificar o modo de falha na sua fase de desenvolvimento;
- Avaliar a eficácia dos indicadores e do método de análise de dados.

Os conjuntos utilizados devem incluir dados referentes aos mesmos parâmetros e sensores que foram considerados na definição do conjunto de dados relativo às condições normais de operação.

4.8.3.3. Pré-processamento de dados

Os conjuntos de dados a analisar são sujeitos a um processamento prévio destinado a assegurar a integridade e a consistência dos dados. Esta tarefa pode envolver a estimativa de valores em falta, a remoção de erros de medição, a redução do ruído no sinal dos sensores e a normalização dos dados.

➤ **Estimativa de valores em falta**

Os registos de dados de sensores apresentam por vezes valores em falta respeitantes a um ou mais parâmetros de interesse. A ausência de registo deve-se geralmente a problemas técnicos, tais como o mau funcionamento dos sensores e falhas de comunicação. De forma a reduzir o impacto nos resultados da análise de dados, os valores em falta deverão ser estimados aplicando técnicas apropriadas.

O preenchimento de valores em falta em matrizes de dados é habitualmente designado de imputação. A distribuição dos valores em falta pode ser aleatória ou manifestar um padrão (Rencher, 2002). Na literatura, são propostas diversas técnicas destinadas a estimar valores em falta. No entanto, o seu desempenho só é satisfatório se o número de valores em falta for reduzido (Manly & Alberto, 2016) e se a distribuição dos valores em falta for aleatória (Johnson & Wichern, 2007).

A imputação de valores em falta pode ser efetuada com base na média, mediana ou moda dos valores registados para o mesmo parâmetro no conjunto de dados. Esta técnica é simples e rápida, porém pode gerar resultados pouco rigorosos. A imputação do valor médio contribui para reduzir a variância e o valor absoluto da covariância. Por isso, esta opção deve ser utilizada somente quando o número de valores em falta é pouco significativo (Tabachnick & Fidell, 2012). De forma a obter maior precisão, as estimativas da média podem ser revistas aplicando um método iterativo (Johnson & Wichern, 2007).

Para medições sequenciais, também podem ser aplicadas as seguintes técnicas:

- Imputação da observação anterior ou posterior;
- Interpolação linear ou polinomial;
- Média móvel (simples, ponderada ou exponencial);
- Maximização de expectativa;
- Imputação múltipla.

➤ **Remoção de erros de medição**

Os dados obtidos pelos sensores podem incluir valores incorretos resultantes de erros esporádicos de medição. Em geral, estes valores afastam-se significativamente da média do conjunto de medições obtidas para o mesmo parâmetro, originando *outliers*. A presença *outliers* pode contribuir para que sejam tiradas conclusões inválidas ou pouco rigorosas da análise dos dados. Por isso, é conveniente identificar e remover estes valores. Os erros de medição são facilmente detetados quando os valores registados violam restrições físicas. Por exemplo, a existência de medições com valor negativo. No entanto, na maioria dos casos, é necessário recorrer a técnicas específicas para apoiar a deteção de *outliers* nos dados.

A deteção de *outliers* pode ser realizada visualmente recorrendo a ferramentas gráficas, tais como: histogramas, *box plots*, gráficos de probabilidade normal e diagramas de dispersão. Caso a amostra seja constituída por dados relativos a dois ou mais parâmetros, os *outliers* podem ser identificados em diagramas de dispersão formados por pares de parâmetros. Os valores mais afastados do centro da distribuição são possíveis *outliers*. Neste caso, o impacto dos *outliers* é observado com base no valor do

coeficiente de regressão da reta que melhor se ajusta ao conjunto de valores representadas no diagrama de dispersão (Tabachnick & Fidell, 2012).

Os *outliers* também podem ser identificados analisando os valores padronizados do parâmetro medido e as distâncias quadráticas generalizadas (Johnson & Wichern, 2007). Um critério habitualmente utilizado para identificar *outliers* consiste na determinação do número de desvios padrões de distância em relação à média. Em geral, este número é definido tendo em consideração a dimensão da amostra. É frequente classificar como *outliers* valores que se encontram a mais de 2.5, 3 ou 4 desvios padrões da média (Angelov *et al.*, 2008).

Contudo, nem todos os *outliers* correspondem a valores incorretos. Neste caso, a sua análise pode permitir obter uma melhor compreensão do fenómeno estudado (Johnson & Wichern, 2007). Por isso, os *outliers* só devem ser removidos se a causa que os originou tiver sido identificada. Em situações específicas, pode optar-se por realizar a transformação dos *outliers* (Tabachnick & Fidell, 2012).

➤ **Redução do ruído**

O sinal adquirido pelos sensores encontra-se muitas vezes corrompido por sinal de interferência proveniente do ambiente de operação. Para reduzir o ruído existente nos dados, devem ser aplicados filtros de ruído. Os filtros de ruído são baseados em algoritmos e podem ser utilizados para realizar três operações distintas: filtragem, suavização e previsão de sinal (Simon Haykin, 2017). Alguns dos filtros de ruído mais comuns para séries temporais unidimensionais são (Köhler & Lorenz, 2005):

- Filtro de média móvel;
- Filtro de suavização exponencial;
- Suavização linear de *Fourier*;
- Redução *Wavelet* não linear;
- Redução de ruído não linear simples.

➤ **Normalização**

Sempre que se pretenda efetuar uma análise conjunta de diferentes tipos de parâmetros, os respetivos valores devem ser padronizados para que possam ser representados numa escala uniforme.

4.8.3.4. Análise de dados

A análise de dados visa verificar se o modo de falha candidato à aplicação da MPC pode ser identificado com a antecedência necessária, a partir da análise dos valores dos parâmetros medidos. Esta análise pode envolver a aplicação de métodos descritivos e/ou de métodos preditivos. Em geral, a análise de

dados contempla a extração de características, a seleção de características, a definição e aplicação do método de análise, e a avaliação dos resultados.

➤ **Extração de características**

Envolve a identificação de características (indicadores da condição) destinadas a distinguir o estado normal de operação do componente do estado relacionado com desenvolvimento do modo de falha em questão, utilizando dados relativos a um ou mais parâmetros. Caso o mesmo componente possa ter associados modos de falha distintos, as características identificadas também devem permitir distinguir os diferentes modos de falha.

Para obter características mais distintivas, é recomendada a análise de combinações de características individuais. Se não for possível extrair características distintivas no domínio do tempo, são identificadas características no domínio da frequência e/ou no domínio tempo-frequência. Jaramillo *et al.* (2017) e Zhang *et al.* (2019) apresentam listas detalhadas de características estatísticas no domínio do tempo e no domínio da frequência. Algumas das características mais comuns do domínio do tempo são a média, o desvio padrão, a variância, o desvio quadrático médio, a assimetria e a curtose (achatamento) (Tsui *et al.*, 2015).

Os sinais do domínio do tempo podem ser convertidos para sinais do domínio da frequência aplicando uma transformada rápida de *Fourier*. Devido à existência de impulso periódico em diversos tipos de falha, os seus constituintes de frequência dominantes permitem extrair características distintivas. No entanto, a representação no domínio da frequência só deve ser utilizada quando a frequência não se altera com o tempo (sinal estacionário). Para extrair características de sinal não estacionário, é necessário analisar os dados no domínio tempo-frequência. A análise no domínio tempo-frequência permite caracterizar alterações no espectro do sinal ao longo do tempo. As principais técnicas utilizadas para converter o sinal para o domínio tempo-frequência são a transformada de *Fourier* de tempo curto, a transformada *Wavelet* e a decomposição em modos empíricos (Zhao *et al.*, 2019).

➤ **Seleção de características**

Tem como objetivo selecionar as características mais apropriadas para classificar o estado do componente. Se o número de características extraídas for elevado, podem ser aplicadas técnicas de redução da dimensão, tais como (Fodor, 2002):

- **Técnicas lineares:** análise de componentes principais, análise fatorial, busca de projeções, projeções aleatórias, análise de componentes independentes e algoritmos de otimização;

- **Técnicas não lineares:** curvas principais, escalonamento multidimensional, mapas topologicamente contínuos, redes neurais, quantificação vetorial, algoritmos genéticos e evolucionários, e regressão.

As técnicas de redução da dimensão também podem ser utilizadas para reduzir a dimensão dos dados originais na fase de pré-processamento.

➤ **Definição e aplicação do método de análise**

Envolve a definição e aplicação de um método destinado a identificar a presença do modo de falha em questão na sua fase de desenvolvimento em novas medições dos parâmetros monitorizados. Para esse efeito, deve ser utilizado um algoritmo de *machine learning*, recorrendo a um *software* apropriado. O algoritmo é treinado utilizando os dados referentes às características selecionadas.

Alguns dos modelos de *machine learning* mais utilizados na classificação de falhas são: árvores de decisão, *Naive Bayes*, regressão logística, redes neurais artificiais, análise discriminante, *Support Vector Machine* (SVM) e *k-Nearest Neighbors* (k-NN) (Carvalho *et al.*, 2019; Khan & Yairi, 2018; Tran & Yang, 2012; Wakiru *et al.*, 2019). A seleção do modelo mais adequado pode ser efetuada recorrendo à ferramenta QFD, conforme proposto por (Singh *et al.*, 2020).

Para cada modo de falha candidato à aplicação da MPC, é definida uma antecedência mínima de deteção que permita assegurar um intervalo de tempo suficientemente longo até à falha funcional. Assim, deve ser possível extrair características que permitam identificar o desenvolvimento do modo de falha a partir de dados anteriores ao limite definido. De forma a obter resultados fiáveis na aplicação do algoritmo de classificação, pode ser necessário utilizar um número significativo de conjuntos de dados, relativos a diferentes ocorrências do modo de falha considerado.

Sempre que se justifique, o algoritmo de classificação pode ser apoiado por um modelo preditivo destinado a determinar a RUL do componente, para que seja possível efetuar o escalonamento das ações de manutenção com maior antecedência. Dependendo dos dados existentes, podem ser aplicados modelos de similaridade, modelos de esperança de vida ou modelos de degradação (Sikorska *et al.*, 2011; Zheng, 2019). As estimativas do modelo devem ser atualizadas com uma periodicidade adequada, tendo em conta os valores mais recentes dos parâmetros monitorizados.

- **Modelo de similaridade:**

Pode ser definido se existirem dados do histórico de funcionamento até à falha, relativos a um número significativo de componentes semelhantes. Permite determinar a RUL com base no perfil de degradação

do indicador da condição do componente até à falha. O indicador da condição é definido a partir de valores medidos por sensores que evidenciam uma tendência marcada (positiva ou negativa) entre o estado normal de operação e o estado de falha. Posteriormente, o valor da RUL é determinado com base na distribuição de probabilidade que melhor se ajusta aos dados.

- **Modelo de esperança de vida:**

Pode ser definido caso se encontrem disponíveis dados relativos ao tempo de funcionamento até à falha para um conjunto de componentes similares. O valor da RUL é estimado com base na função densidade de probabilidade da distribuição dos valores dos tempos.

- **Modelo de degradação:**

Pode ser definido se for possível identificar um limite de segurança para o indicador da condição considerado. O indicador da condição é estabelecido a partir de dados de operação do componente em uso. Posteriormente, o modelo de degradação baseia-se no perfil de degradação evidenciado pelo indicador da condição para prever como este se irá alterar no futuro, e estimar o tempo que irá decorrer até que o limite de segurança seja atingido. O limite de segurança é revisto com base na experiência.

Quando não for possível obter dados de funcionamento dos componentes até à falha, podem ser analisados os dados de funcionamento até à substituição preventiva, a fim de verificar se a evolução dos valores medidos pelos sensores evidencia uma tendência que possa ser associada à degradação da condição. Caso sejam identificadas tendências, é definido um modelo preditivo com base na informação existente.

- **Avaliação dos resultados**

Contempla a avaliação do desempenho do método de análise na identificação do modo de falha considerando conjuntos de dados de teste relativos ao período que antecedeu a falha funcional do componente. Caso se verifique que os resultados não são satisfatórios, poderão ser selecionadas outras características para análise.

Esta tarefa envolve a comparação entre diferentes algoritmos, com o objetivo de selecionar aquele que apresenta o melhor desempenho. A comparação pode ser realizada utilizando matrizes de confusão (Janssens *et al.*, 2016; Jiao *et al.*, 2018; Nguyen & Medjaher, 2019; Shao *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2019; Zhu *et al.*, 2019) e métricas qualitativas e quantitativas (Heng *et al.*, 2009). Rezaeianjouybari & Shang (2020) apresentam uma lista que inclui as métricas de avaliação de desempenho mais comuns.

IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA

A metodologia de seleção da política de manutenção e de apoio à implementação da manutenção condicionada foi testada e validada no âmbito de um estudo realizado numa empresa industrial que se dedica ao desenvolvimento e produção de soluções de multimédia e sensores para o sector automóvel. O caso de estudo focou-se nos equipamentos de uma linha de produção, onde são fabricadas placas de circuito impresso (PCBs). O processo produtivo envolve a inserção de dispositivos eletrónicos ou *Surface Mount Devices* (SMD) nas placas, de modo automático, recorrendo a tecnologia de montagem em superfície ou *Surface Mount Technology* (SMT).

Neste capítulo, caracteriza-se o processo produtivo e os equipamentos da linha de produção analisada (linha SMD), descreve-se o modo como são geridos os dados de manutenção na empresa e apresentam-se os resultados da aplicação da metodologia de seleção da política de manutenção e de apoio à implementação da manutenção condicionada. No final do capítulo, é efetuada uma síntese que salienta os principais resultados alcançados.

5.1. Processo e equipamentos

A linha de produção analisada é composta por 21 equipamentos (ou máquinas) e está situada num departamento onde existem outras linhas idênticas. Quando um equipamento avaria, o funcionamento dos restantes equipamentos da mesma linha é interrompido e só é retomado quando todos se encontram em condições de operar.

O fluxograma da Figura 53 identifica as principais atividades do processo produtivo da linha SMD e representa o modo como as máquinas se encontram ordenadas na linha de produção.

O processo produtivo da linha SMD inicia-se com a máquina “carregador de PCBs” (E1), que tem a função de armazenar e transportar os PCBs para a máquina seguinte. Posteriormente, na máquina de “gravação a laser” (E2), é realizada a gravação do código de barras, para garantir a rastreabilidade do produto, e da matriz de dados associados ao produto.

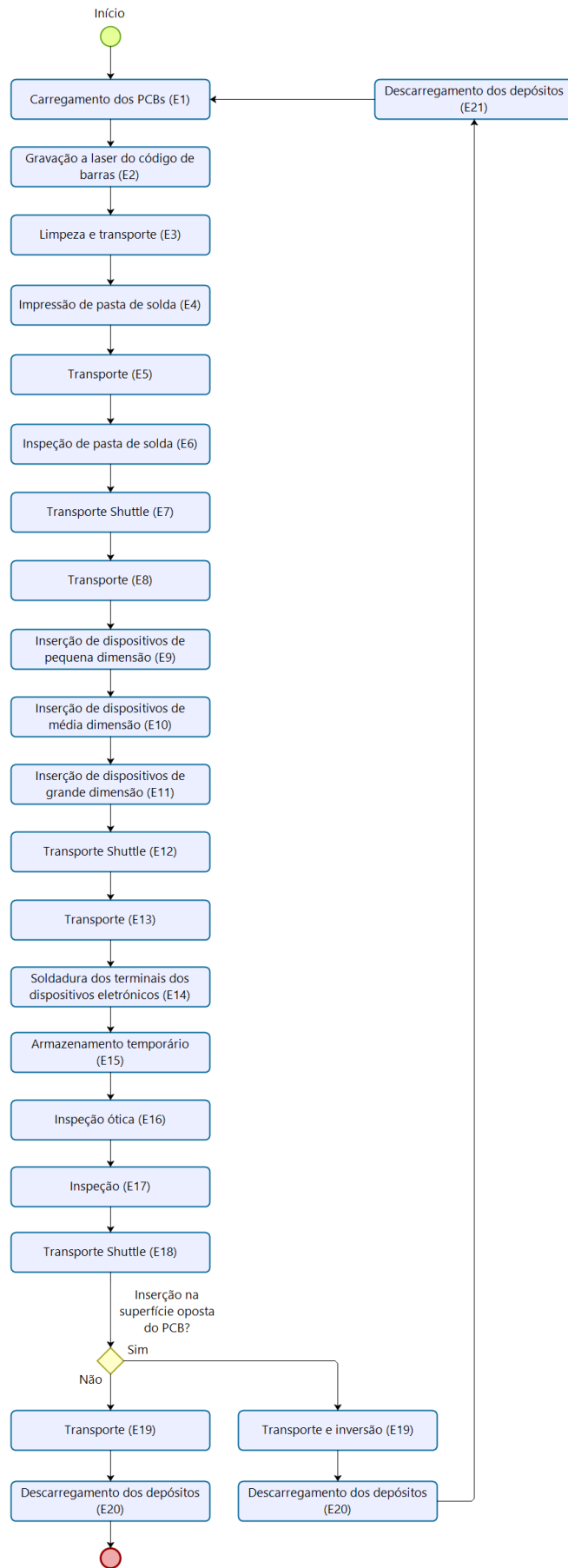


Figura 46 – Fluxograma do processo produtivo da linha SMD.

A máquina de “limpeza e transporte” (E3) efetua a limpeza dos PCBs, enquanto os transporta para a máquina de “impressão de pasta” (E4). A máquina E3 utiliza uma cabeça de aspiração, para eliminar os resíduos existentes na superfície dos PCBs, e uma cabeça de ionização, para remover a eletricidade estática.

Na máquina E4, é realizada a impressão de pasta de solda. Esta operação visa ligar os circuitos dos PCBs aos terminais dos dispositivos eletrônicos. Posteriormente, os PCBs são transportados pela máquina “transporte de ligação 1” (E5) para a máquina de “inspeção de pasta” (E6), onde se realiza a inspeção da pasta. Na máquina E6, é verificada a conformidade dos depósitos de pasta de solda dos PCBs. Quando a máquina detecta possíveis defeitos nos depósitos de pasta, é apresentada a imagem do erro/pseudoerro ao operador da linha, que decide se o PCB inspecionado pode continuar no processo produtivo ou se deve ser segregado para refugo.

Caso não sejam detectados defeitos, os PCBs passam para a máquina “transporte *shuttle* 1” (E7), que efetua o carregamento de dois PCBs, alternadamente, para o duplo transporte da máquina “transporte de ligação duplo” (E8). Em seguida, os PCBs são transportados em paralelo para as máquinas: “inserção 16+16 *Nozzles*” (E9), “inserção 8+8 *Nozzles*” (E10) e “inserção 3+3 *Nozzles*” (E11). Estas máquinas realizam a inserção automática dos dispositivos eletrônicos nos PCBs.

Na máquina E9, é efetuada a inserção dos dispositivos com menor dimensão e complexidade. A dimensão e a complexidade dos dispositivos inseridos vão aumentando de máquina para máquina, de acordo com a sequência estabelecida (E9, E10 e E11). Em cada máquina, a inserção é realizada com o auxílio de duas cabeças robotizadas. O número de dispositivos inseridos, de cada vez, varia de acordo com o tipo de máquina. Na máquina E9, as cabeças inserem, individualmente, 16 dispositivos, na máquina E10, 8 dispositivos e, na máquina E11, 3 dispositivos. Depois de concluída a inserção na máquina E11, os PCBs são transportados para a máquina “transporte *shuttle* 2” (E12). Esta máquina tem a função de transportar e colocar, alternadamente, os PCBs na máquina “transporte de ligação 2” (E13), que realiza um transporte simples.

Na máquina de “soldadura” (E14), procede-se à soldadura dos terminais dos dispositivos eletrônicos. No interior deste equipamento, o PCB é sujeito a um aumento gradual da temperatura, até atingir os 245°C, aproximadamente, para transformar a pasta de solda numa liga metálica. À medida que os PCBs se aproximam da saída, a temperatura diminui gradualmente para permitir que a pasta de solda solidifique.

A máquina “transporte FIFO/LIFO” (E15) efetua o transporte dos PCBs para a máquina “inspeção ótica automatizada” (E16). Quando o funcionamento da linha é interrompido, esta máquina também realiza o armazenamento temporário dos PCBs que saem da máquina E14. Nesse caso, a máquina E14 só deve parar de funcionar depois de saírem todos os PCBs que se encontram no seu interior. A máquina E15 pode ser programada para transportar os PCBs de acordo com os critérios *Last In First Out* (LIFO) ou *First In First Out* (FIFO).

Na máquina E16, realiza-se a inspeção ótica para avaliar a conformidade dos PCBs. Esta inspeção envolve a comparação de valores relativos a parâmetros do produto, que se encontram predefinidos, com os respetivos valores de referência. Quando existem desvios significativos, a máquina gera pseudoerros e identifica a dúvida originada. Neste caso, o operador verifica a conformidade do PCB, sobre o qual existem dúvidas, na máquina “bancada de inspeção” (E17), recorrendo a um microscópio, sempre que necessário. Caso a avaliação do operador não seja requerida, a E17 transporta os PCBs para a máquina “transporte *shuttle* 3” (E18), que estabelece a ligação com a máquina “transporte inversor” (E19).

Quando se pretende realizar em seguida a inserção de dispositivos eletrónicos na superfície oposta dos PCBs, a máquina E19 inverte a posição dos PCBs e transporta-os para a máquina “descarregador de depósitos” (E20). Caso contrário, a máquina E19 realiza o transporte dos PCBs para a máquina E20, sem inverter a sua posição. Se a linha estiver disponível, os depósitos de PCBs semiacabados são transportados pelo operador para a máquina “carregador de depósitos” (E21), onde se inicia novamente o processo produtivo. Caso não exista disponibilidade imediata da linha, os PCBs são armazenados temporariamente numa área reservada. Para os PCBs semiacabados, as máquinas E1 e E2 são utilizadas somente para transporte.

5.2. Gestão dos dados de manutenção

O sistema de informação da empresa é constituído por três categorias de registos de manutenção, tais como: registo de falhas, registo de ações preventivas e registo de ações de melhoria.

Os registos de falhas são preenchidos no sistema informático de gestão da manutenção desenvolvido pela empresa (CMMS). Quando ocorre uma falha no equipamento, o operador envia uma ordem de reparação à equipa responsável pela manutenção corretiva para transmitir informação sobre o problema detetado, a localização do equipamento e o estado da linha de produção. Depois da intervenção, o engenheiro/técnico de manutenção preenche um relatório descrevendo a ação que realizou. O registo

de ações preventivas é preenchido no *software Systems Applications and Products* (SAP) e o registo de ações de melhoria é efetuado em ficheiros de Excel. Por isso, estes registos não podem ser agregados automaticamente, para obter a sequência completa de eventos relacionados com um equipamento específico. Os consumos de peças sobressalentes relativos às substituições corretivas e preventivas são registados somente no SAP e não especificam a localização exata do componente. Esta limitação é particularmente relevante, visto que as máquinas têm diversos componentes idênticos. Por este motivo, o MTTF dos componentes não pode ser determinado.

A análise dos registos de falhas permitiu identificar diversas lacunas. Verificou-se que não era possível extrair, de uma forma rápida e direta, informação relevante sobre os modos de falha, em particular a localização, as causas, os efeitos e a frequência. A informação foi registada utilizando diferentes termos e expressões para descrever eventos e ações similares. Além disso, a informação existente é, habitualmente, pouco rigorosa, inconsistente e/ou incompleta. Também se constatou que alguns campos são compostos por listas predefinidas. No entanto, muitas das opções que compõem as listas existentes não estão em concordância com a designação da respetiva lista, uma vez que estas são atualizadas por diferentes funcionários, com base na sua interpretação subjetiva. Esta circunstância contribui para dificultar a seleção da opção mais adequada, por parte do engenheiro/técnico, e a posterior compreensão dos registos, visto que a informação resultante pode ser ambígua e suscetível de induzir em erro. Verificou-se ainda que determinadas intervenções corretivas realizadas em equipamentos considerados críticos e o seu acompanhamento subsequente são registadas num formulário de papel. Porém, esta informação não é transferida para o CMMS.

5.3. Ranking de equipamentos

As máquinas da linha de produção foram ordenadas de acordo com a sua criticidade, utilizando o “M1 – Método para ranking dos equipamentos” (Tabela 38). O valor do índice de criticidade (Cr) resultou da soma dos valores normalizados dos critérios “Tempo de paragem” (Tn) e “Custo de manutenção” (Cn), multiplicados pelo respetivo peso. O peso atribuído aos critérios foi de 50%, uma vez que se considera que ambos têm a mesma importância. O ranking das máquinas foi definido com base em dados relativos ao período entre abril de 2018 e outubro de 2020.

Tabela 38 – Ranking das máquinas da linha SMD18.

Máquina	Designação	<i>Tn</i>	<i>Cn</i>	<i>Cr</i>
E4	Impressão de pasta	1,00000	0,93052	0,96526
E14	Soldadura	0,66040	1,00000	0,83020
E10	Inserção 8+8 <i>Nozzles</i>	0,93676	0,47471	0,70573
E2	Gravação a laser	0,96911	0,16500	0,56705
E11	Inserção 3+3 <i>Nozzles</i>	0,71676	0,38882	0,55279
E9	Inserção 16+16 <i>Nozzles</i>	0,52515	0,54772	0,53643
E1	Carregador de PCBs	0,66562	0,01666	0,34114
E16	Inspeção ótica automatizada	0,60593	0,01132	0,30863
E6	Inspeção de pasta	0,33292	0,01123	0,17207
E17	Bancada de inspeção	0,23795	0,05152	0,14473
E8	Transporte de ligação duplo	0,10144	0,05623	0,07884
E21	Carregador de depósitos	0,10269	0,03558	0,06914
E15	Transporte FIFO/LIFO	0,12607	0,00000	0,06303
E20	Descarregador de depósitos	0,09038	0,00613	0,04826
E19	Transporte inversor	0,05176	0,00946	0,03061
E3	Limpeza e transporte	0,04383	0,01457	0,02920
E5	Transporte de ligação 1	0,03319	0,02005	0,02662
E13	Transporte de ligação 2	0,01774	0,00000	0,00887
E18	Transporte <i>shuttle</i> 3	0,01231	0,00000	0,00616
E7	Transporte <i>shuttle</i> 1	0,00000	0,01214	0,00607
E12	Transporte <i>shuttle</i> 2	0,00376	0,00295	0,00335

Os métodos e os procedimentos subsequentes da metodologia de seleção da política de manutenção e de apoio à implementação da manutenção condicionada foram aplicados consecutivamente às duas primeiras máquinas do ranking, conforme descrito nas secções 5.4 e 5.5. Este trabalho foi realizado com a colaboração de uma equipa constituída por dois engenheiros da empresa onde decorreu o estudo e pelos dois técnicos especialistas dos equipamentos analisados.

5.4. Máquina de impressão de pasta Ekra Serio 5000

O primeiro equipamento analisado foi a máquina Ekra Serio 5000 (Figura 47), visto que apresenta o índice de criticidade mais elevado no ranking das máquinas da linha SMD18 (Tabela 38).

A máquina Ekra Serio 5000 realiza a impressão de pasta de solda. A pasta de solda tem a função de estabelecer a ligação entre os circuitos do PCB e os terminais dos dispositivos eletrónicos. É aplicada sobre os circuitos utilizando uma ferramenta designada de raquetele. Para efetuar o espalhamento da pasta de solda, a raquetele é movida com o auxílio de um motor. Esta operação exige uma temperatura

entre os 22 e os 26°C. Durante o espalhamento, o PCB fica assente sobre uma tela de superfície lisa. A seleção da raquete e da tela é realizada de acordo com as dimensões do PCB.

Periodicamente, após um número predefinido de impressões, que depende de características e de especificidades dos produtos, é realizada a limpeza da tela. A operação de limpeza é efetuada recorrendo a um mecanismo que utiliza papel e um fluido específico para a remoção de partículas de pasta de solda. Esta operação pode ser auxiliada por um sistema de vácuo, destinado a aspirar os resíduos existentes.

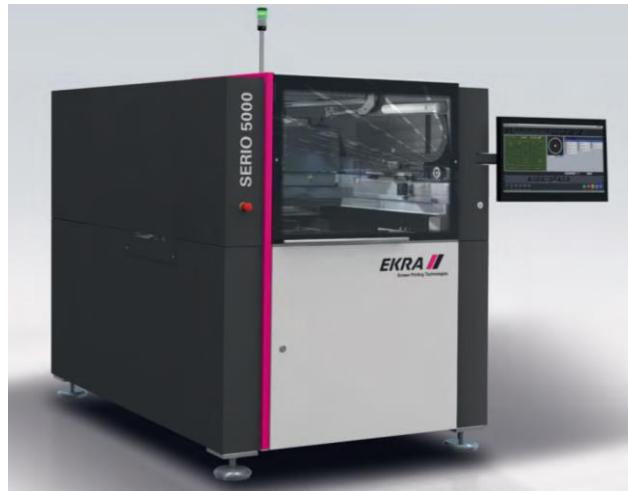


Figura 47 – Máquina de impressão de pasta Ekra Serio 5000.

Em seguida, descreve-se a aplicação dos métodos e procedimentos subsequentes da metodologia e apresentam-se os resultados obtidos.

5.4.1. Classificação multicritério dos componentes do equipamento

Os tipos de componentes da máquina Ekra Serio 5000 que têm associado um código interno foram classificados nas três categorias de criticidade. Para facilitar a aplicação do método de classificação, identificaram-se os principais subconjuntos do equipamento e caracterizou-se a sua função. Posteriormente, os diferentes tipos de componentes foram associados aos subconjuntos de que fazem parte e, por fim, classificaram-se todas as combinações “subconjunto – tipo componente”.

Os principais passos realizados no âmbito da classificação dos tipos de componentes são descritos em seguida.

5.4.1.1. Identificação dos subconjuntos do equipamento

A identificação dos subconjuntos do equipamento e a caracterização da sua função visou auxiliar a classificação da função desempenhada por cada tipo de componente no processo produtivo e o respetivo impacto. Os subconjuntos identificados na máquina Ekra Serio 5000 são descritos na Tabela 39.

Tabela 39 – Subconjuntos da máquina Ekra Serio 5000.

Subconjunto	Descrição da função	Tipo
Dispensador de Pasta de Solda	Realiza a dispensação da pasta de solda sobre a tela.	Móvel
iPAG	Coloca os pontos de cola, destinados a fixar os dispositivos eletrónicos no PCB.	Móvel
Sistema de Controlo Elétrico	Efetua a alimentação elétrica da máquina.	Fixo
Sistema de Limpeza	Realiza a limpeza da tela, com uma periodicidade definida previamente.	Fixo
Sistema de Segurança	Contribui para assegurar que a máquina é utilizada em condições de segurança.	Fixo
Sistema de Transporte	Realiza o transporte controlado do PCB até à máquina seguinte.	Fixo
Sistema de VarioGrid	Suporta o PCB durante o processo de impressão de pasta.	Móvel
Unidade da Câmara	Assegura que o PCB para na posição correta e verifica a posição dos pontos de cola no PCB.	Fixo
Unidade de Elevação	Efetua a aproximação do PCB à tela para a realização do processo de impressão de pasta.	Fixo
Unidade de Raspador	Arrasta a pasta de solda ao longo da tela, depositando-a nos locais pretendidos da superfície do PCB.	Fixo

Os subconjuntos existentes são de dois tipos: fixos e móveis. Os subconjuntos fixos são formados somente por componentes que permanecem fixos no equipamento, até ao fim do seu tempo de vida. Por sua vez, os subconjuntos móveis são constituídos por uma parte móvel e por uma parte que permanece fixa no equipamento. A parte móvel pode ser utilizada em diferentes máquinas do mesmo modelo e pode incluir um ou mais componentes.

5.4.1.2. Identificação dos componentes do equipamento

Os tipos de componentes do equipamento foram identificados com base numa lista geral de aquisições imputadas às 27 máquinas Ekra Serio 5000 da empresa. Esta lista foi obtida a partir dos registos efetuados no SAP, no período entre 29 de julho de 2016 e 31 de dezembro de 2020. Posteriormente, foram excluídos da lista os consumíveis, os subconjuntos reparáveis, e as peças sobressalentes cuja aquisição foi imputada erradamente ao tipo de máquina em análise. Desta forma, obteve-se uma lista final de 80 tipos de componentes, dos quais 60 são fixos e 20 pertencem a subconjuntos móveis.

Cada tipo de componente, tem associado um número interno distinto e pode estar presente numa ou mais posições do equipamento. Na lista final, constam tipos de componentes que, na data em que foi

efetuada a classificação, ainda não tinham sido substituídos nas máquinas Ekra Serio 5000, visto que foram adquiridos para suprir necessidades futuras.

A Tabela 40 especifica a data de início de atividade de cada uma das 27 máquinas Ekra Serio 5000 e o período de atividade em dias e anos, até 31 de dezembro de 2020. As máquinas Ekra Serio 5000 estão presentes em 19 linhas de produção. Algumas linhas utilizam duas máquinas deste tipo, conforme se observa na Tabela 40. Esta configuração é designada de *dual lane*. Por outro lado, quando existe somente uma máquina de impressão de pasta na linha, a configuração resultante denomina-se *single lane*.

Tabela 40 – Datas de entrada em funcionamento e período de atividade das máquinas Ekra Serio 5000, até 31/12/2020.

Linha	Data de início	Dias	Anos
SMD05	29/07/2016	1616	4,43
SMD08	29/07/2016	1616	4,43
SMD11	03/08/2016	1611	4,41
SMD17	02/01/2017	1459	4,00
SMD18	26/01/2017	1435	3,93
SMD30	19/04/2017	1352	3,70
SMD15	12/05/2017	1329	3,64
SMD32	12/07/2017	1268	3,47
SMD13	01/01/2018	1095	3,00
SMD33	01/01/2018	1095	3,00
SMD27	27/04/2018	979	2,68
SMD27	27/04/2018	979	2,68
SMD16	26/06/2018	919	2,52
SMD16	26/06/2018	919	2,52
SMD19	30/07/2018	885	2,42
SMD34	08/11/2018	784	2,15
SMD34	08/11/2018	784	2,15
SMD35	21/11/2018	771	2,11
SMD35	21/11/2018	771	2,11
SMD36	10/12/2018	752	2,06
SMD36	10/12/2018	752	2,06
SMD37	10/01/2019	721	1,98
SMD37	10/01/2019	721	1,98
SMD38	29/01/2019	702	1,92
SMD38	29/01/2019	702	1,92
SMD22	30/01/2019	701	1,92
SMD22	30/01/2019	701	1,92
Total		27419	75,12
Média		1016	2,78

5.4.1.3. Associação dos componentes aos subconjuntos do equipamento

Os diferentes tipos de componentes identificados foram associados aos subconjuntos de que fazem parte. Em alguns casos, constatou-se que o mesmo tipo de componente está associado a mais do que um subconjunto. Esta situação verifica-se quando:

- Diferentes componentes do mesmo tipo contribuem isoladamente para o funcionamento de subconjuntos distintos, por exemplo o componente “Proportional Pressure Regulator;542234” é utilizado na Unidade de Rapador e no Sistema de Transporte;
- O mesmo componente contribui em simultâneo para o funcionamento de dois ou mais subconjuntos, por exemplo o “Motor controller ECOSTEP54-AA” e o “Magnetic tape;5028000078”.

A identificação destes casos permitiu diferenciar componentes do mesmo tipo, tendo em conta o subconjunto ao qual estão associados, na aplicação do método de classificação dos componentes e na definição da criticidade dos respetivos modos de falha.

Também se constatou que existem tipos distintos de componentes que podem ocupar a mesma posição na máquina. A atribuição de um código e de uma designação diferente a estes componentes deve-se ao facto de terem características técnicas distintas ou de serem provenientes de fornecedores diferentes. Esta circunstância verifica-se para os seguintes componentes:

- “válvula VUVG-B10-M52-RZT-F;573416” e “válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417” do Sistema de Limpeza;
- “barra de vacuo Ekra 5000;405 400 45 14”, “Barra vácuo 300mm Ekra;4054005520” e “Barra vácuo 400mm Ekra;4054005614” do Sistema de Limpeza;
- “Stop pin;4039000907” e “PINO AÇO BCW TEMPBATENTE EKRA” da Unidade da Câmara.

Os tipos de componentes distintos que são utilizados na mesma posição da máquina foram classificados na mesma categoria. Posteriormente, os respetivos modos de falha foram analisados de forma independente.

5.4.1.4. Aplicação do método de classificação dos componentes

A classificação dos tipos de componentes identificados foi realizada tendo em consideração o subconjunto ao qual estão associados. Os resultados da classificação de cada combinação “subconjunto – tipo de componente” são apresentados na Tabela 41.

A análise dos resultados obtidos permitiu verificar que 53 tipos de componentes são “Vitais”, 11 são “Essenciais” e 16 são “Desejáveis”. Consta-se ainda que existem 3 tipos de componentes da categoria de criticidade “Desejável” com função auxiliar e sem impacto na produção (combinação 1x0 matriz de combinações). Estes tipos de componentes não são considerados críticos e, por isso, não foram contemplados na análise destinada a definir a criticidade dos modos de falha. O elevado número de tipos de componentes que pertencem à categoria “Vital” é justificado pelo facto de os seus modos de falha predominantes originarem erros que, geralmente, resultam na paragem súbita ou no bloqueio da máquina. Estes erros são despoletados por mecanismos predefinidos.

5.4.2. Definição da criticidade dos modos de falha

Os componentes críticos da máquina Ekra Serio 5000 foram analisados com vista a definir a criticidade dos respetivos modos de falha. Esta análise foi realizada com o apoio de um grupo de engenheiros/técnicos de manutenção e recorrendo a informação dos registos de falhas do equipamento.

Em primeiro lugar, foram identificados os modos de falha potenciais de cada um dos 77 tipos de componentes críticos. Posteriormente, para cada modo de falha, definiu-se o efeito, as causas, os sintomas, a subcategoria e o comportamento da função de risco. Esta informação foi registada no formulário “F1 – Informação relativa aos componentes críticos” (Tabela 41). Durante o preenchimento do formulário, os termos e expressões utilizados pelos engenheiros/técnicos foram normalizados. Posteriormente, a informação obtida foi revista e validada pelo especialista do equipamento.

No que diz respeito aos componentes do mesmo tipo que se encontram em posições diferentes do mesmo subconjunto, verificou-se que os modos de falha e os respetivos efeitos, causas e sintomas são idênticos. Os modos de falha com designação igual são considerados distintos quando são respeitantes a:

- Componentes do mesmo tipo situados em subconjuntos distintos;
- Diferentes tipos de componentes (incluindo aqueles que podem ocupar a mesma posição no equipamento).

Assim, esta análise contemplou os modos de falha referentes a 81 combinações “subconjunto – tipo componente”.

Com base na observação dos registos de falhas, respeitante às 27 máquinas Ekra Serio 5000, efetuados no CMMS, constatou-se que somente 25 tipos de componentes têm consumos associados a ordens de

reparação do equipamento. Porém, a informação existente não permite identificar com rigor o modo de falha verificado.

Para os componentes “Clamping Flange;4036000803” do Sistema de Limpeza e “Shim ring DIN988-12-18-2;5052000156” da Unidade de Raspador, não foram definidos modos de falha. Estes componentes desempenham uma função mecânica e considera-se que, durante o funcionamento da máquina, não estão sujeitos a um desgaste significativo. Por isso, a probabilidade de falha é praticamente nula. No entanto, devido à sua dimensão reduzida, existe a possibilidade de se perderem, quando são retirados da máquina, no âmbito das ações de manutenção. Por isso, neste caso, optou-se por manter a política de manutenção existente.

A Tabela 41 reúne a informação registada no formulário F1. Neste formulário, é apresentada a legenda de cores definida para apoiar o planeamento das reuniões com os engenheiros/técnicos que participaram na análise. Os tipos de componentes sinalizados com a cor verde foram substituídos, pelo menos uma vez, no âmbito de ações de MC e têm um registo de falha associado. Por isso, a identificação e análise dos respetivos modos de falha foi efetuada com o auxílio das pessoas que efetuaram as reparações. Para identificar e analisar os modos de falha dos tipos de componentes que foram substituídos e não têm associados registos no CMMS, foi solicitado o apoio dos colaboradores mais experientes. Por fim, os modos de falha potenciais dos tipos de componentes que não tinham associadas substituições, até à data da análise, foram identificados e analisados com o auxílio do especialista do equipamento.

Tabela 41 – Formulário “F1 – Informação relativa aos componentes críticos” (máquinas Ekra Serio 5000).

Ekra Serio 5000											
Legenda											
Componente substituído dentro de garantia											
Componente nunca substituído											
Componente não crítico											
Componente ausente dos registos de falhas do CMMS											
Componente presente nos registos de falhas do CMMS											
Tipo	Subconjunto	Componente	Função	Impacto na produção	Criticidade	Modo de falha	Efeito	Causas	Sintomas	Subcategoria	Função de risco
Móvel	Dispensador de Pasta de Solda	O-ring TSD 1400 - 10B; 502612005	3	2	Essencial	Deformado	Dispensação de pasta realizada incorretamente - Contaminação da máquina com pasta	Desgaste resultante do processo de limpeza; Utilização de um líquido de limpeza abrasivo	-	B.2	Crescente
Móvel	Dispensador de Pasta de Solda	vedante;4030000550	3	2	Essencial	Deteriorado	Dispensação de pasta realizada incorretamente - Contaminação da máquina com pasta	Desgaste resultante do processo de limpeza; Utilização de um líquido de limpeza abrasivo	-	B.2	Crescente
Móvel	Dispensador de Pasta de Solda	Dosing piston;4039001032	3	2	Essencial	Entupido	Dispensação de pasta realizada incorretamente - Contaminação da máquina com pasta	Limpeza incorreta quando é substituído o boião de pasta	-	B.2	Crescente
Móvel	Dispensador de Pasta de Solda	Nozzle, d = 12mm;4039001051	3	2	Essencial	Entupido	Dispensação de pasta realizada incorretamente - Contaminação da máquina com pasta	Limpeza incorreta quando é substituído o boião de pasta	-	B.2	Crescente
Móvel	Dispensador de Pasta de Solda	Closing unit paste dispenser;4056002530	3	1	Essencial	Sujo	Contaminação da máquina com resíduos de pasta	Contacto com a pasta dispensada durante o processo de impressão	-	B.2	Crescente
Fixo	Dispensador de Pasta de Solda	Hight knurled screw;5050000107	1	1	Desejável	Sujo	Contaminação da máquina com resíduos de pasta	Contacto com a pasta dispensada durante o processo de impressão	-	B.2	Crescente

Tipo	Subconjunto	Componente	Função	Impacto na produção	Criticidade	Modo de falha	Efeito	Causas	Sintomas	Subcategoria	Função de risco
Fixo	Dispensador de Pasta de Solda	Motor 23S21-0250-0000;5310000036	3	3	Vital	Queimado	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Sobreaquecimento; Sobretensão	-	A.3	Não crescente
						Rolamentos danificados	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Desgaste; Lubrificação incorreta do eixo do motor	Alteração da vibração; Aumento da temperatura	A.3	Crescente
						Enrolamentos danificados	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Sobreaquecimento; Sobretensão	-	A.3	Não crescente
Fixo	Dispensador de Pasta de Solda	High knurled screw;5050000785	3	1	Essencial	Sujo	Contaminação da máquina com resíduos de pasta	Contacto com a pasta dispensada durante o processo de impressão	-	B.2	Crescente
Móvel	iPAG	O-RING; 4.5 X 1.5	3	3	Vital	Deformado	Máquina parada - Colocação incorreta do ponto de cola; Erro de verificação do ponto de cola	Compressão	-	A.3	Crescente
Móvel	iPAG	O-RING; 3.5 X 2	3	3	Vital	Deformado	Máquina parada - Colocação incorreta do ponto de cola; Erro de verificação do ponto de cola	Compressão	-	A.3	Crescente
Móvel	iPAG	Push-in L-fitting - QSML-M3-3 153330	3	3	Vital	Entupido	Máquina parada - Colocação incorreta do ponto de cola; Erro de verificação do ponto de cola	Contaminação acidental com resíduos de pasta	-	A.3	Não crescente
						Partido	Máquina parada - Colocação incorreta do ponto de cola; Erro de verificação do ponto de cola	Impacto acidental com o PCB	Aumento do fluxo de ar que auxilia o escoamento da cola	A.3	Não crescente
Móvel	iPAG	Cartridge adapter, complete 2299001178	3	3	Vital	Entupido	Máquina parada - Colocação incorreta do ponto de cola; Erro de verificação do ponto de cola	Acumulação de cola seca	-	A.3	Crescente
Móvel	iPAG	Connection Plug KS1; 5673000247	3	3	Vital	Partido	Máquina parada - Colocação incorreta do ponto de cola; Erro de verificação do ponto de cola	Impacto acidental	Aumento do fluxo de ar que auxilia o escoamento da cola	A.3	Não crescente
Móvel	iPAG	jet-kabel 12pol;2444000099	3	3	Vital	Partido	Máquina bloqueada - O IPAG não dispensa cola; Erro do IPAG	Desgaste gerado pelas calhas móveis	-	A.3	Crescente

CAPÍTULO 5 | IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA

Tipo	Subconjunto	Componente	Função	Impacto na produção	Criticidade	Modo de falha	Efeito	Causas	Sintomas	Subcategoria	Função de risco
Móvel	iPAG	Nozzle 06mm to iPAG Jet;5900001047	3	3	Vital	Empenado	Máquina parada - Colocação incorreta do ponto de cola; Erro de verificação do ponto de cola	Manuseamento incorreto; Impacto acidental	-	A.3	Não crescente
						Entupido	Máquina parada - Colocação incorreta do ponto de cola; Erro de verificação do ponto de cola	Acumulação de cola seca	-	A.3	Crescente
Móvel	iPAG	O-ring Heating - iPAG Jet;5026120077	3	3	Vital	Fissurado	Máquina parada - Colocação incorreta do ponto de cola; Erro de verificação do ponto de cola	Desgaste resultante de fricção na agulha; Temperatura elevada	-	A.3	Crescente
Móvel	iPAG	O-ring Tappet - iPAG Jet;5026120084	3	3	Vital	Deformado	Máquina parada - Colocação incorreta do ponto de cola; Erro de verificação do ponto de cola	Desgaste; Temperatura elevada	-	A.3	Crescente
Móvel	iPAG	Luerlock contra-angle adapter;5900001056	3	3	Vital	Entupido	Máquina parada - Colocação incorreta do ponto de cola; Erro de verificação do ponto de cola	Acumulação de cola seca	-	A.3	Crescente
Móvel	iPAG	O-ring; 12x2	3	3	Vital	Deformado	Máquina parada - Colocação incorreta do ponto de cola; Erro de verificação do ponto de cola	Desgaste; Temperatura elevada	-	A.3	Crescente
Móvel	iPAG	Mounting pin For iPAG-Jet;4035000337	3	3	Vital	Partido	Máquina parada - Colocação incorreta do ponto de cola; Erro de verificação do ponto de cola	Impacto acidental com o PCB	-	A.3	Não crescente
Móvel	iPAG	iPAG dispensing cup;8012900049	1	0	Desejável						
Móvel	iPAG	Cable FDCY 4x014mm w/shield;5361000004	3	3	Vital	Cabo partido	Máquina bloqueada - O IPAG não dispensa cola; Erro do IPAG	Desgaste gerado pelas calhas móveis	-	A.3	Crescente
Fixo	Sistema de Controlo Elétrico	fonte PULS 36-42V, 133A; 670-0670	1	3	Vital	Queimado	Máquina bloqueada - Drivers sem energia; Erro de Can Bus	Variações de tensão	-	A.3	Não crescente

CAPÍTULO 5 | IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA

Tipo	Subconjunto	Componente	Função	Impacto na produção	Criticidade	Modo de falha	Efeito	Causas	Sintomas	Subcategoria	Função de risco
Fixo	Sistema de Controlo Elétrico	Power Supply 60V/10ASWS600L6 0;5321000080	1	3	Vital	Queimado	Máquina bloqueada - Não alimenta o motor de subida da mesa de impressão; Erro de referência do motor de subida	Pico de energia	-	A.3	Não crescente
Fixo	Sistema de Controlo Elétrico	Scanner Datalogic D9531-HP;5399000453	1	2	Essencial	Lente danificada	Não lê o código de barras	Manuseamento incorreto; Impacto accidental	-	A.2	Não crescente
		Scanner Datalogic D9531-HP;5399000453				Fio danificado	Não lê o código de barras	Desgaste	-	A.2	Crescente
Fixo	Sistema de Controlo Elétrico	monitor;ProLite T2253MTS-B5 (B1)	1	2	Essencial	Touch danificado	Não é possível executar comandos	Manuseamento incorreto; Impacto accidental; Desinfecção do monitor	-	A.2	Não crescente
Fixo	Sistema de Controlo Elétrico	Power Supply PULS CPS20361;5321000071	1	3	Vital	Queimado	Máquina bloqueada - Não existe movimento do eixo; Erro de Can Bus	Pico de energia	-	A.3	Não crescente
Fixo	Sistema de Controlo Elétrico	Pack baterias RBC48;689-9058	1	3	Vital	Descarregado	Máquina parada - UPS desligado	Desgaste	Alteração da tensão e/ou da corrente de saída	A.3	Crescente
Fixo	Sistema de Limpeza	Solvent container : 5900000011	1	3	Vital	Partido	Limpeza incorreta da tela - Não é aplicado líquido de limpeza; Erro de falta de líquido de limpeza	Impacto accidental; Contacto com um líquido de limpeza abrasivo	-	A.3	Não crescente
Fixo	Sistema de Limpeza	barra de vacuo Ekra 5000;405 400 45 14	1	1	Desejável	Sujo	Impressão de pasta realizada incorretamente	Contaminação com fluxo de pasta; Limpeza incorreta da barra	-	A.1	Crescente
Fixo	Sistema de Limpeza	Fleece clamping Complete ;2255000266	1	3	Vital	Vareta empenada	Máquina bloqueada - Limpeza incorreta da tela; Erro na rotação de papel	Colocação incorreta do rolo de limpeza	-	A.3	Não crescente
						Vareta partida	Máquina bloqueada - Limpeza incorreta da tela; Erro na rotação de papel	Contaminação com fluxo de pasta; Limpeza incorreta da barra	-	A.3	Não crescente
Fixo	Sistema de Limpeza	Barra vácuo 400mm Ekra;4054005614	1	1	Desejável	Sujo	Impressão de pasta realizada incorretamente	Contaminação com fluxo de pasta; Limpeza incorreta da barra	-	A.1	Crescente

CAPÍTULO 5 | IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA

Tipo	Subconjunto	Componente	Função	Impacto na produção	Criticidade	Modo de falha	Efeito	Causas	Sintomas	Subcategoria	Função de risco
Fixo	Sistema de Limpeza	Barra vácuo 300mm Ekra;4054005520	1	1	Desejável	Sujo	Impressão de pasta realizada incorretamente	Contaminação com fluxo de pasta; Limpeza incorreta da barra	-	A.1	Crescente
Fixo	Sistema de Limpeza	Clamping Flange;4036000803	1	1	Desejável	-	-	-	-	-	-
Fixo	Sistema de Limpeza	Cylinder ADN-16-10-I-P-A-S2;5601040259	1	3	Vital	Veio empenado	Limpeza incorreta da tela	Impacto acidental	-	B.1	Não crescente
						Veio partido	Limpeza incorreta da tela	Impacto acidental	-	B.1	Não crescente
						O-ring deformado	Limpeza incorreta da tela; Erro na elevação da barra de vácuo	Desgaste	Alteração da pressão do ar	A.3	Crescente
Fixo	Sistema de Limpeza	Clamping Piece Serio 5000;4082000456	1	3	Vital	Empenado	Máquina bloqueada - Limpeza incorreta da tela; Erro na rotação de papel	Colocação incorreta do rolo de limpeza	-	A.3	Não crescente
						Partido	Máquina bloqueada - Limpeza incorreta da tela; Erro na rotação de papel	Colocação incorreta do rolo de limpeza	-	A.3	Não crescente
Fixo	Sistema de Limpeza	Roll complete with flange;2220140473	1	3	Vital	Partido	Máquina bloqueada - Limpeza incorreta da tela; Erro na rotação de papel	Colocação incorreta do rolo de limpeza	-	A.3	Não crescente
Fixo	Sistema de Limpeza	Suction hose;2299005870	1	3	Vital	Furado	Máquina parada; Erro de vácuo (Limpeza com aspiração)	Desgaste devido ao movimento do sistema de limpeza	Alteração da pressão do ar	A.3	Crescente
						Furado	Contaminação da máquina com líquido de limpeza (Limpeza sem aspiração)	Desgaste devido ao movimento do sistema de limpeza	-	B.3	Crescente
Fixo	Sistema de Limpeza	Metering valve for chemicals;5630000059	1	1	Desejável	Vedante deteriorado	Limpeza incorreta da tela - Não é aplicado líquido de limpeza	Desgaste; Contacto com o líquido de limpeza	Alteração do caudal do líquido	B.1	Crescente
						Entupido	Limpeza incorreta da tela - Não é aplicado líquido de limpeza	Acumulação de resíduos de pasta	Alteração do caudal do líquido	B.1	Crescente
Fixo	Sistema de Limpeza	válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417	1	1	Desejável	Danificado	Limpeza incorreta da tela - A barra de vácuo deixa de vibrar	Desgaste devido ao número elevado de comutações; Erro de dimensionamento	Alteração da vibração do sistema de limpeza	B.1	Crescente
Fixo	Sistema de Limpeza	válvula VUVG-B10-M52-RZT-F;573416	1	1	Desejável	Danificado	Limpeza incorreta da tela - A barra de vácuo deixa de vibrar	Desgaste devido ao número elevado de comutações	Alteração da vibração do sistema de limpeza	B.1	Crescente

Tipo	Subconjunto	Componente	Função	Impacto na produção	Criticidade	Modo de falha	Efeito	Causas	Sintomas	Subcategoria	Função de risco
Fixo	Sistema de Segurança	RELE FINDER DPDT,10A12V;182-9780	2	3	Vital	Queimado	Máquina bloqueada; Erro de emergência	Desgaste parcial ou total dos contactos	-	A.3	Crescente
Fixo	Sistema de Segurança	Gas spring AG3600350N/5;5062000167	2	0	Desejável	Vedante deteriorado	A porta não fica na posição aberta	Desgaste	Redução da pressão do gás e libertação do óleo de lubrificação	B.4	Crescente
Fixo	Sistema de Segurança	PSEN PILZ cs41, 5355000067;541109	2	3	Vital	Queimado	Máquina bloqueada; Erro de emergência	Sobreaquecimento; Sobretensão	-	A.3	Não crescente
Fixo	Sistema de Transporte	sensor ; 5355000004	3	3	Vital	Queimado	Máquina bloqueada - Não realiza a impressão de pasta; Erro de <i>home</i> de X da mesa	Sobreaquecimento; Sobretensão	-	A.3	Não crescente
Fixo	Sistema de Transporte	50.007.281 Motor controller ECOSTEP54-AA	1	3	Vital	Queimado	Máquina bloqueada; Erro de Can Bus ou Erro ao referenciar	Sobreaquecimento; Sobretensão	-	A.3	Não crescente
Fixo	Sistema de Transporte	top clamp 400mm; 4040008134	1	1	Desejável	Desgaste da aresta	Impressão de pasta realizada incorretamente	Desgaste devido ao contacto com o PCB	-	B.1	Crescente
Fixo	Sistema de Transporte	clamp;2299004171 / 2299003464	1	1	Desejável	Empenado	Impressão de pasta realizada incorretamente	Impacto acidental com o PCB ou na colocação do VarioGrid	-	B.1	Não crescente
Fixo	Sistema de Transporte	Chapiter ledge ;4054005685	1	3	Vital	Empenado	Máquina parada - O PCB não para na posição correta; Erro de transporte ou Erro de fiducial	Contaminação acidental com resíduos de pasta; Configuração incorreta do VarioGrid; Impacto acidental	-	A.3	Não crescente
Fixo	Sistema de Transporte	Round belt D=3mm L=679 mm;5011270288	1	3	Vital	Fissurado	Máquina parada - O PCB não é transportado; Erro de transporte	Desgaste na zona de junção	Alteração da vibração na zona dos roletes; Perda da proteção ESD	A.3	Crescente
						Sujo	Máquina parada - O PCB não é transportado; Erro de transporte	Contaminação acidental com resíduos de pasta	Alteração da vibração na zona dos roletes	A.3	Não crescente
						Partido	Máquina parada - O PCB não é transportado; Erro de transporte	Desgaste na zona de junção; O PCB fica encravado na correia devido à largura incorreta do transporte	Alteração da vibração na zona dos roletes	A.3	Crescente

Tipo	Subconjunto	Componente	Função	Impacto na produção	Criticidade	Modo de falha	Efeito	Causas	Sintomas	Subcategoria	Função de risco
Fixo	Sistema de Transporte	belt 12 x 690mm ;50012322	1	3	Vital	Fissurado	Máquina parada - O PCB não é transportado; Erro de transporte	Desgaste devido ao contacto com o PCB e com as guias laterais	Alteração da vibração na zona dos roletes; Perda da proteção ESD	A.3	Crescente
						Deformado	Máquina parada - O PCB não é transportado; Erro de transporte	Desgaste devido ao contacto com o PCB e com as guias laterais; O PCB fica encravado na correia devido à largura incorreta do transporte	Alteração da vibração na zona dos roletes	A.3	Crescente
						Partido	Máquina parada - O PCB não é transportado; Erro de transporte	Desgaste devido ao contacto com o PCB e com as guias laterais; O PCB fica encravado na correia devido à largura incorreta do transporte	Alteração da vibração na zona dos roletes	A.3	Crescente
Fixo	Sistema de Transporte	Shaft;4036000715	1	3	Vital	Empenado	Máquina parada - O PCB fica solto; Erro de transporte ou Erro de fiducial	Impacto acidental	-	A.3	Não crescente
						Partido	Máquina parada - O PCB sai da posição correta; Erro de transporte ou Erro de fiducial	Impacto acidental	-	A.3	Não crescente
Fixo	Sistema de Transporte	Underride Guard;4040017309	1	0	Desejável						
Fixo	Sistema de Transporte	Proportional Pressure Regulator;542234	1	3	Vital	Fuga de ar	Máquina parada - O PCB sai da posição correta; Erro de transporte ou Erro de fiducial	Desgaste	Alteração da pressão do ar	A.3	Crescente
Fixo	Sistema de Transporte	Clamping Blade;4054005188	1	1	Desejável	Desgaste da aresta	Impressão de pasta realizada incorretamente	Desgaste devido ao contacto com o PCB	-	B.1	Crescente
Fixo	Sistema de Transporte	Washer antistatic white;4030000561	1	0	Desejável						
Fixo	Sistema de Transporte	Round belt D=3mm L=2246mm;5011270287	1	3	Vital	Fissurado	Máquina parada - O PCB não é transportado; Erro de transporte	Desgaste na zona de junção	Alteração da vibração na zona dos roletes; Perda da proteção ESD	A.3	Crescente
						Sujo	Máquina parada - O PCB não é transportado; Erro de transporte	Contaminação acidental com resíduos de pasta	Alteração da vibração na zona dos roletes	A.3	Não crescente

Tipo	Subconjunto	Componente	Função	Impacto na produção	Criticidade	Modo de falha	Efeito	Causas	Sintomas	Subcategoria	Função de risco
						Partido	Máquina parada - O PCB não é transportado; Erro de transporte	Desgaste na zona de junção; O PCB fica encravado na correia devido à largura incorreta do transporte	Alteração da vibração na zona dos roletes	A.3	Crescente
Fixo	Sistema de Transporte	Synchronous belt 10AT3/150;501110 0289	1	3	Vital	Fissurado	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Desgaste	Alteração da tensão; Alteração da vibração na zona dos roletes; Perda da proteção ESD	A.3	Crescente
						Deformado	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Desgaste	Alteração da tensão; Alteração da vibração na zona dos roletes	A.3	Crescente
						Partido	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Desgaste	Alteração da tensão; Alteração da vibração na zona dos roletes	A.3	Crescente
Fixo	Sistema de Transporte	Synchronous belt 6AT3/1011;501110 0407	1	3	Vital	Fissurado	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Desgaste	Alteração da tensão; Alteração da vibração na zona dos roletes; Perda da proteção ESD	A.3	Crescente
						Deformado	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Desgaste	Alteração da tensão; Alteração da vibração na zona dos roletes	A.3	Crescente
						Partido	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Desgaste	Alteração da tensão; Alteração da vibração na zona dos roletes	A.3	Crescente
Fixo	Sistema de Transporte	Synchronous belt 10T2,5/120;50111 00177	1	3	Vital	Fissurado	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Desgaste	Alteração da tensão; Alteração da vibração na zona dos roletes; Perda da proteção ESD	A.3	Crescente
						Deformado	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Desgaste	Alteração da tensão; Alteração da vibração na zona dos roletes	A.3	Crescente
						Partido	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Desgaste	Alteração da tensão; Alteração da vibração na zona dos roletes	A.3	Crescente
Fixo	Sistema de Transporte	Motor with spindle;229900410 9	1	3	Vital	Condutor partido	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Desgaste resultante do movimento do cabo	-	A.3	Crescente

Tipo	Subconjunto	Componente	Função	Impacto na produção	Criticidade	Modo de falha	Efeito	Causas	Sintomas	Subcategoria	Função de risco
Fixo	Sistema de Transporte	Motor 23S21-0250-0000;5310000036	3	3	Vital	Queimado	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Sobreaquecimento; Sobretensão	-	A.3	Não crescente
						Rolamentos danificados	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Desgaste; Lubrificação incorreta do eixo do motor	Alteração da vibração; Aumento da temperatura	A.3	Crescente
						Enrolamentos danificados	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Sobreaquecimento; Sobretensão	-	A.3	Não crescente
Fixo	Sistema de Transporte	Synchronous belt 10T2,5/145;5011100197	1	3	Vital	Fissurado	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Desgaste	Alteração da tensão; Alteração da vibração na zona dos roletes; Perda da proteção ESD	A.3	Crescente
						Deformado	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Desgaste	Alteração da tensão; Alteração da vibração na zona dos roletes	A.3	Crescente
						Partido	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Desgaste	Alteração da tensão; Alteração da vibração na zona dos roletes	A.3	Crescente
Fixo	Sistema de Transporte	Diffuse sensor w/2 lightspots;5355400166	1	3	Vital	Sensor queimado	Máquina parada - O PCB não é transportado; Erro de transporte	Sobreaquecimento; Sobretensão	-	A.3	Não crescente
						Cabo de alimentação e de transmissão de dados danificado	Máquina parada - O PCB não é transportado; Erro de transporte	Desgaste devido ao contacto com peças móveis	-	A.3	Crescente
Fixo	Sistema de Transporte	Synchronous belt 6AT3/816;5011100218	1	3	Vital	Fissurado	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Desgaste	Alteração da tensão; Alteração da vibração na zona dos roletes; Perda da proteção ESD	A.3	Crescente
						Deformado	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Desgaste	Alteração da tensão; Alteração da vibração na zona dos roletes	A.3	Crescente
						Partido	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Desgaste	Alteração da tensão; Alteração da vibração na zona dos roletes	A.3	Crescente

Tipo	Subconjunto	Componente	Função	Impacto na produção	Criticidade	Modo de falha	Efeito	Causas	Sintomas	Subcategoria	Função de risco
Fixo	Sistema de Transporte	Synchronizing disc AT3 Z 18;4090000137	1	3	Vital	Encaixe do veio deformado	Máquina parada - O PCB não chega ao <i>stopper</i> ; Erro de transporte	Desgaste	Alteração da vibração	A.3	Crescente
Fixo	Sistema de Transporte Sistema de Limpeza	50.007.281 Motor controller ECOSTEP54-AA	1	3	Vital	Queimado	Máquina bloqueada; Erro de Can Bus ou Erro ao referenciar	Sobreaquecimento; Sobretenção	-	A.3	Não crescente
Móvel	Sistema de VarioGrid	Válvula Bosch (0820031026);0820.031.061	1	1	Desejável	O-ring danificado	Impressão de pasta realizada incorretamente - PCB sem suporte	Desgaste	Alteração da pressão do ar	B.1	Crescente
Fixo	Unidade da Câmara	sensor 5355000001;NJ1,5-8GM40-E2-V3	3	3	Vital	Queimado	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar o eixo da câmara	Sobreaquecimento; Sobretenção	-	A.3	Não crescente
Fixo	Unidade da Câmara	PINO AÇO BCW TEMPBATEKTE EKRA	3	3	Vital	Partido	Máquina parada - O PCB não para na posição correta; Erro de transporte ou Erro de fiducial	Impacto accidental com o PCB	-	A.3	Não crescente
						Indentado	Máquina parada - Levanta o PCB quando sobe; Erro de fiducial	Desgaste por contacto com o PCB	-	A.3	Crescente
Fixo	Unidade da Câmara	Retrofitkit camera cable;2053001074	3	3	Vital	Cabo partido	Máquina parada - Câmara sem imagem; Erro de fiducial	Desgaste gerado pelas calhas móveis	-	A.3	Crescente
Fixo	Unidade da Câmara	Stop pin;4039000907	3	3	Vital	Partido	Máquina parada - O PCB não para na posição correta; Erro de transporte ou Erro de fiducial	Impacto accidental com o PCB	-	A.3	Não crescente
						Indentado	Máquina parada - Levanta o PCB quando sobe; Erro de fiducial	Desgaste por contacto com o PCB	-	A.3	Crescente
Fixo	Unidade da Câmara	Dispensing plate;4052009652	3	3	Vital	Empenado	Máquina bloqueada; Erro de verificação do ponto de cola e/ou Erro na verificação da largura do transporte	Manuseamento incorreto; Impacto accidental	-	A.3	Não crescente

Tipo	Subconjunto	Componente	Função	Impacto na produção	Criticidade	Modo de falha	Efeito	Causas	Sintomas	Subcategoria	Função de risco
Fixo	Unidade da Câmara	Cylinder Ekra (5601040262);CDU JB10-25D	3	3	Vital	Veio empenado	Máquina parada - Bloqueio do movimento da câmara; Erro no <i>stopper</i>	Impacto acidental	-	A.3	Não crescente
						O-ring deformado	Máquina parada - O PCB não para na posição correta; Erro de transporte ou Erro de fiducial	Desgaste	Alteração da pressão do ar	A.3	Crescente
						Partido	Máquina parada - Bloqueio do movimento da câmara; Erro no <i>stopper</i>	Impacto acidental	-	A.3	Não crescente
Fixo	Unidade da Câmara	Sensor inductive;5355000064	1	3	Vital	Queimado	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar o eixo da câmara	Sobreaquecimento; Sobretenção	-	A.3	Não crescente
Fixo	Unidade da Câmara	Digital Camera Cable 38m;5360000896	1	3	Vital	Cabo partido	Máquina parada - Câmara sem imagem; Erro de fiducial	Desgaste gerado pelas calhas móveis	-	A.3	Crescente
Fixo	Unidade de Elevação	5382000119 Motor controller ECOVARIO 114	3	3	Vital	Queimado	Máquina bloqueada; Erro de Can Bus ou Erro ao referenciar	Sobreaquecimento; Sobretenção	-	A.3	Não crescente
Fixo	Unidade de Elevação	Motor 23S21-0250-0000;5310000036	3	3	Vital	Queimado	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Sobreaquecimento; sobretenção	-	A.3	Não crescente
						Rolamentos danificados	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Desgaste; Lubrificação incorreta do eixo do motor	Alteração da vibração; Aumento da temperatura	A.3	Crescente
						Enrolamentos danificados	Máquina bloqueada; Erro ao referenciar	Sobreaquecimento; sobretenção	-	A.3	Não crescente
Fixo	Unidade de Elevação Unidade da Câmara Unidade de Raspador	Magnetic tape;5028000078	3	3	Vital	Arranhado	Máquina bloqueada; Erro de posicionamento do eixo	Scanner móvel desajustado; contacto acidental com objetos	-	A.3	Não crescente
Fixo	Unidade de Raspador	par abas inox DIR+ESQ /espatula; 0001230	3	1	Essencial	Empenado	Impressão de pasta realizada incorretamente	Queda; Embate durante o processo de limpeza; Manuseamento incorreto na instalação	-	B.1	Não crescente

Tipo	Subconjunto	Componente	Função	Impacto na produção	Criticidade	Modo de falha	Efeito	Causas	Sintomas	Subcategoria	Função de risco
Fixo	Unidade de Raspador	Shim ring DIN988-12-18-2;5052000156	3	1	Essencial	-	-	-	-	-	-
Fixo	Unidade de Raspador	Proportional Pressure Regulator;542234	3	3	Vital	Fuga de ar	Máquina parada - Impressão de pasta realizada incorretamente; Erro de pressão da raquetele	Desgaste	Alteração da pressão do ar	A.3	Crescente
Fixo	Unidade de Raspador	Support bar right;4054006662	3	1	Essencial	Partido	Não é possível iniciar a produção - Raquetele sem suporte	Colocação incorreta da raquetele	-	A.0	Não crescente
Fixo	Unidade de Raspador	Support bar left;4054006661	3	1	Essencial	Partido	Não é possível iniciar a produção - Raquetele sem suporte	Colocação incorreta da raquetele	-	A.0	Não crescente

A Tabela 42 apresenta o número e a percentagem de modos de falha tendo em conta a categoria, a subcategoria e o comportamento da função de risco.

Tabela 42 – Quantidade de modos de falha por categoria e por subcategoria (máquinas Ekra Serio 5000).

Subcategoria	Função de risco	Quantidade		Total	
		Un.	%	Un.	%
A.0 – Causa perdas financeiras moderadas ou ligeiras	Crescente	0	0	2	1,7
	Não crescente	2	1,7		
A.1 – Causa perdas elevadas de qualidade	Crescente	3	2,6	3	2,6
	Não crescente	0	0		
A.2 – Causa redução significativa do desempenho	Crescente	1	0,9	3	2,6
	Não crescente	2	1,7		
A.3 – Causa a paragem súbita do equipamento	Crescente	49	42,2	88	75,9
	Não crescente	39	33,6		
A.4 – Tem impacto adverso na segurança ou ambiente	Crescente	0	0	0	0
	Não crescente	0	0		
Categoria A – Falha evidente	Crescente	53	45,7	96	82,8
	Não crescente	43	37,1		
B.0 – Contribui para originar modos de falha da subcategoria A.0	Crescente	0	0	0	0
	Não crescente	0	0		
B.1 – Contribui para originar modos de falha da subcategoria A.1	Crescente	7	6,0	11	9,5
	Não crescente	4	3,4		
B.2 – Contribui para originar modos de falha da subcategoria A.2	Crescente	7	6,0	7	6,0
	Não crescente	0	0		
B.3 – Contribui para originar modos de falha da subcategoria A.3	Crescente	1	0,9	1	0,9
	Não crescente	0	0		
B.4 – Afeta dispositivos de segurança e/ou contribui para originar modos de falha da subcategoria A.4	Crescente	1	0,9	1	0,9
	Não crescente	0	0		
Categoria B – Falha oculta	Crescente	16	13,8	20	17,2
	Não crescente	4	3,4		
Total	Crescente	69	59,5	116	100
	Não crescente	47	40,5		

De acordo com a Tabela 42, 75,9% dos 116 modos de falha identificados pertencem à subcategoria “A.3 – Causa a paragem súbita do equipamento”. No entanto, na maioria dos casos, a paragem ou o bloqueio do equipamento são motivados pela ocorrência de erros do sistema que controla o seu funcionamento. Estes erros verificam-se quando determinados componentes deixam de desempenhar corretamente a

sua função, contribuindo assim para evidenciar a ocorrência dos seus modos de falha. Por este motivo, os modos de falha da Categoria B representam somente 17,2% do número total.

O modo de falha “Furado” associado ao “Suction hose;2299005870” pertence à subcategoria A.3, quando a limpeza a vácuo está ativa, e à subcategoria B.3, se estiver inativa. Por isso, este modo de falha foi contabilizado em ambas as subcategorias.

A classificação da subcategoria dos modos de falha foi realizada com base na descrição do respetivo efeito. O efeito foi caracterizado de forma a evidenciar o impacto do modo de falha ao nível da máquina. Neste campo, também se procurou especificar de que forma a função (principal ou secundária) da máquina é afetada e o tipo de mensagem de erro que é exibida após a ocorrência do modo de falha. Futuramente, esta informação poderá integrar listas predefinidas no CMMS, destinadas a auxiliar o registo de falhas do equipamento.

A Tabela 42 também mostra que 59,5% dos modos de falha identificados têm uma função de risco crescente. Esta situação deve-se ao facto de a maioria dos tipos de componentes considerados na análise estarem sujeitos a fenómenos de desgaste, visto que desempenham uma função mecânica. Os modos de falha com função de risco não crescente estão sobretudo associados aos componentes eletrónicos. Contudo, também foram identificados modos de falha cuja ocorrência é motivada por acidentes ou erros humanos (ex.: impacto acidental e manuseamento incorreto). O comportamento da função de risco foi identificado tendo em conta a informação resultante da análise das causas do modo de falha.

Os componentes “Support bar right;4054006662” e “Support bar left;4054006661” associados à Unidade de Raspador são os únicos que têm associados modos de falha não críticos. Em geral, o modo de falha atribuído a estes componentes (“partido”) ocorre acidentalmente, quando se procede à substituição da lâmina da raquetele. A substituição é realizada durante a paragem planeada, destinada a configurar o equipamento para iniciar o fabrico de outro produto (mudança de produção). Assim, considera-se que este modo de falha pertence à subcategoria “A.0 – Causa perdas financeiras moderadas ou ligeiras” e tem função de risco não crescente.

No total, foram identificados 54 modos de falha com função de risco crescente e pertencentes às subcategorias que são contempladas na análise da viabilidade da MPC (A.1, A.2, A.3, A.4 e B.4). Porém, foram excluídos desta análise 10 modos de falha relativos a componentes móveis e 11 modos de falha associados a componentes fixos para os quais não foram identificados sintomas. Com base nesta análise, também se identificaram 2 modos de falha, pertencentes à subcategoria B.1, para os quais se considera relevante a aplicação de uma TD utilizando sensores. Desta forma, foi obtida uma lista composta por 35

modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores. Estes modos de falha pertencem a um conjunto de 18 tipos de componentes, dos quais 15 são “Vitais” e 3 são “Desejáveis”.

5.4.3. Atribuição da política de manutenção

Para associar uma política de manutenção aos modos de falha identificados na subsecção 5.4.2 (Tabela 41), procurou-se aplicar as árvores de decisão AD1 e AD2. Na atribuição da política, foi considerado o comportamento da função de risco (crescente ou não crescente) e a subcategoria, com vista a identificar a árvore de decisão aplicável e as políticas recomendadas. No entanto, devido à inexistência de dados suficientes para realizar as estimativas dos custos associados às políticas de manutenção, sempre que essa informação foi requerida na árvore de decisão AD2, a decisão foi tomada tendo em conta uma análise conjunta dos seguintes critérios:

- “Frequência” de substituição do componente;
- “Tempo de paragem” requerido para substituir o componente ao qual está associado o modo de falha considerado;
- “Complexidade da TI”, somente nos casos em que é recomendada e aplicável/eficaz;
- “ C_{pS} ” (custo de aquisição da peça sobressalente).

A “Frequência” corresponde ao número médio anual de substituições associado a cada tipo de componente. O número de substituições foi obtido a partir dos registos de consumos realizados no SAP e diz respeito a todas as substituições do componente ocorridas nas 27 máquinas Ekra Serio 5000 contempladas no estudo. Com base nestes registos, é possível determinar quantas vezes um tipo específico de componente foi substituído em cada máquina, identificar o tipo de ação realizada no equipamento (corretiva ou preventiva) e a data de substituição. Porém, no caso dos tipos de componentes que se encontram em duas ou mais posições do equipamento, o registo não identifica a posição. Salienta-se ainda que, em alguns casos, se verificou que o tipo de ação realizada não foi registado corretamente.

A informação relativa ao número de substituições é considerada útil, visto que as máquinas Ekra Serio 5000 têm um histórico de funcionamento significativo. O período de atividade das 27 máquinas varia entre os 1,9 e os 4,4 anos, até 31 de dezembro de 2020 (Tabela 40). Contudo, os registos de manutenção não permitem determinar o número de ocorrências de cada modo de falha. Assim, nas situações em que um tipo de componente tem associados dois ou mais modos de falha, assumiu-se que todos contribuíram de forma idêntica para a necessidade de substituir o componente.

De uma forma geral, verifica-se que o número de substituições efetuadas é reduzido. No total, foram realizadas 348 substituições, o que corresponde à média de 4,35 substituições por tipo de componente analisado e à média de 12,89 substituições por máquina. Além disso, todos os componentes têm uma média inferior a 2 substituições por máquina.

Na maioria dos casos, o tempo de paragem do equipamento foi estimado com base na experiência, devido à ausência de registos de falhas que envolveram a substituição dos tipos de componentes considerados na análise. No entanto, o tempo de paragem relativo a 5 dos 80 tipos de componentes corresponde ao valor médio da duração de todas paragens verificadas devido à ocorrência da falha do componente.

Para facilitar a análise conjunta dos diferentes critérios na associação da política aos modos de falha com função de risco crescente, das subcategorias A.1, A.2, A.3 e B.4, definiu-se uma matriz de decisão (Tabela 43). A matriz é utilizada em substituição das estimativas do custo das políticas aplicáveis, durante a aplicação do segundo e do terceiro ramos da AD2 (Figura 48).

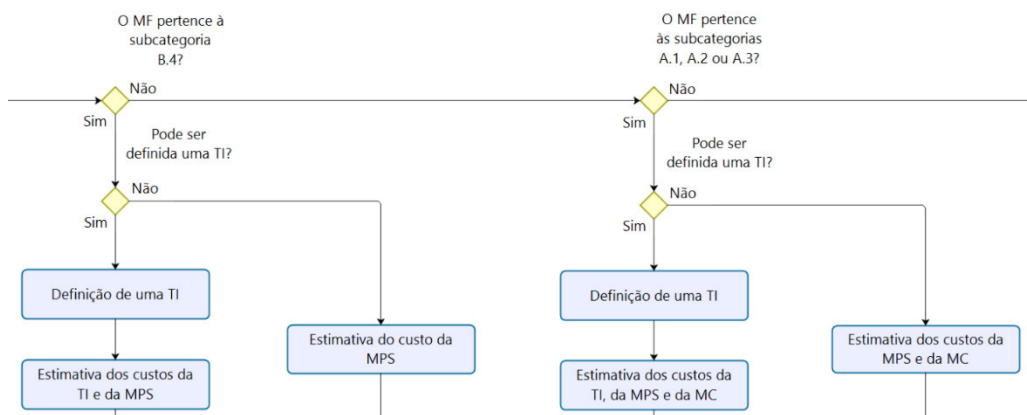


Figura 48 – Extrato do segundo e do terceiro ramos da árvore de decisão AD2.

Cada critério tem associados três níveis (Baixo, Médio e Elevado). Na Tabela 44, são especificados os limites estabelecidos pela empresa para os níveis dos critérios. A “Complexidade da TI” foi avaliada de forma qualitativa ao nível do modo de falha, tendo em conta o tempo requerido e as competências necessárias para a sua realização.

Os níveis dos critérios “Frequência” e “Tempo de paragem” são sempre contemplados na tomada de decisão. Nos casos em que a execução da TI envolve o risco de danificar o componente e/ou o equipamento, considerou-se que não é aplicável. O “ C_{ps} ” é tido em conta nos casos em que a informação relativa aos critérios precedentes é considerada insuficiente. A utilização deste critério visa evitar a atribuição da MPS, quando o seu custo é elevado devido ao custo do componente.

Tabela 43 – Matriz de seleção da política de manutenção.

Critérios				Subcategorias		
				A.1, A.2 e A.3	B.4	
Frequência	Tempo de paragem	Complexidade da TI	C_{ps}	Política proposta	Política proposta	
Elevada	Elevado	-	-	Ação de melhoria	Ação de melhoria	
	Médio	-	Elevado ou Médio	Ação de melhoria	Ação de melhoria	
			Baixo	MPS	MPS	
	Baixo	-	Elevado ou Médio	Ação de melhoria	Ação de melhoria	
Baixo			MPS	MPS		
Média	Elevado	Elevada	Elevado ou Médio	Ação de melhoria	Ação de melhoria	
			Baixo	MPS	MPS	
		Média	Elevado ou Médio	Ação de melhoria	Ação de melhoria	
			Baixo	MPS	MPS	
		Baixa	Elevado ou Médio	Ação de melhoria	Ação de melhoria	
			Baixo	TI	TI	
		Não é aplicável/eficaz	Elevado ou Médio	Ação de melhoria	Ação de melhoria	
			Baixo	MPS	MPS	
	Médio	Elevada	Elevado ou Médio	Ação de melhoria	Ação de melhoria	
			Baixo	MPS	MPS	
		Média	Elevado ou Médio	Ação de melhoria	Ação de melhoria	
			Baixo	MPS	MPS	
		Baixa	Elevado ou Médio	Ação de melhoria	Ação de melhoria	
			Baixo	TI	TI	
		Não é aplicável/eficaz	Elevado ou Médio	Ação de melhoria	Ação de melhoria	
			Baixo	MPS	MPS	
	Baixo	-	Elevado ou Médio	Ação de melhoria	Ação de melhoria	
			Baixo	MPS	MPS	
	Baixa	Elevado	Elevada	-	MPS ou TI ⁽¹⁾	MPS ou TI ⁽¹⁾
			Média	-	TI	TI
Baixa			-	TI	TI	
Não é aplicável/eficaz			Elevado ou Médio	MC	MPS	
		Baixo	MPS	MPS		
Médio		Elevada	-	MC	MPS	
		Média	-	TI	TI	
		Baixa	-	TI	TI	
		Não é aplicável/eficaz	-	MC	MPS	
Baixo		Elevada	-	MC	MPS	
		Média	-	MC	TI	
		Baixa	-	TI	TI	
		Não é aplicável/eficaz	-	MC	MPS	

⁽¹⁾ Se o número de substituições for igual a 0, recomenda-se a aplicação da TI.

Tabela 44 – Níveis dos critérios de seleção da política de manutenção.

Nível	Frequência/ano	Tempo de paragem (min)	Complexidade da TI	C_{ps} (€)
Elevado	> 4	> 90	Elevada	> 1500
Médio	2 – 4	30 – 90	Média	300 – 1500
Baixo	≤ 1	< 30	Baixa	< 300

A utilização da matriz visa selecionar a política que tem associado o custo mais reduzido. Cada coluna representa um ramo específico da árvore de decisão AD2. Por este motivo, a MC só é considerada na coluna relativa aos modos de falha das subcategorias A.1, A.2 e A.3.

Na elaboração da matriz, foram ainda tidos em conta os seguintes pressupostos gerais:

- A MC não é vantajosa financeiramente, quando a “Frequência” é Média ou Elevada, devido aos elevados custos de falha que seriam gerados num período relativamente curto.
- Caso seja considerada eficaz, a TI é mais vantajosa do que a MPS e do que a MC, quando a sua complexidade é Baixa e a “Frequência” é Baixa ou Média, visto que permitirá que o componente seja utilizado até estar próximo do fim do seu tempo de vida, evitando a falha, e as inspeções serão pouco frequentes;
- A TI não é vantajosa, quando a “Frequência” é Elevada, ou quando a “Frequência” é Média e o “Tempo de paragem” é Baixo, devido à elevada frequência de inspeção que seria requerida;
- Os custos de manutenção não são aceitáveis, quando a “Frequência” é Elevada e o “Tempo de paragem” é Elevado, ou quando a “Frequência” é Média ou Elevada e o “ C_{ps} ” é Médio ou Elevado.

Na aplicação da matriz, o nível do critério “Frequência” foi facilmente identificado, com base na informação relativa ao número de substituições. Tendo em conta que o tipo de componente que tem associado o maior número de substituições, foi substituído, em média, 0,57 vezes por ano, considerou-se que a “Frequência” de substituição de todos os tipos de componentes considerados é Baixa, visto que não excede 1 unidade/ano. A utilização do valor médio permite evitar conclusões incorretas, devido a possíveis erros na atribuição dos consumos ao equipamento.

No formulário “F2 – Política de manutenção” (Tabela 45), foi registada a política de manutenção atual, a política de manutenção proposta para cada modo de falha, o número de substituições de cada tipo de componente (tendo conta o subconjunto ao qual se encontra associado), o “Tempo de paragem”, a “Complexidade da TI” e o “ C_{ps} ”. A política de manutenção atual foi definida ao nível do componente e, no caso dos subconjuntos móveis, ao nível do subconjunto. No Apêndice VII, são apresentadas descrições das políticas de manutenção atuais e explicadas as decisões tomadas no âmbito da atribuição das políticas propostas.

Tabela 45 – Formulário “F2 – Política de manutenção” (máquinas Ekra Serio 5000).

Ekra Serio 5000											
Tipo	Subconjunto	Componente	Modo de falha	Subcategoria	Função de risco	Política atual	Política proposta	Número de substituições	Tempo de paragem (min)	Complexidade da TI	C_{ps} (€)
Móvel	Dispensador de Pasta de Solda	O-ring TSD 1400 - 10B; 502612005	Deformado	B.2	Crescente	MC	TD	0	2		8,68
Móvel	Dispensador de Pasta de Solda	vedante;4030000550	Deteriorado	B.2	Crescente		TD	1	2		15,98
Móvel	Dispensador de Pasta de Solda	Dosing piston;4039001032	Entupido	B.2	Crescente		TD	13	2		123,29
Móvel	Dispensador de Pasta de Solda	Nozzle, d = 12mm;4039001051	Entupido	B.2	Crescente		TD	3	2		88,74
Móvel	Dispensador de Pasta de Solda	Closing unit paste dispenser;4056002530	Sujo	B.2	Crescente		TD	1	10		317,13
Fixo	Dispensador de Pasta de Solda	Hight knurled screw;5050000107	Sujo	B.2	Crescente	MC	TD	1	10		3,83
Fixo	Dispensador de Pasta de Solda	Motor 23S21-0250-0000;5310000036	Queimado	A.3	Não crescente	MC	MC	0	30	Não é aplicável	221,00
			Rolamentos danificados	A.3	Crescente		MC				
			Enrolamentos danificados	A.3	Não crescente		MC				
Fixo	Dispensador de Pasta de Solda	High knurled screw;5050000785	Sujo	B.2	Crescente	MC	TD	0	10		2,04
Móvel	iPAG	O-RING; 4.5 X 1.5	Deformado	A.3	Crescente	Na máquina:	TI	1	25	Baixa	0,17
Móvel	iPAG	O-RING; 3.5 X 2	Deformado	A.3	Crescente		TI	2	25	Baixa	0,73

Legenda

Número de substituições igual 0

Número de substituições superior a 0 e inferior a 5

Número de substituições igual ou superior a 5



CAPÍTULO 5 | IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA

Tipo	Subconjunto	Componente	Modo de falha	Subcategoria	Função de risco	Política atual	Política proposta	Número de substituições	Tempo de paragem (min)	Complexidade da TI	C _{ps} (€)	
Móvel	iPAG	Push-in L-fitting - QSML-M3-3 153330	Entupido	A.3	Não crescente	MPC - Inspeção visual e limpeza (Semanal)	MC	2	15		1,86	
			Partido	A.3	Não crescente		MC					
Móvel	iPAG	Cartridge adapter, complete 2299001178	Entupido	A.3	Crescente	Fora da máquina: MPC - Inspeção visual e limpeza (Mensal)	TI	0	25	Baixa	93,89	
Móvel	iPAG	Connection Plug KS1; 5673000247	Partido	A.3	Não crescente		MC	0	15			5,10
Móvel	iPAG	jet-kabel 12pol;2444000099	Partido	A.3	Crescente		TI	2	240	Baixa		199,72
Móvel	iPAG	Nozzle 06mm to iPAG Jet;5900001047	Empenado	A.3	Não crescente		MC	43	25		Baixa	390,15
			Entupido	A.3	Crescente		TI					
Móvel	iPAG	O-ring Heating - iPAG Jet;5026120077	Fissurado	A.3	Crescente		TI	6	25	Baixa		4,81
Móvel	iPAG	O-ring Tappet - iPAG Jet;5026120084	Deformado	A.3	Crescente		TI	30	25	Baixa		2,64
Móvel	iPAG	Luerlock contra-angle adapter;5900001056	Entupido	A.3	Crescente		TI	2	25	Baixa		253,65
Móvel	iPAG	O-ring; 12x2	Deformado	A.3	Crescente		TI	1	25	Baixa		0,57
Móvel	iPAG	Mounting pin For iPAG-Jet;4035000337	Partido	A.3	Não crescente		MC	2	15			38,72
Móvel	iPAG	iPAG dispensing cup;8012900049	-	-	-		MC	3	2			2,13
Móvel	iPAG	Cable FDCY 4x014mm w/shield;5361000004	Cabo partido	A.3	Crescente		TI	1	240	Baixa		3,83
Fixo	Sistema de Controlo Elétrico	fonte PULS 36-42V, 133A; 670-0670	Queimado	A.3	Não crescente		MC	MC	1	30		216,72
Fixo	Sistema de Controlo Elétrico	Power Supply 60V/10ASWS600L60;5321000080	Queimado	A.3	Não crescente		MC	MC	8	60		504,63
Fixo	Sistema de Controlo Elétrico	Scanner Datalogic D9531-HP;5399000453	Lente danificada	A.2	Não crescente	MC	MC	3	30	Média	248	
			Fio danificado	A.2	Crescente		TI					
Fixo	Sistema de Controlo Elétrico	monitor;ProLite T2253MTS-B5 (B1)	Touch danificado	A.2	Não crescente	MC	Ação de melhoria	14	20		220,00	
Fixo	Sistema de Controlo Elétrico	Power Supply PULS CPS20361;5321000071	Queimado	A.3	Não crescente	MC	MC	1	30		345,35	

CAPÍTULO 5 | IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA

Tipo	Subconjunto	Componente	Modo de falha	Subcategoria	Função de risco	Política atual	Política proposta	Número de substituições	Tempo de paragem (min)	Complexidade da TI	C_{ps} (€)
Fixo	Sistema de Controlo Elétrico	Pack baterias RBC48;689-9058	Descarregado	A.3	Crescente	MPS (Triannual)	TI	10	30	Baixa	81,25
Fixo	Sistema de Limpeza	Solvent container : 5900000011	Partido	A.3	Não crescente	MC	MC	1	60		69,86
Fixo	Sistema de Limpeza	barra de vacuo Ekra 5000;405 400 45 14	Sujo	A.1	Crescente	MC (Limpeza trimestral)	TI	2	20	Baixo	289,25
Fixo	Sistema de Limpeza	Fleece clamping Complete ;2255000266	Vareta empenada	A.3	Não crescente	MC	MC	5	15		468,18
			Vareta partida	A.3	Não crescente		MC				
Fixo	Sistema de Limpeza	Barra vácuo 400mm Ekra;4054005614	Sujo	A.1	Crescente	MC (Limpeza trimestral)	TI	3	20	Baixa	289,25
Fixo	Sistema de Limpeza	Barra vácuo 300mm Ekra;4054005520	Sujo	A.1	Crescente	MC (Limpeza trimestral)	TI	2	20	Baixa	289,25
Fixo	Sistema de Limpeza	Clamping Flange;4036000803	-	-	-	MC	MC	0	10		82,59
Fixo	Sistema de Limpeza	Cylinder ADN-16-10-I-P-A-S2;5601040259	Veio empenado	B.1	Não crescente	MC	TD	0	90		63,24
			Veio partido	B.1	Não crescente		TD				
			O-ring deformado	A.3	Crescente		MC				
Fixo	Sistema de Limpeza	Clamping Piece Serio 5000;4082000456	Empenado	A.3	Não crescente	MC	MC	1	10		103,53
			Partido	A.3	Não crescente		MC				
Fixo	Sistema de Limpeza	Roll complete with flange;2220140473	Partido	A.3	Não crescente	MC	MC	1	10		78,71
Fixo	Sistema de Limpeza	Suction hose;2299005870	Furado	A.3	Crescente	MPC - Inspeção visual (Trimestral)	TI	3	45	Baixa	39,95
			Furado	B.3	Crescente		TD				
Fixo	Sistema de Limpeza	Metering valve for chemicals;5630000059	Vedante deteriorado	B.1	Crescente	MC	TD	1	30		151,24
			Entupido	B.1	Crescente		TD				
Fixo	Sistema de Limpeza	válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417	Danificado	B.1	Crescente	MC	TD	28	15		15,30
Fixo	Sistema de Limpeza	válvula VUVG-B10-M52-RZT-F;573416	Danificado	B.1	Crescente	MC	TD	0	15		14,55

CAPÍTULO 5 | IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA

Tipo	Subconjunto	Componente	Modo de falha	Subcategoria	Função de risco	Política atual	Política proposta	Número de substituições	Tempo de paragem (min)	Complexidade da TI	C_{ps} (€)
Fixo	Sistema de Segurança	RELE FINDER DPDT,10A12V;182-9780	Queimado	A.3	Crescente	MC	MC	1	15	Não é aplicável	5,22
Fixo	Sistema de Segurança	Gas spring AG3600350N/5;5062000167	Vedante deteriorado	B.4	Crescente	MPC - Inspeção visual e teste manual (Mensal)	TI	2	20	Baixa	70,98
Fixo	Sistema de Segurança	PSEN PILZ cs41, 5355000067;541109	Queimado	A.3	Não crescente	MPC - Inspeção (Mensal)	MC	1	25		85,05
Fixo	Sistema de Transporte	sensor ; 5355000004	Queimado	A.3	Não crescente	MC	MC	1	25		52,50
Fixo	Sistema de Transporte	50.007.281 Motor controller ECOSTEP54-AA	Queimado	A.3	Não crescente	MC	MC	0	120		1134,00
Fixo	Sistema de Transporte	top clamp 400mm; 4040008134	Desgaste da aresta	B.1	Crescente	MPC - Inspeção visual (Trimestral)	TD	0	10		16,47
Fixo	Sistema de Transporte	clamp;2299004171 / 2299003464	Empenado	B.1	Não crescente	MPC - Inspeção visual (Mensal)	TD	17	10		190,40
Fixo	Sistema de Transporte	Chapiter ledge ;4054005685	Empenado	A.3	Não crescente	MPC - Inspeção visual (Trimestral)	MC	1	60		961,20
Fixo	Sistema de Transporte	Round belt D=3mm L=679 mm;5011270288	Fissurado	A.3	Crescente	MPC - Inspeção visual (Trimestral); MPC - Medição da resistividade (Anual)	TI	7	23 ⁽¹⁾	Baixa	
			Sujo	A.3	Não crescente		MC				
			Partido	A.3	Crescente		TI				
Fixo	Sistema de Transporte	belt 12 x 690mm ;50012322	Fissurado	A.3	Crescente	MPC - Inspeção visual (Trimestral); MPC - Medição da resistividade (Anual)	TI	40	46,75 ⁽¹⁾	Baixa	50,65
			Deformado	A.3	Crescente		TI				
			Partido	A.3	Crescente		TI				
Fixo	Sistema de Transporte	Shaft;4036000715	Empenado	A.3	Não crescente	MC	MC	1	40		48,70
			Partido	A.3	Não crescente		MC				
Fixo	Sistema de Transporte	Underride Guard;4040017309	-	-	-	MC	MC	4	20		57,88
Fixo	Sistema de Transporte	Proportional Pressure Regulator;542234	Fuga de ar	A.3	Crescente	MPC - Calibração (Anual)	TI	0	80	Média	190,24

Tipo	Subconjunto	Componente	Modo de falha	Subcategoria	Função de risco	Política atual	Política proposta	Número de substituições	Tempo de paragem (min)	Complexidade da TI	C_{ps} (€)
Fixo	Sistema de Transporte	Clamping Blade;4054005188	Desgaste da aresta	B.1	Crescente	MPC - Inspeção visual (Trimestral)	TD	3	120		1657,00
Fixo	Sistema de Transporte	Washer antistatic white;4030000561	-	-	-	MC	MC	15	15		16,66
Fixo	Sistema de Transporte	Round belt D=3mm L=2246mm;5011270287	Fissurado	A.3	Crescente	MPC - Inspeção visual (Trimestral); MPC - Medição da resistividade (Anual)	TI	4	37 ⁽¹⁾	Baixa	64,26
			Sujo	A.3	Não crescente		MC				
			Partido	A.3	Crescente		TI			Baixa	
Fixo	Sistema de Transporte	Synchronous belt 10AT3/150;5011100289	Fissurado	A.3	Crescente	MPC - Inspeção visual (Trimestral); MPC - Medição da resistividade (Anual)	TI	0	40	Baixa	59,92
			Deformado	A.3	Crescente		TI			Baixa	
			Partido	A.3	Crescente		TI			Baixa	
Fixo	Sistema de Transporte	Synchronous belt 6AT3/1011;5011100407	Fissurado	A.3	Crescente	MPC - Inspeção visual (Trimestral); MPC - Medição da resistividade (Anual)	TI	0	40	Baixa	35,27
			Deformado	A.3	Crescente		TI			Baixa	
			Partido	A.3	Crescente		TI			Baixa	
Fixo	Sistema de Transporte	Synchronous belt 10T2,5/120;5011100177	Fissurado	A.3	Crescente	MPC - Inspeção visual (Trimestral); MPC - Medição da resistividade (Anual)	TI	0	40	Baixa	12,75
			Deformado	A.3	Crescente		TI			Baixa	
			Partido	A.3	Crescente		TI			Baixa	
Fixo	Sistema de Transporte	Motor with spindle;2299004109	Condutor partido	A.3	Crescente	MC	TI	1	240	Média	149,60
Fixo	Sistema de Transporte	Motor 23S21-0250-0000;5310000036	Queimado	A.3	Não crescente	MC	MC	0	30	Não é aplicável	221,00
			Rolamentos danificados	A.3	Crescente		MC				
			Enrolamentos danificados	A.3	Não crescente		MC				
Fixo	Sistema de Transporte	Synchronous belt 10T2,5/145;5011100197	Fissurado	A.3	Crescente	MPC - Inspeção visual (Trimestral); MPC - Medição da resistividade (Anual)	TI	0	40	Baixa	10,11
			Deformado	A.3	Crescente		TI			Baixa	
			Partido	A.3	Crescente		TI			Baixa	

Tipo	Subconjunto	Componente	Modo de falha	Subcategoria	Função de risco	Política atual	Política proposta	Número de substituições	Tempo de paragem (min)	Complexidade da TI	C_{ps} (€)
Fixo	Sistema de Transporte	Diffuse sensor w/2 lightspots;5355400166	Sensor queimado	A.3	Não crescente	MC	MC	0	25		94,60
			Cabo de alimentação e de transmissão de dados danificado	A.3	Crescente		MC			Média	
Fixo	Sistema de Transporte	Synchronous belt 6AT3/816;5011100218	Fissurado	A.3	Crescente	MPC - Inspeção visual (Trimestral); MPC - Medição da resistividade (Anual)	TI	0	40	Baixa	20,31
			Deformado	A.3	Crescente		TI			Baixa	
			Partido	A.3	Crescente		TI			Baixa	
Fixo	Sistema de Transporte	Synchronizing disc AT3 Z 18;4090000137	Encaixe do veio deformado	A.3	Crescente	MC	TI	2	66,67 ⁽¹⁾	Médio	136,68
Fixo	Sistema de Transporte; Sistema de Limpeza	50.007.281 Motor controller ECOSTEP54-AA	Queimado	A.3	Não crescente	MC	MC	0	120		1134,00
Móvel	Sistema de VarioGrid	Válvula Bosch (0820031026);0820.031.061	O-ring danificado	B.1	Crescente	MPC - Inspeção visual (Trimestral)	TD	1	30		50,29
Fixo	Unidade da Câmara	sensor 5355000001;NJ1,5-8GM40-E2-V3	Queimado	A.3	Não crescente	MC	MC	0	20		26,4
Fixo	Unidade da Câmara	PINO AÇO BCW TEMPBATE E EKRA	Partido	A.3	Não crescente	MC	MC	5	30		28,60
			Indentado	A.3	Crescente		TI			Baixa	
Fixo	Unidade da Câmara	Retrofitkit camera cable;2053001074	Cabo partido	A.3	Crescente	MC	MC	10	240	Não é aplicável	791,51
Fixo	Unidade da Câmara	Stop pin;4039000907	Partido	A.3	Não crescente	MC	MC	2	30		7,48
			Indentado	A.3	Crescente		TI			Baixa	
Fixo	Unidade da Câmara	Dispensing plate;4052009652	Empenado	A.3	Não crescente	MC	MC	5	120		137,28
Fixo	Unidade da Câmara	Cylinder Ekra (5601040262);CDUJB10-25D	Veio empenado	A.3	Não crescente	MC	MC	5	94 ⁽¹⁾		20,48
			O-ring deformado	A.3	Crescente		MC			Não é aplicável	
			Partido	A.3	Não crescente		MC				
Fixo	Unidade da Câmara	Sensor inductive;5355000064	Queimado	A.3	Não crescente	MC	MC	1	20		25,50

Tipo	Subconjunto	Componente	Modo de falha	Subcategoria	Função de risco	Política atual	Política proposta	Número de substituições	Tempo de paragem (min)	Complexidade da TI	C _{ps} (€)
Fixo	Unidade da Câmara	Digital Camera Cable 38m;5360000896	Cabo partido	A.3	Crescente	MC	TI	4	240	Média	230,77
Fixo	Unidade de Elevação	5382000119 Motor controller ECOVARIO 114	Queimado	A.3	Não crescente	MC	MC	0	120		675,24
Fixo	Unidade de Elevação	Motor 23S21-0250-0000;5310000036	Queimado	A.3	Não crescente	MC	MC	0	30	Não é aplicável	221,00
			Rolamentos danificados	A.3	Crescente		MC				
			Enrolamentos danificados	A.3	Não crescente		MC				
Fixo	Unidade de Elevação; Unidade da Câmara; Unidade de Raspador	Magnetic tape;5028000078	Arranhado	A.3	Não crescente	MC	MC	0	240		71,49
Fixo	Unidade de Raspador	par abas inox DIR+ESQ /espatula; 0001230	Empenado	B.1	Não crescente	MC	TD	10	10		15,35
Fixo	Unidade de Raspador	Shim ring DIN988-12-18-2;5052000156	-	-	-	MC	MC	1	15		0,85
Fixo	Unidade de Raspador	Proportional Pressure Regulator;542234	Fuga de ar	A.3	Crescente	MPC - Calibração (Anual)	TI	1	80	Média	190,24
Fixo	Unidade de Raspador	Support bar right;4054006662	Partido	A.0	Não crescente	MC	MC	2	15		25,33
Fixo	Unidade de Raspador	Support bar left;4054006661	Partido	A.0	Não crescente	MC	MC	3	15		25,33
							Total	348			
							Tipos de componentes	80			
							Média	4,35			

⁽¹⁾ Valor médio

5.4.4. Estimativa dos custos de manutenção: componentes com modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores

Os custos da política de manutenção associada aos tipos de componentes que têm modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores foram estimados com base nos dados dos registos de consumos das 27 máquinas Ekra Serio 5000. A realização destas estimativas visou permitir que a análise da viabilidade da aplicação da MPC/TD utilizando sensores pudesse ser realizada simultaneamente para os modos de falha associados a diferentes tipos de componentes, tirando partido dos recursos existentes na empresa.

Os valores obtidos destinam-se a ser comparados com o custo da política de MPC/TD definida com base na informação sobre o modo de falha, com vista a verificar a sua viabilidade financeira. O conhecimento prévio do custo da política de manutenção atual (C_{PA}) também visa evitar gastos excessivos relacionados com a aquisição de dispositivos de medição de dados para verificar a viabilidade técnica da MPC/TD.

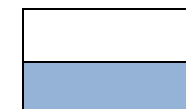
Para determinar o custo das substituições efetuadas no âmbito de ações de MC (substituições corretivas), foi estimado o custo de falha (C_f) relativo a cada combinação “subconjunto – tipo de componente” (Tabela 46). O C_f foi obtido somando os seguintes custos:

- C_{ps} – Corresponde ao valor consultado no SAP em janeiro de 2021.
- C_{mo} – Resulta da multiplicação do tempo de paragem do equipamento, devido à substituição do componente, pelo valor de referência do custo de mão de obra (28,60 €/hora).
- C_{pp} – Resulta da multiplicação do tempo de paragem, devido à substituição do componente, pelo valor de referência do custo de perdas de produção (104,80 €/hora).

O custo das perdas de qualidade (C_{pq}) e o custo associado à aquisição de outras peças sobressalentes (C_{ops}) não foram considerados na estimativa do C_f devido à inexistência de dados quantitativos relevantes. Porém, existe a convicção de que a falha total ou parcial de alguns dos tipos de componentes considerados (ex.: “válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417” e “válvula VUVG-B10-M52-RZT-F;573416”) pode contribuir para o fabrico de produto defeituoso.

Tabela 46 – Custo de falha dos componentes que têm modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores (máquinas Ekra Serio 5000).

Ekra Serio 5000												
Subconjunto	Componente	Quantidade	Modos de falha	Tempo de paragem (minutos)	C_{ps}	C_{mo}	C_{pq}	C_{pp}	C_{ops}	C_f	Número de substituições	Política atual
Dispensador de Pasta de Solda	Motor 23S21-0250-0000;5310000036	1	Rolamentos danificados	30 ⁽³⁾	221,00	14,30	0	52,40	0	287,70	0	MC
Sistema de Controlo Elétrico	Pack baterias RBC48;689-9058	1	Descarregado	30 ⁽³⁾	81,25	14,30	0	52,40	0	147,95	10	MPS (Triannual)
Sistema de Limpeza	Suction hose;2299005870	6	Furado	45 ⁽³⁾	39,95	21,45	0	78,60	0	140,00	3	MPC - Inspeção visual (Trimestral)
Sistema de Limpeza	válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417	1	Danificado	15 ⁽³⁾	15,30	7,15	0	26,20	0	48,65	28	MC
Sistema de Limpeza	válvula VUVG-B10-M52-RZT-F;573416	1	Danificado	15 ⁽³⁾	14,55	7,15	0	26,20	0	47,90	0	MC
Sistema de Transporte	Cylinder Ekra (5601040262);CDUJB10-25D	1	O-ring deformado	94 ⁽⁴⁾	20,48	44,81	0	164,19	0	229,48	5	MC
Sistema de Transporte	Round belt D=3mm L=679 mm;5011270288	2 ⁽¹⁾ 4 ⁽²⁾	Fissurado; Partido	23 ⁽⁴⁾	42,25	10,96	0	40,17	0	93,38	7	MPC - Inspeção visual (Trimestral); MPC - Medição da resistividade (Anual)
Sistema de Transporte	belt 12 x 690mm ;50012322	4	Fissurado; Deformado; Partido	46,75 ⁽⁴⁾	50,65	22,28	0	81,66	0	154,59	40	MPC - Inspeção visual (Trimestral); MPC - Medição da resistividade (Anual)
Sistema de Transporte	Proportional Pressure Regulator;542234	1	Fuga de ar	80 ⁽³⁾	190,24	38,13	0	139,73	0	368,10	0	MPC - Calibração (Anual)
Sistema de Transporte	Round belt D=3mm L=2246mm;5011270287	2 ⁽²⁾	Fissurado; Partido	37 ⁽⁴⁾	64,26	17,64	0	64,63	0	146,53	4	MPC - Inspeção visual (Trimestral); MPC - Medição da resistividade (Anual)
Sistema de Transporte	Motor 23S21-0250-0000;5310000036	2	Rolamentos danificados	30 ⁽³⁾	221,00	14,30	0	52,40	0	287,70	0	MC

Legenda C_f inferior ao valor médio C_f superior ao valor médio

Subconjunto	Componente	Quantidade	Modos de falha	Tempo de paragem (minutos)	C_{ps}	C_{mo}	C_{pq}	C_{pp}	C_{ops}	C_f	Número de substituições	Política atual
Sistema de Transporte	Synchronizing disc AT3 Z 18;4090000137	1	Encaixe do veio deformado	67,67 ⁽⁴⁾	136,68	32,25	0	118,19	0	287,12	2	MC
Sistema de Segurança	Gas spring AG3600350N/5;5062000167	3	Vedante deteriorado	20 ⁽³⁾	70,98	9,53	0	34,93	0	115,44	2	MPC - Inspeção visual e teste manual (Mensal)
Sistema de Transporte	Cylinder ADN-16-10-I-P-A-S2;5601040259	2	O-ring deformado	120 ⁽³⁾	63,24	57,20	0	209,60	0	330,04	0	MC
Sistema de Transporte	Synchronous belt 10AT3/150;5011100289	1 ⁽¹⁾	Fissurado; Deformado; Partido	40 ⁽³⁾	59,92	19,07	0	69,87	0	148,86	0	MPC - Inspeção visual (Trimestral); MPC - Medição da resistividade (Anual)
Sistema de Transporte	Synchronous belt 6AT3/1011;5011100407	2 ⁽¹⁾	Fissurado; Deformado; Partido	40 ⁽³⁾	35,27	19,07	0	69,87	0	124,21	0	MPC - Inspeção visual (Trimestral); MPC - Medição da resistividade (Anual)
Sistema de Transporte	Synchronous belt 10T2,5/120;5011100177	2	Fissurado; Deformado; Partido	40 ⁽³⁾	12,75	19,07	0	69,87	0	101,69	0	MPC - Inspeção visual (Trimestral); MPC - Medição da resistividade (Anual)
Sistema de Transporte	Synchronous belt 10T2,5/145;5011100197	2 ⁽²⁾	Fissurado; Deformado; Partido	40 ⁽³⁾	10,11	19,07	0	69,87	0	99,05	0	MPC - Inspeção visual (Trimestral); MPC - Medição da resistividade (Anual)
Sistema de Transporte	Synchronous belt 6AT3/816;5011100218	1 ⁽²⁾	Fissurado; Deformado; Partido	40 ⁽³⁾	20,31	19,07	0	69,87	0	109,25	0	MPC - Inspeção visual (Trimestral); MPC - Medição da resistividade (Anual)
Unidade de Elevação	Motor 23S21-0250-0000;5310000036	2	Rolamentos danificados	30 ⁽³⁾	221,00	14,30	0	52,40	0	287,70	0	MC
Unidade de Raspador	Proportional Pressure Regulator;542234	2	Fuga de ar	80 ⁽³⁾	190,24	38,13	0	139,73	0	368,10	1	MPC - Calibração (Anual)

⁽¹⁾ Single lane; ⁽²⁾ Dual lane; ⁽³⁾ Estimativa; ⁽⁴⁾ Valor médio

Alguns dos tipos de componentes considerados estão presentes em diferentes posições do mesmo subconjunto do equipamento e/ou em subconjuntos distintos. Para os componentes do mesmo tipo, considerou-se que o tempo de paragem é equivalente. Por isso, o seu C_f é igual.

O valor médio do C_f das combinações “subconjunto – tipo de componente” identificadas na Tabela 46 é de 186,83 € e o tipo de componente que apresenta o C_f mais elevado é o “Proportional Pressure Regulator;542234” (368,10 €). Porém, este tipo de componente só tem associada 1 substituição na Unidade de Raspador. Por outro lado, o “Round belt D=3mm L=679 mm;5011270288” é o tipo de componente que tem o C_f mais reduzido (93,39 €).

O valor médio anual do C_{PA} foi estimado para todas as combinações “subconjunto – tipo de componente” apresentadas na Tabela 46. Este custo resulta da soma do custo anual das substituições corretivas, com o custo anual das substituições preventivas e com o custo anual de utilização da política. No entanto, o custo de utilização da política só foi estimado para os tipos de componentes que já têm associadas políticas de MPC.

O custo anual das substituições corretivas foi obtido multiplicando o C_f pelo número médio de substituições realizadas por ano no âmbito das ações corretivas. Enquanto o custo anual das substituições preventivas resulta da multiplicação do custo de uma substituição preventiva (C_p) pelo número médio de substituições realizadas por ano no âmbito das ações preventivas. Na estimativa do C_p , não foram consideradas as perdas de produção, visto que as substituições preventivas são realizadas fora dos períodos de produção.

Para os tipos de componente que são inspecionados visualmente, os custos de inspeção não são contemplados na estimativa do C_{PA} , visto que as inspeções são realizadas durante as operações de limpeza do equipamento.

Na Tabela 47, são apresentadas estimativas do valor médio anual do C_{PA} para o conjunto de máquinas onde cada tipo de componente é utilizado, por máquina e por unidade de componente. Os valores apresentados são relativos somente às combinações “subconjunto – tipo de componente” cujo C_{PA} é superior a 0 €.

O “Pack baterias RBC48;689-9058” é o tipo de componente que tem o C_{PA} por unidade mais elevado (31,85 €/ano). Assim, o custo de aplicação da MPC ao modo de falha deste tipo de componente deve ser inferior a 31,85 €/ano.

Tabela 47 – Custo da política de manutenção atual dos componentes que têm modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores (máquinas Ekra Serio 5000).

Subconjunto	Componente	Número de substituições corretivas/ano	Número de substituições preventivas/ano	C_p	Custo das substituições corretivas/ano	Custo das substituições preventivas/ano	Custo de utilização da política/ano	C_{PA}/ano	$C_{PA}/(máquina \times ano)$	$C_{PA}/(unidade \times ano)$
Sistema de Controlo Elétrico	Pack baterias RBC48;689-9058	0	0,33 ⁽¹⁾	95,55	0	859,95	0	859,95	31,85	31,85
Sistema de Limpeza	Suction hose;2299005870	0,04	0	61,40	140,00	0	0	140,00	5,19	0,86
Sistema de Limpeza	válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417	0,40	0	22,45	522,42	0	0	522,42	19,35	19,35
Sistema de Transporte	Cylinder Ekra (5601040262);CDUJB10-25D	0,04	0	71,74	269,43	0	0	269,43	9,98	9,98
Sistema de Transporte	Round belt D=3mm L=679 mm;5011270288	0,05	0,06	52,74	121,77	78,65	0	200,42	7,42	2,28
Sistema de Transporte	belt 12 x 690mm ;50012322	0,10	0,32	62,75	405,98	622,40	0	1 028,38	38,09	9,52
Sistema de Transporte	Proportional Pressure Regulator;542234	0	0	228,37	0	0	772,20 ⁽²⁾	772,20	28,60	28,60
Sistema de Transporte	Round belt D=3mm L=2246mm;5011270287	0,06	0	81,42	225,65	0	0	225,65	13,27	6,64
Sistema de Transporte	Synchronizing disc AT3 Z 18;4090000137	0,03	0	168,14	221,09	0	0	221,09	8,19	8,19
Sistema de Segurança	Gas Spring AG3600350N/5;5062000167	0,02	0	80,51	66,46	0	463,32 ⁽³⁾	529,78	19,62	6,54
Unidade de Raspador	Proportional Pressure Regulator;542234	0,01	0	228,37	101,10	0	1 544,40 ⁽²⁾	1 645,50	60,94	30,47

⁽¹⁾ Valor correspondente à frequência média de substituição do componente nas 10 máquinas com idade igual ou superior a 3 anos; ⁽²⁾ A duração de uma calibração é de 60 minutos; ⁽³⁾ O tempo de inspeção e teste por unidade é de 1 minuto.

5.4.5. Identificação dos modos de falha prioritários para a implementação da MPC

Os 35 modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores foram ordenados tendo em conta a sua prioridade para a análise da viabilidade técnica e financeira da política a adotar. As etapas envolvidas na priorização dos modos de falha são descritas nas subsubsecções seguintes.

5.4.5.1. Listagem dos parâmetros mensuráveis com os sensores existentes

A listagem dos parâmetros mensuráveis com os sensores existentes na máquina Ekra Serio 5000 foi elaborada depois de terem sido identificados os seus subconjuntos e os tipos de componentes de cada subconjunto que têm associado um código interno. A informação obtida é apresentada no formulário F3 (Tabela 48).

Tabela 48 – Formulário “F3 – Parâmetros mensuráveis com os sensores existentes” (máquinas Ekra Serio 5000).

Subconjunto	Componente	Tipo de sensor	Parâmetro
Dispensador de Pasta de Solda	Motor 23S21-0250-0000;5310000036	Sensor de aceleração; Sensor de corrente; Sensor de proximidade; Sensor de velocidade	Aceleração; Intensidade de corrente; Posição; Velocidade
Sistema de Controlo Elétrico	fonte PULS 36-42V, 133A; 670-0670	Sensor de tensão: DC-OKRELAY CONTACT	Tensão elétrica
	Power Supply 60V/10ASWS600L60;5321000080	Sensor de tensão	Tensão elétrica
	Power Supply PULS CPS20361;5321000071	Sensor de tensão: DC-OKRELAY CONTACT	Tensão elétrica
Sistema de Limpeza	Solvent container: 5900000011	Sensor capacitivo: Balluff BCS00U7	Presença (binário)
	barra de vacuo Ekra 5000;405 400 45 14	Sensor de proximidade: SME-8-DS-24V-K-0.3-M8D	Presença (binário)
	Barra vácuo 400mm Ekra;4054005614	Sensor de proximidade: SME-8-DS-24V-K-0.3-M8D	Presença (binário)
	Barra vácuo 300mm Ekra;4054005520	Sensor de proximidade: SME-8-DS-24V-K-0.3-M8D	Presença (binário)
	Cylinder ADN-16-10-I-P-A-S2;5601040259	Sensor magneto-resistivo	Presença (binário)
	Clamping Piece Serio 5000;4082000456	Sensor de proximidade: Incremental encoder 360counts TVI40N-14TK0T6TN-00360	Posição angular
	Roll complete with flange;2220140473	Sensor de proximidade: Incremental encoder 360counts TVI40N-14TK0T6TN-00360	Posição angular
	Suction hose;2299005870	Sensor de pressão	Pressão
Sistema de Transporte	50.007.281 Motor controller ECOSTEP54-AA	Sensor de temperatura; Sensor de tensão	Temperatura; Tensão elétrica
	Proportional Pressure Regulator;542234	Sensor de pressão	Pressão
	Motor 23S21-0250-0000;5310000036	Sensor de aceleração; Sensor de corrente; Sensor de proximidade; Sensor de velocidade	Aceleração; Intensidade de corrente; Posição; Velocidade

Subconjunto	Componente	Tipo de sensor	Parâmetro
Sistema de Transporte Sistema de Limpeza	50.007.281 Motor controller ECOSTEP54-AA	Sensor de temperatura; Sensor de tensão	Temperatura; Tensão elétrica
Unidade da Câmara	Cylinder Ekra (5601040262);CDUJB10-25D	Sensor magneto-resistivo	Presença (binário)
Unidade de Elevação	5382000119 Motor controller ECOVARIO 114	Sensor de temperatura; Sensor de tensão	Temperatura; Tensão elétrica
	Motor 23S21-0250- 0000;5310000036	Sensor de aceleração; Sensor de corrente; Sensor de proximidade; Sensor de velocidade	Aceleração; Intensidade de corrente; Posição; Velocidade
Unidade de Raspador	Proportional Pressure Regulator;542234	Sensor de pressão	Pressão

5.4.5.2. Identificação dos parâmetros relacionados com os modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD

Os parâmetros relacionados com os modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores foram identificados com base na descrição dos sintomas e a partir do conhecimento técnico e científico da equipa de projeto. Posteriormente, o formulário F4 (Tabela 49) foi utilizado para relacionar as diferentes combinações “modo de falha – parâmetro” com a disponibilidade de sensores na máquina, recorrendo à informação registada no formulário F3.

A Tabela 49 mostra que a máquina Ekra Serio 5000 dispõe de sensores associados a 6 das 57 combinações “modo de falha – parâmetro”. No entanto, cada um destes casos deve ser sujeito a uma análise de viabilidade técnica, destinada a avaliar a adequação dos sensores existentes e a necessidade de instalar mais sensores.

Também se verifica que os componentes “Motor 23S21-0250-0000;5310000036”, “Cylinder ADN-16-10-I-P-A-S2;5601040259” e “Cylinder Ekra (5601040262);CDUJB10-25D” têm associados sensores que não estão relacionados com os respetivos modos de falha. A existência de um sensor específico associado ao componente é assinalada na Tabela 49 com a palavra “Sim” e com a cor verde.

Tabela 49 – Formulário “F4 – Parâmetros a analisar e disponibilidade de sensores” (máquinas Ekra Serio 5000).

Subconjunto	Componente	Modo de falha	Parâmetro	Sensores
Dispensador de Pasta de Solda	Motor 23S21-0250-0000;5310000036	Rolamentos danificados	Frequência de vibração	Não
			Intensidade de corrente	Sim
			Temperatura	Não
		-	Aceleração	Sim
		-	Posição	Sim
		-	Velocidade	Sim
Sistema de Controlo Elétrico	Pack baterias RBC48;689-9058	Descarregado	Tensão elétrica	Não
			Intensidade de corrente	Não
Sistema de Limpeza	Cylinder ADN-16-10-I-P-A-S2;5601040259	O-ring deformado	Pressão	Não
		-	Presença (binário)	Sim
	Suction hose;2299005870	Furado	Pressão	Sim
	válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417	Danificado	Frequência de vibração	Não
	válvula VUVG-B10-M52-RZT-F;573416	Danificado	Frequência de vibração	Não
Sistema de Segurança	Gas spring AG3600350N/5;5062000167	Vedante deteriorado	Pressão	Não
	Round belt D=3mm L=679 mm;5011270288	Fissurado	Frequência de vibração	Não
		Partido	Frequência de vibração	Não
	belt 12 x 690mm ;50012322	Deformado	Frequência de vibração	Não
		Fissurado	Frequência de vibração	Não
		Partido	Frequência de vibração	Não
	Proportional Pressure Regulator;542234	Fuga de ar	Pressão	Sim
	Round belt D=3mm L=2246mm;5011270287	Fissurado	Frequência de vibração	Não
		Partido	Frequência de vibração	Não
	Synchronous belt 10AT3/150;5011100289	Deformado	Frequência de vibração	Não
			Tensão de tração	Não
		Fissurado	Frequência de vibração	Não

Subconjunto	Componente	Modo de falha	Parâmetro	Sensores
			Tensão de tração	Não
		Partido	Frequência de vibração	Não
			Tensão de tração	Não
	Synchronous belt 6AT3/1011;5011100407	Deformado	Frequência de vibração	Não
			Tensão de tração	Não
		Fissurado	Frequência de vibração	Não
			Tensão de tração	Não
		Partido	Frequência de vibração	Não
			Tensão de tração	Não
	Synchronous belt 10T2,5/120;5011100177	Deformado	Frequência de vibração	Não
			Tensão de tração	Não
		Fissurado	Frequência de vibração	Não
			Tensão de tração	Não
		Partido	Frequência de vibração	Não
			Tensão de tração	Não
	Motor 23S21-0250-0000;5310000036	Rolamentos danificados	Frequência de vibração	Não
			Intensidade de corrente	Sim
			Temperatura	Não
		-	Aceleração	Sim
		-	Posição	Sim
-		Velocidade	Sim	
Synchronous belt 10T2,5/145;5011100197	Deformado	Frequência de vibração	Não	
		Tensão de tração	Não	
	Fissurado	Frequência de vibração	Não	
		Tensão de tração	Não	
	Partido	Frequência de vibração	Não	
		Tensão de tração	Não	

Subconjunto	Componente	Modo de falha	Parâmetro	Sensores
	Synchronous belt 6AT3/816;5011100218	Deformado	Frequência de vibração	Não
			Tensão de tração	Não
		Fissurado	Frequência de vibração	Não
			Tensão de tração	Não
		Partido	Frequência de vibração	Não
			Tensão de tração	Não
	Synchronizing disc AT3 Z 18;4090000137	Encaixe do veio deformado	Frequência de vibração	Não
Unidade da Câmara	Cylinder Ekra (5601040262);CDUJB10-25D	O-ring deformado	Pressão	Não
		-	Presença (binário)	Sim
Unidade de Elevação	Motor 23S21-0250-0000;5310000036	Rolamentos danificados	Frequência de vibração	Não
			Intensidade de corrente	Sim
			Temperatura	Não
		-	Aceleração	Sim
		-	Posição	Sim
		-	Velocidade	Sim
Unidade de Raspador	Proportional Pressure Regulator;542234	Fuga de ar	Pressão	Sim

5.4.5.3. Classificação da relação entre os parâmetros e os modos de falha

Esta etapa foi realizada com o apoio de um colaborador da empresa especializado nas máquinas de impressão de pasta, de forma a considerar o seu conhecimento prático sobre o funcionamento interno dos componentes que têm associados modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores e sobre eventuais interações com outros componentes. Os resultados da classificação da relação entre os parâmetros e os modos de falha foram registados no formulário F5 (Tabela 50).

A análise realizada permitiu constatar que o parâmetro apresenta uma relação “Muito evidente” (Nível 1) como o modo de falha em 13 combinações “modo de falha – parâmetro”. Ou seja, existem evidências consistentes de que a iniciação ou o desenvolvimento do modo de falha tem impacto no parâmetro. Na Tabela 50, observa-se que os parâmetros relativos a 6 destas combinações podem ser medidos com sensores já instalados na máquina. Estes sensores estão associados aos componentes “Suction hose;2299005870” (sensor de pressão), “Proportional Pressure Regulator;542234” (sensor de pressão) e “Motor 23S21-0250-0000;5310000036” (sensor de corrente).

Tabela 50 – Formulário “F5 – Relação entre os parâmetros e os modos de falha” (máquinas Ekra Serio 5000).

Subconjunto/Componente/Modo de falha	Criticidade/ Subcategoria	Frequência de vibração	Intensidade de corrente	Pressão	Temperatura	Tensão elétrica	Tensão de tração
Dispensador de Pasta de Solda							
Motor 23S21-0250-0000;5310000036	Vital	-	Sensor de corrente	-	-	-	-
Rolamentos danificados	A.3		1		1		
Sistema de Controlo Elétrico							
Pack baterias RBC48;689-9058	Vital	-	-	-	-	-	-
Descarregado	A.3		1			1	
Sistema de Limpeza							
Cylinder ADN-16-10-IP-A-S2;5601040259	Vital	-	-	-	-	-	-
O-ring deformado	A.3			2			
Suction hose;2299005870	Vital	-	-	Sensor de pressão	-	-	-
Furado	A.3			1			
válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417	Desejável	-	-	-	-	-	-
Danificado	B.1	1					
válvula VUVG-B10-M52-RZT-F;573416	Desejável	-	-	-	-	-	-
Danificado	B.1	1					
Sistema de Segurança							
Gas spring AG3600350N/5;5062000167	Desejável	-	-	-	-	-	-
Vedante deteriorado	B.4			2			
Sistema de Transporte							
Round belt D=3mm L=679 mm;5011270288	Vital	-	-	-	-	-	-
Fissurado	A.3	2					
Partido	A.3	2					
belt 12 x 690mm ;50012322	Vital	-	-	-	-	-	-
Fissurado	A.3	2					
Deformado	A.3	2					
Partido	A.3	2					

Subconjunto/Componente/Modo de falha	Criticidade/ Subcategoria	Frequência de vibração	Intensidade de corrente	Pressão	Temperatura	Tensão elétrica	Tensão de tração
Proportional Pressure Regulator;542234	Vital	-	-	Sensor de pressão	-	-	-
Fuga de ar	A.3			1			
Round belt D=3mm L=2246mm;5011270287	Vital	-	-	-	-	-	-
Fissurado	A.3	2					
Partido	A.3	2					
Synchronous belt 10AT3/150;5011100289	Vital	-	-	-	-	-	-
Fissurado	A.3	2					2
Deformado	A.3	2					2
Partido	A.3	2					2
Synchronous belt 6AT3/1011;5011100407	Vital	-	-	-	-	-	-
Fissurado	A.3	2					2
Deformado	A.3	2					2
Partido	A.3	2					2
Synchronous belt 10T2,5/120;5011100177	Vital	-	-	-	-	-	-
Fissurado	A.3	2					2
Deformado	A.3	2					2
Partido	A.3	2					2
Motor 23S21-0250-0000;5310000036	Vital	-	Sensor de corrente	-	-	-	-
Rolamentos danificados	A.3		1		1		
Synchronous belt 10T2,5/145;5011100197	Vital	-	-	-	-	-	-
Fissurado	A.3	2					2
Deformado	A.3	2					2
Partido	A.3	2					2
Synchronous belt 6AT3/816;5011100218	Vital	-	-	-	-	-	-
Fissurado	A.3	2					2
Deformado	A.3	2					2
Partido	A.3	2					2
Synchronizing disc AT3 Z 18;4090000137	Vital	-	-	-	-	-	-

Subconjunto/Componente/Modo de falha	Criticidade/ Subcategoria	Frequência de vibração	Intensidade de corrente	Pressão	Temperatura	Tensão elétrica	Tensão de tração
Encaixe do veio deformado	A.3	2					
Unidade da Câmara							
Cylinder Ekra (5601040262);CDUJB10-25D	Vital	-	-	-	-	-	-
O-ring deformado	A.3			2			
Unidade de Elevação							
Motor 23S21-0250-0000;5310000036	Vital	-	Sensor de corrente	-	-	-	-
Rolamentos danificados	A.3		1		1		
Unidade de Raspador							
Proportional Pressure Regulator;542234	Vital	-	-	Sensor de pressão	-	-	-
Fuga de ar	A.3			1			

5.4.5.4. Definição de prioridades

A ordenação dos modos de falha de acordo com a sua prioridade para a análise da viabilidade da MPC/TD utilizando sensores é apresentada na Tabela 51. Na coluna “custo total”, foi registado o valor do custo de todas as unidades do tipo de componente ao qual está associado o modo de falha, substituídas nas máquinas Ekra Serio 5000, no período entre 29 de julho de 2016 e 31 de dezembro de 2020. Assim, o valor obtido resultou da multiplicação do número de substituições do tipo de componente pelo respetivo custo unitário.

O modo de falha “Fuga de ar”, relativo ao “Proporcional Pressure Regulator;5422342” da Unidade de Raspador, encontra-se em primeiro lugar na lista de prioridades, visto que tem um “custo total” mais elevado do que os restantes tipos de componentes que têm sensores associados. Este tipo de componente foi substituído somente 1 vez e é calibrado anualmente. A calibração permite detetar eventuais desvios às condições normais de operação. Porém, tendo em conta que estes desvios poderão contribuir para originar produto defeituoso, considera-se que seria útil monitorizar o desempenho do componente recorrendo aos sensores instalados no equipamento.

Os modos de falha “Descarregado” do “Pack baterias RBC48;689-9058” e “Danificado” da “válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417” e da “válvula VUVG-B10-M52-RZT-F;573416” têm uma relação “Muito evidente” (Nível 1) com os parâmetros a monitorizar. No entanto, o “custo total” das substituições do “Pack baterias RBC48;689-9058” é superior. Por isso, a análise da aplicabilidade da MPC ao modo de falha deste componente tem uma prioridade mais elevada.

Os modos de falha que se encontram situados mais abaixo, na lista de prioridades, têm uma relação “Evidente” (Nível 2) com o(s) parâmetro(s) a monitorizar. Estes modos de falha são relativos a um conjunto de 12 tipos de componentes. No entanto, salienta-se que, deste conjunto, apenas o “Cylinder Ekra (5601040262);CDUJB10-25D” e o “Cylinder ADN-16-10-I-P-A-S2;5601040259” não têm associada uma política de MPC.

Tabela 51 – Lista de prioridades (máquinas Ekra Serio 5000).

Ekra Serio 5000

Legenda

O componente tem associada pelo menos uma ação de MPC/TD objetiva

O componente tem associada uma ou mais ações de MPC/TD subjetivas

O componente não tem associada nenhuma ação de MPC/TD

Subconjunto	Componente	Modo de falha	Tipo de sensor	Relação mais forte	Nº de substituições	Custo unitário	Custo total	Criticidade	Subcategoria
Unidade de Raspador	Proportional Pressure Regulator;542234	Fuga de ar	Sensor de pressão	1	1	190,24	190,24	Vital	A.3
Sistema de Limpeza	Suction hose;2299005870	Furado	Sensor de pressão	1	3	39,95	119,85	Vital	A.3
Sistema de Transporte	Proportional Pressure Regulator;542234	Fuga de ar	Sensor de pressão	1	0	190,24	0	Vital	A.3
Dispensador de Pasta de Solda	Motor 23S21-0250-0000;5310000036	Rolamentos danificados	Sensor de corrente	1	0	221,00	0	Vital	A.3
Sistema de Transporte	Motor 23S21-0250-0000;5310000036	Rolamentos danificados	Sensor de corrente	1	0	221,00	0	Vital	A.3
Unidade de Elevação	Motor 23S21-0250-0000;5310000036	Rolamentos danificados	Sensor de corrente	1	0	221,00	0	Vital	A.3
Sistema de Controlo Elétrico	Pack baterias RBC48;689-9058	Descarregado	-	1	10	81,25	812,50	Vital	A.3
Sistema de Limpeza	válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417	Danificado	-	1	28	15,30	428,40	Desejável	B.1
Sistema de Limpeza	válvula VUVG-B10-M52-RZT-F;573416	Danificado	-	1	0	14,55	0	Desejável	A.1
Sistema de Transporte	belt 12 x 690mm ;50012322	Fissurado	-	2	40	50,65	2 026,00	Vital	A.3
		Deformado	-	2					A.3
		Partido	-	2					A.3
Sistema de Transporte	Round belt D=3mm L=679 mm;5011270288	Fissurado	-	2	7	42,25	295,75	Vital	A.3
		Partido	-	2					A.3
Sistema de Transporte	Synchronizing disc AT3 Z 18;4090000137	Encaixe do veio deformado	-	2	2	136,68	273,36	Vital	A.3
Sistema de Transporte	Round belt D=3mm L=2246mm;5011270287	Fissurado	-	2	4	64,26	257,04	Vital	A.3
		Partido	-	2					A.3

Subconjunto	Componente	Modo de falha	Tipo de sensor	Relação mais forte	Nº de substituições	Custo unitário	Custo total	Criticidade	Subcategoria
Sistema de Segurança	Gas spring AG3600350N/5;5062000167	Vedante deteriorado	-	2	2	70,98	141,96	Desejável	B.4
Unidade da Câmara	Cylinder Ekra (5601040262);CDUJB10-25D	O-ring deformado	-	2	5	20,48	102,40	Vital	A.3
Sistema de Limpeza	Cylinder ADN-16-10-I-P-A-S2;5601040259	O-ring deformado	-	2	0	63,24	0	Vital	A.3
Sistema de Transporte	Synchronous belt 10AT3/150;5011100289	Fissurado	-	2	0	59,92	0	Vital	A.3
		Deformado	-	2	0	59,92	0	Vital	A.3
		Partido	-	2	0	59,92	0	Vital	A.3
Sistema de Transporte	Synchronous belt 6AT3/1011;5011100407	Fissurado	-	2	0	35,27	0	Vital	A.3
		Deformado	-	2	0	35,27	0	Vital	A.3
		Partido	-	2	0	35,27	0	Vital	A.3
Sistema de Transporte	Synchronous belt 10T2,5/120;5011100177	Fissurado	-	2	0	12,75	0	Vital	A.3
		Deformado	-	2	0	12,75	0	Vital	A.3
		Partido	-	2	0	12,75	0	Vital	A.3
Sistema de Transporte	Synchronous belt 10T2,5/145;5011100197	Fissurado	-	2	0	10,11	0	Vital	A.3
		Deformado	-	2	0	10,11	0	Vital	A.3
		Partido	-	2	0	10,11	0	Vital	A.3
Sistema de Transporte	Synchronous belt 6AT3/816;5011100218	Fissurado	-	2	0	20,31	0	Vital	A.3
		Deformado	-	2	0	20,31	0	Vital	A.3
		Partido	-	2	0	20,31	0	Vital	A.3

Depois de analisarem a lista ordenada de modos de falha, os responsáveis da área da manutenção tomaram as seguintes decisões:

- Excluir da análise os modos de falha relativos aos tipos de componentes que não têm substituições associadas. Esta decisão teve em conta a sua elevada durabilidade e o valor do C_f (ver subsecção 5.4.4). Assim, considerou-se que a aplicação de uma política de MPC utilizando sensores a estes modos de falha não seria financeiramente viável.
- Excluir da análise o modo de falha “Furado” relativo ao “Suction hose;2299005870”, uma vez que a utilização da limpeza com aspiração é pouco frequente. Quando a limpeza com aspiração não está ativa, o modo de falha associado a este tipo de componente origina uma falha oculta (subcategoria B.3) e, nestas circunstâncias, não apresenta sintomas (ver Tabela 41).
- Aplicar a TI definida para o “Pack baterias RBC48;689-9058”, que envolve a utilização de um dispositivo de medição externo (ver Apêndice VII), devido à dificuldade em identificar no mercado sensores adequados para associar a este tipo de componente.
- Começar por analisar a viabilidade técnica e financeira da MPC/TD para os modos de falha dos componentes “Proportional Pressure Regulator” da Unidade de Raspador e “válvula VUVG-B10-M52-RZT-F;573416” do Sistema de Limpeza, visto que o funcionamento irregular destes tipos de componentes pode originar perdas de qualidade, cujos custos são difíceis de quantificar.

Contudo, devido a restrições de tempo, não foi possível tirar conclusões com base na análise dos valores medidos pelos “sensores de pressão” associados ao “Proportional Pressure Regulator”. Por isso, a análise apresentada nas subsecções seguintes foca-se somente no modo de falha associado ao componente “válvula VUVG-B10-M52-RZT-F;573416”, cujo tempo de vida útil é significativamente mais curto.

O componente “válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417” é uma válvula eletromecânica que auxilia o funcionamento do Sistema de Limpeza da máquina Ekra Serio 5000. A função deste componente consiste em controlar o fluxo de ar comprimido que move o pistão do cilindro pneumático, cujo eixo de deslocamento é paralelo à superfície da tela.

Durante a operação de limpeza da tela, o pistão do cilindro efetua movimentos regulares, de avanço e de recuo, para fazer oscilar a barra de vácuo. A oscilação da barra tem início quando o papel, embebido em solvente, entra em contacto com a tela (Figura 49). A partir desse instante, o Sistema de Limpeza desloca-se na direção perpendicular ao movimento do cilindro, ao longo de toda a extensão da tela. Quando atinge o limite da tela, retorna à extremidade oposta, sem contactar com a superfície. Este

procedimento é realizado quatro vezes em cada ciclo de limpeza. Ou seja, cada ciclo inclui quatro operações de limpeza. O intervalo entre ciclos de limpeza tem um valor fixo, expresso em unidades produzidas (ex.: 10, 15, etc.). Contudo, o valor do intervalo pode variar consoante o produto.



Figura 49 – Sistema de Limpeza da máquina Ekra Serie 5000.

A “válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417” (Figura 50a) dispõe de cinco vias e de dois estados (A e B). Numa das extremidades da válvula, existe uma bobina que gera um campo magnético quando é eletrificada. Nesse momento, o êmbolo da válvula (Figura 50b) é pressionado pelo ar que entra pela via 14 e movimenta-se da “posição A” para a “posição B”, comprimindo a mola mecânica que está situada na extremidade oposta. Quando não é eletrificada, a mola descomprime e o êmbolo retorna à posição inicial. A alternância entre os dois estados é designada de “comutação”. O modo de falha “danificado” resulta na perda da capacidade de comutar.

Com o êmbolo na “posição B”, o ar entra na válvula pela via 1 e sai pela via 4 para ir ocupar o lado da câmara do cilindro, onde é gerada a pressão necessária para fazer avançar o pistão até ao fim do seu curso. À medida que o pistão avança, o ar que se encontra do outro lado da câmara entra na válvula pela porta 2 e é libertado para o exterior pela porta 3.

A “posição A” permite que o ar, que entra na via 1, circule através da via 2 até à câmara do cilindro, onde é gerada a pressão necessária para fazer recuar o pistão até à sua posição inicial (Figura 50c). Quando o pistão recua, o ar que se encontra do lado oposto da câmara entra na válvula pela via 4 e é libertado para o exterior pela via 5.

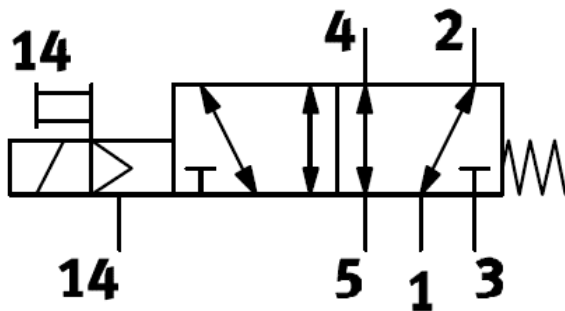


(a)



(b)

Posição A ⇌ Posição B



(c)

Figura 50 – “válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417” (a), êmbolo da válvula (b) e esquema de funcionamento da válvula quando o êmbolo se encontra na posição A (c).

De acordo com a informação fornecida pelo fabricante do equipamento, o Sistema de Limpeza pode operar com uma frequência até 10 Hz. Para que esta frequência seja atingida, a válvula deve comutar com a mesma frequência. Em geral, o Sistema de Limpeza é ajustado para que o cilindro opere com a frequência máxima, de forma a assegurar uma limpeza eficaz da tela. No entanto, constatou-se que existem duas restrições que impedem que a frequência de 10 Hz seja alcançada:

1. O Controlador Lógico Programável (CLP) só permite enviar um sinal (onda quadrada) para a válvula com uma frequência de aproximadamente 8,3 Hz, apesar de o programa de limpeza especificar uma frequência de 10 Hz.
2. O componente “válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417” foi dimensionado para operar com uma frequência de comutação até 3 Hz.

Durante o funcionamento da válvula, os seus elementos mecânicos estão sujeitos a desgaste. O processo de desgaste é agravado pelo facto de a válvula ser forçada a operar com uma frequência de comutação superior a 3 Hz. Esta circunstância contribui para que a válvula tenha um desempenho irregular, que se reflete na oscilação da barra do Sistema de Limpeza. Quando a válvula perde a capacidade de comutar, a barra deixa de oscilar.

Em seguida, é abordada a TD definida para detetar o modo de falha da “válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417”. A mesma TD pode ser aplicada para monitorizar o desempenho da “válvula VUVG-B10-M52-RZT-F;573416” e de outros tipos de válvulas que podem ocupar a mesma posição no equipamento.

5.4.6. Definição dos dispositivos de medição de dados

O sistema definido para monitorizar o desempenho da válvula do Sistema de Limpeza é constituído por três sensores de proximidade. Um dos sensores está associado à barra de vácuo e já se encontrava instalado no equipamento (ver Tabela 48). Este sensor permite identificar a posição da barra de vácuo em relação à tela e determinar o tempo que esta demora a percorrer a superfície da tela, durante a operação de limpeza. Os outros dois sensores de proximidade foram instalados no cilindro, a fim de detetar a sua presença no início e no fim do curso. Desta forma, pretendeu-se verificar se o pistão do cilindro efetuava movimentos completos de avanço e de recuo, e contar o número de movimentos realizados, em cada uma das direções, durante a operação de limpeza. Considera-se que o movimento do pistão do cilindro é completo somente quando chega ao fim do seu curso.

Para apoiar a seleção dos sensores de proximidade, foram estabelecidos seis critérios e cinco requisitos específicos. Na Tabela 52, são apresentadas as características das duas marcas de sensores de proximidade (sensores magneto-resistivos), identificadas no mercado, que se enquadram nos critérios definidos.

Tabela 52 – Critérios de seleção e características dos sensores de proximidade.

Critérios	SICK RZT7-03ZRS-KW0	FESTO SMT-8M-A-NS-24V-E-2.5-OE
Frequência de comutação	0 – 400 Hz	0 – 180 Hz
Tensão nominal	5 – 30 V	5 – 30 V
<i>Design</i>	T-Slot	T-Slot
Comprimento do cabo robótico	2 m	2,5 m
Prazo de entrega	1 dia	1 dia
Custo unitário	11,30 €	8,76 €

Os requisitos definidos para apoiar a seleção dos sensores de proximidade foram os seguintes:

- Capacidade para efetuar medições em frequências de comutação até pelo menos 10 Hz;
- Compatibilidade com a tensão nominal de funcionamento de 24 V;
- *Design* adaptável ao perfil T-Slot;
- Dispor de um cabo robótico com um comprimento igual ou superior a 1,95 m;
- O prazo de entrega não deve exceder 1 semana.

A aplicação do método de seleção de sensores mostra que os sensores das duas marcas cumprem com alguma folga os requisitos definidos (Figura 51). No entanto, o sensor “FESTO SMT-8M-A-NS-24V-E-2.5-OE2” obteve uma pontuação geral superior. A diferença existente deve-se ao facto de o cabo robótico do sensor “SICK RZT7-03ZRS-KW0” ter um comprimento próximo do limite estabelecido e de o custo unitário deste sensor ser mais elevado. Por isso, foi selecionado o sensor “FESTO SMT-8M-A-NS-24V-E-2.5-OE2”.

Requisitos de desempenho		Critérios		Total
		Frequência de comutação	Tensão	
		10 Hz	24 Volts	
Sensor	SICK RZT7-03ZRS-KW0	2	2	4
	FESTO SMT-8M-A-NS-24V-E-2.5-OE	2	2	4
Total	2			2

(a)

Requisitos físicos		Critérios		Total
		Design	Comprimento do cabo robótico	
		T-Slot	≥ 1,95	
Sensor	SICK RZT7-03ZRS-KW0	2	1	2
	FESTO SMT-8M-A-NS-24V-E-2.5-OE	2	2	4
Total	2			2

(b)

Requisitos comerciais		Critérios		Total	Pontuação geral
		Prazo de entrega	Custo normalizado		
		≤ 1 Semana	0,1-1		
Sensor	SICK RZT7-03ZRS-KW0	2	0,1	0,2	1,6
	FESTO SMT-8M-A-NS-24V-E-2.5-OE	2	1	2	32
Total	2				2

(c)

Figura 51 – Matrizes relativas aos requisitos de desempenho (a), requisitos físicos (b) e requisitos comerciais (c) dos sensores de proximidade.

A Figura 52 mostra os dois sensores “FESTO SMT-8M-A-NS-24V-E-2.5-OE2” instalados no cilindro do Sistema de Limpeza.

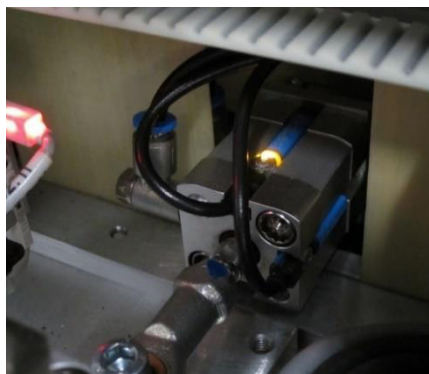


Figura 52 – Sensores de proximidade instalados no cilindro do Sistema de Limpeza.

5.4.7. Análise do impacto do modo de falha no parâmetro monitorizado

Os dados obtidos pelos sensores associados ao Sistema de Limpeza foram registados, de forma automática, num ficheiro que inclui a seguinte informação:

- Data e hora em que a operação de limpeza foi iniciada;
- Duração da operação de limpeza em milissegundos;
- Número de movimentos completos de avanço e de recuo;
- Número médio de movimentos de avanço e de recuo por segundo (frequência média de comutação);
- Designação do programa de produção;
- Designação específica atribuída à válvula instalada no equipamento;
- Designação do programa de limpeza.

A identificação do programa de produção destina-se a facilitar o cruzamento dos dados relacionados com o desempenho da válvula com os dados relativos ao controlo da qualidade do produto, realizado na máquina de inspeção de pasta. Assim, o limite que determina a necessidade de substituir a válvula poderá ser definido tendo em conta o impacto da perda de desempenho na qualidade.

A Figura 53 mostra um extrato do ficheiro de dados gerado pelo sistema de monitorização. Os dados apresentados são referentes a 8 operações de limpeza (2 ciclos).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Date	Time(ms)	CountL	CpSL	CountR	CpSR	EkraProgram	ValveName	CleaningProgram
2	07/06/2021 00:16	7424	55	7,41	61	8,22	8638912680H07U	P52-Nova	CLEANING-T1
3	07/06/2021 00:16	7552	57	7,55	61	8,08	8638912680H07U	P52-Nova	CLEANING-T1
4	07/06/2021 00:16	7552	57	7,55	61	8,08	8638912680H07U	P52-Nova	CLEANING-T1
5	07/06/2021 00:16	7680	60	7,81	63	8,2	8638912680H07U	P52-Nova	CLEANING-T1
6	07/06/2021 00:24	7424	56	7,54	61	8,22	8638912680H07U	P52-Nova	CLEANING-T1
7	07/06/2021 00:24	7424	56	7,54	61	8,22	8638912680H07U	P52-Nova	CLEANING-T1
8	07/06/2021 00:25	7552	57	7,55	61	8,08	8638912680H07U	P52-Nova	CLEANING-T1
9	07/06/2021 00:25	7680	58	7,55	63	8,2	8638912680H07U	P52-Nova	CLEANING-T1

Figura 53 – Extrato do ficheiro de dados (válvula do Sistema de Limpeza).

Os dados existentes mostram que o intervalo entre ciclos de limpeza é de 8 minutos e que a duração das operações de limpeza varia entre 7 e 8 segundos. Verifica-se ainda que o número de movimentos realizados para o lado esquerdo é inferior ao número de movimentos realizados para o lado direito nas 8 operações de limpeza, e que o tempo que o Sistema de Limpeza demorou a percorrer toda a extensão da tela (duração da operação de limpeza) é inferior quando o número total de movimentos do pistão do cilindro é menor. Por isso, a “frequência média de comutação” para o lado esquerdo é menor. O valor

da “frequência média de comutação”, em cada fim de curso, é obtido dividindo o número de movimentos pela duração da operação de limpeza em segundos.

A diferença entre o número de movimentos contados pelos dois sensores é justificada pela existência de movimentos incompletos do pistão do cilindro. Estes movimentos não são contados porque o pistão não chega ao fim do curso. Crê-se que os movimentos incompletos se devem ao subdimensionamento do componente “válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417”, visto que nos testes realizados com uma válvula que pode operar a frequências até 300 Hz não foram identificados movimentos incompletos.

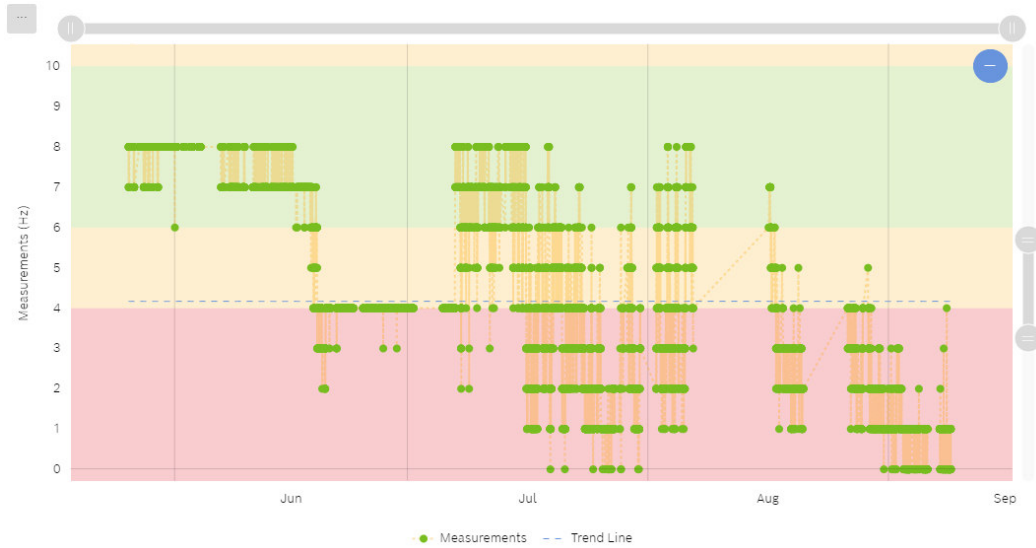
A “frequência média de comutação” é o parâmetro monitorizado para detetar a perda de desempenho e a ocorrência da falha funcional da válvula do Sistema de Limpeza. Os valores relativos a este parâmetro foram representados sequencialmente num gráfico (Figura 54) utilizando a interface de programação de aplicações do CMMS. A representação dos valores é efetuada automaticamente, imediatamente após a aquisição dos dados medidos pelos sensores. Desta forma, o desempenho do componente pode ser monitorizado em tempo real.

Os valores da “frequência média de comutação”, obtidos ao longo do tempo de vida de 2 válvulas instaladas sequencialmente na mesma máquina, foram monitorizados recorrendo ao sistema definido. O gráfico da Figura 54a é relativo à válvula que foi utilizada em primeiro lugar. Neste gráfico, foi representado o valor mínimo dos 8 valores da “frequência média de comutação” de um ciclo de limpeza, arredondado à unidade. Posteriormente, na monitorização da segunda válvula, foi utilizada a nova versão do CMMS, que permite representar graficamente o valor mínimo de cada operação de limpeza, arredondado à centésima (Figura 54b). Ou seja, em cada ciclo, passaram a ser representados 4 valores em vez de 1. A análise dos valores mínimos tem como finalidade detetar a perda de desempenho das válvulas mais cedo e reduzir o volume de dados transferidos para o CMMS.

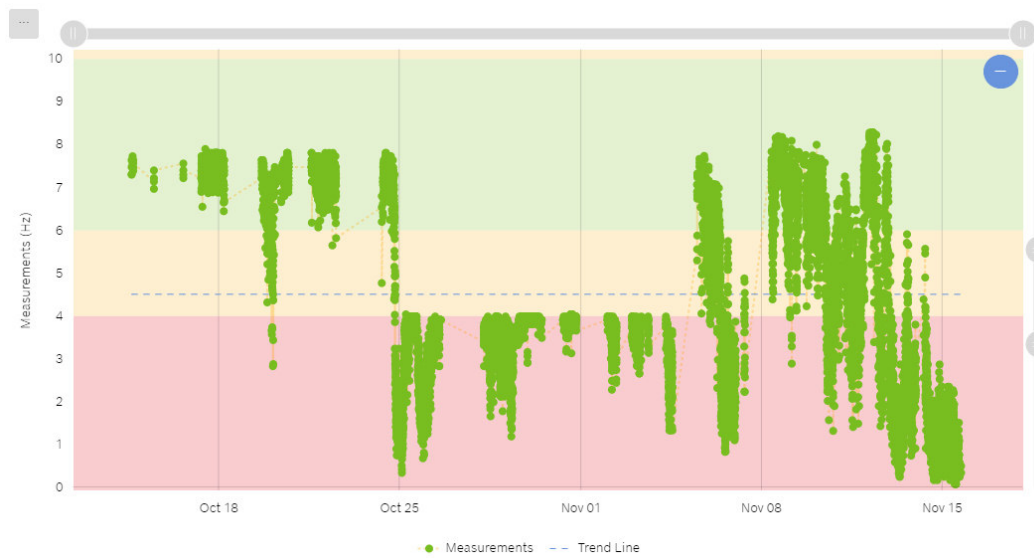
No âmbito desta análise, assumiu-se o pressuposto de que o valor da “frequência média de comutação” é satisfatório se for igual ou superior a 6 Hz e aceitável se for igual ou superior 4 Hz. Por isso, nos gráficos da Figura 54, o limite de aviso situa-se nos 6 Hz e o limite crítico nos 4 Hz. Caso seja obtido um valor acima dos 10 Hz, as causas devem ser investigadas.

A análise da evolução do parâmetro “frequência média de comutação” durante o tempo de vida de ambas as válvulas permitiu identificar um padrão de comportamento comum. Depois de um período inicial em que os valores da “frequência média de comutação” se situaram maioritariamente acima dos 6 Hz, seguiu-se um período com uma duração similar durante o qual os valores não excederam os 4 Hz. A transição entre estes dois estados ocorreu rapidamente em ambos os casos. Por fim, durante um

intervalo de tempo relativamente longo, os valores da “frequência média de comutação” variaram entre 0 e 8 Hz. Nesta fase, observaram-se variações significativas entre valores consecutivos, originando diversos picos esporádicos.



(a)



(b)

Figura 54 – Representação da “frequência média de comutação”: primeira válvula (a) e segunda válvula (b).

Ambas as válvulas foram substituídas depois de ter sido observada uma tendência decrescente acentuada nos valores da “frequência média de comutação” e quando o valor 0 Hz se tornou recorrente. A primeira válvula permaneceu no equipamento entre o dia 26 de maio e o dia 08 de setembro de 2021 (105 dias), enquanto a segunda foi utilizada no período entre 09 de setembro e 15 de novembro de 2021 (67 dias).

Quando a válvula perde a capacidade de comutar, a barra de vácuo deixa de oscilar. No entanto, durante as operações de limpeza, o Sistema de Limpeza continua a mover-se entre as duas extremidades da tela. Esta circunstância justifica o facto de as substituições das válvulas, realizadas até 31 de dezembro de 2020, terem ocorrido tardiamente.

A partir de janeiro de 2021, passou a ser dada maior atenção ao funcionamento do Sistema de Limpeza, de forma a assegurar que a falha funcional da válvula é detetada o mais cedo possível. A realização de inspeções periódicas permitiu constatar que o tempo até à falha deste tipo de componente teve uma duração similar noutras máquinas de impressão de pasta da empresa. Porém, para obter uma estimativa mais precisa do MTTF, o seu valor deve ser expresso em número de comutações ou em unidades de tempo, considerando somente os períodos de funcionamento da válvula. A duração destes períodos é equivalente à duração das operações de limpeza.

Com base na análise realizada, considerou-se que a informação visualizada nos gráficos (Figura 54) é adequada para a deteção da falha do componente e de eventuais perdas de desempenho. Por isso, o sistema de monitorização foi considerado tecnicamente viável.

Para facilitar a tomada de decisão em tempo real, a equipa de projeto desenvolveu uma interface que permite visualizar, de forma organizada, informação relativa ao desempenho da válvula e informação relevante sobre o processo. Esta informação é atualizada no fim de cada operação de limpeza.

5.4.8. Comparação do custo da TD com o custo da política atual

O custo do sistema de monitorização desenvolvido para apoiar a TD foi de 50,69 €. A Tabela 53 apresenta o custo dos elementos físicos que constituem o protótipo final e o custo total.

Tabela 53 – Custo do protótipo do sistema de monitorização (válvula do Sistema de Limpeza).

Elementos do protótipo	Custo unitário (€)	Quantidade	Custo total (€)
Sensores	8,76	2	17,52
Microcontrolador	20,47	1	20,47
Extensão do cabo USB	10,00	1	10,00
Resistências	0,05	6	0,30
Terminais	0,60	4	2,40
Total			50,69

De acordo com a estimativa realizada previamente (Tabela 47), o custo anual médio da política de manutenção associada ao componente “válvula VUUG-B10-M52-MZT-F;573417” (MC) é de 19,35 €.

Contudo, sabe-se que as válvulas substituídas no intervalo considerado nesta estimativa permaneceram no equipamento durante um período significativo depois de terem falhado. Apesar disso, a estimativa não contempla perdas de qualidade decorrentes da limpeza incorreta da tela, uma vez que o fabrico de produto defeituoso também pode ser motivado por outros fatores.

Em geral, o valor das perdas de qualidade é difícil de quantificar porque, para além dos prejuízos financeiros diretos que são gerados, a empresa também pode sofrer danos reputacionais. Assim, para minorar as perdas de qualidade, os responsáveis da área da manutenção pretendem que o componente seja substituído imediatamente após a ocorrência da falha funcional. Por isso, o custo anual da política atual foi recalculado considerando um MTTF igual a 0,25 anos (3 meses). Neste caso, o valor associado à aplicação da MC é de 194,60 € por máquina.

A comparação do custo da TD com o custo da política atual foi efetuada com base no pressuposto de que o sistema de monitorização será utilizado durante um período de 10 anos (vida útil restante do equipamento). Também se considerou que o custo anual de operação e manutenção do sistema de monitorização é de 7,15 €. Este valor é uma estimativa do custo da mão de obra requerida para realizar a inspeção e/ou o ajuste dos elementos do sistema. Devido à elevada durabilidade dos elementos físicos do sistema, não foram considerados custos de substituição.

O custo de implementação corresponde à soma do custo do protótipo com o C_{mo} correspondente a 2,5 horas de intervenção no equipamento. Tendo em conta que o custo de implementação é reduzido, a taxa anual de atualização não foi considerada. Sendo assim, o ganho resultante da aplicação da TD ao fim de 10 anos é de 854,31 €. Isto corresponde a um ganho anual médio de 85,43 € por máquina e de 2306,64€ para o conjunto das 27 máquinas. Ou seja, 23 066,40 € ao fim de 10 anos. Este ganho resulta da eliminação das perdas de produção que se verificam quando a válvula é substituída no âmbito de ações de MC.

Os custos considerados na comparação do custo da TD com o custo da política atual e o ganho estimado, por máquina, são apresentados na Tabela 54.

Tabela 54 – Ganho resultante da aplicação da TD (válvula do Sistema de Limpeza).

Custos	Ano de implementação	Valor acumulado (10 anos)
Custo da política de manutenção atual (€)	194,60	1 946,00
Custo de substituição preventiva (€)	89,80	898,00
Custo de operação e manutenção do sistema (€)	7,15	71,50

Custos	Ano de implementação	Valor acumulado (10 anos)
Custo de implementação (€)	122,19	122,19
Ganho (€)		854,31

5.4.9. Análise da viabilidade da TD utilizando sensores

A comparação do custo da TD com o custo da política atual permitiu constatar que a TD é financeiramente viável. Esta comparação foi realizada somente depois de ter sido verificada a viabilidade técnica da TD, porque o tempo de vida útil do componente não era conhecido e o custo de implementação do sistema de monitorização foi considerado reduzido.

Na análise da viabilidade técnica, constatou-se que a monitorização da “frequência média de comutação” permite detetar o desenvolvimento do modo de falha da válvula com a antecedência necessária para evitar os custos induzidos pela falha. Por isso, considera-se que a TD proposta é aplicável e eficaz.

Porém, devido à durabilidade reduzida do componente “válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417”, também se procurou identificar uma ação de melhoria, destinada a obter uma redução mais significativa do custo de manutenção.

5.4.10. Análise de custo-benefício da ação de melhoria

A ação de melhoria definida contempla a substituição da válvula existente por uma válvula que pode operar com uma frequência de comutação até 300 Hz. O custo de aquisição do novo componente e dos acessórios necessários para a sua instalação é de 51,19 €. Em caso de falha do componente, o tempo de paragem do equipamento é de 15 minutos. Desta forma, se não forem consideradas as perdas de qualidade, a estimativa do C_f é de 84,54 €.

De acordo com o parecer dos engenheiros/técnicos de manutenção, o novo componente terá um tempo de vida útil de pelo menos 10 anos, se operar com uma frequência de comutação de 8,3 Hz. Assim, assumindo que este tipo de componente só será substituído 1 vez no período de 10 anos, o custo anual médio de substituição devido a falha é de 8,45 € por máquina e de 228,26 € para o conjunto das 27 máquinas.

A Tabela 55 apresenta o ganho anual médio resultante da aplicação da ação de melhoria por máquina e para o conjunto das 27 máquinas (ganho total), em comparação com as duas políticas de referência do componente “válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417”. Os valores obtidos baseiam-se no pressuposto de que o componente “válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417” seria substituído 4 vezes por ano em cada

máquina. Nesse caso, a estimativa do custo anual médio associado à sua utilização nas 27 máquinas é de 5 254,20€.

Tabela 55 – Ganho anual médio resultante da aplicação da ação de melhoria (válvula do Sistema de Limpeza).

Política de referência	Ganho (€)	Ganho total (€)	Ganho (%)
Política de manutenção atual	186,15	5 025,94	95,66
TD	100,72	2 719,33	92,26

A válvula do novo modelo foi testada e teve um desempenho satisfatório, conforme mostra o gráfico da Figura 55.

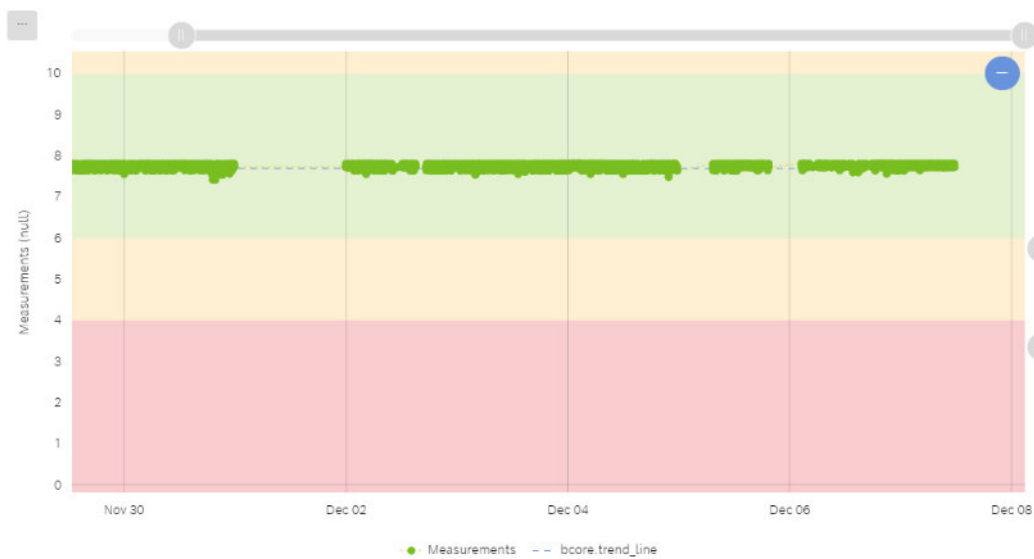


Figura 55 – Representação da “frequência média de comutação”: válvula do novo modelo.

5.5. Máquina de soldadura Rehm VXP

O equipamento analisado em segundo lugar foi a máquina de soldadura Rehm VXP (Figura 56), uma vez que a sua criticidade é a segunda mais elevada do ranking dos equipamentos da linha SMD18 (Tabela 38). Esta máquina é aquela que apresenta o custo de manutenção mais alto no período considerado (abril de 2018 a outubro de 2020). Isto deve-se principalmente ao elevado número de substituições preventivas de componentes. As ações de manutenção preventiva são realizadas por uma equipa externa, de acordo com um plano predefinido.



Figura 56 – Máquina de soldadura Rehm VXP.

A máquina de soldadura Rehm VXP dispõe de um forno de refluxo de ar quente para realizar a operação de soldadura. A soldadura visa unir de forma permanente os terminais dos dispositivos eletrônicos aos circuitos impressos, com o auxílio da pasta de solda depositada na superfície do PCB. Para realizar a soldadura, a pasta é fundida por convecção de ar quente, com uma concentração de O_2 que não deve exceder os 1500 ppm. Sempre que este limite é atingido, a máquina emite um alerta e para automaticamente de funcionar. Durante a operação, é injetando N_2 na câmara da máquina de soldadura, de forma a manter uma concentração de O_2 estável. A circulação do ar no interior da máquina de soldadura é realizada com o auxílio de ventiladores instalados na parte superior e na parte inferior da câmara.

Na câmara da máquina de soldadura, o PCB passa por três zonas distintas, tais como: pré-aquecimento, pico e refrigeração. A zona de pico é onde se atinge a temperatura máxima (cerca de $245^{\circ}C$). A temperatura elevada contribui para a libertação de compostos orgânicos voláteis existentes na pasta de solda. Para remover estes resíduos, o ar é submetido a um processo de pirólise e é filtrado utilizando um filtro de carvão ativado. Posteriormente, na zona de refrigeração, o ar é novamente filtrado com o auxílio de três filtros metálicos e de um filtro de papel. Contudo, uma parte dos resíduos libertados durante a operação de soldadura acumula-se gradualmente na superfície dos componentes que têm contacto com o ar da câmara. Por isso, estes componentes são limpos regularmente utilizando um solvente com características físico-químicas apropriadas e/ou substituídos periodicamente, devido à

acumulação excessiva de resíduos. As operações de limpeza contribuem para um desgaste mais rápido dos componentes e nem sempre são eficazes.

Nas subsecções seguintes, são apresentados os resultados da aplicação dos métodos e procedimentos subsequentes da metodologia de seleção da política de manutenção e de apoio à implementação da manutenção condicionada.

5.5.1. Classificação multicritério dos componentes do equipamento

Na classificação dos componentes da máquina de soldadura, foram aplicados os passos descritos em seguida.

5.5.1.1. Identificação dos subconjuntos do equipamento

As máquinas de soldadura Rehm VXP são compostas por sete subconjuntos. Na Tabela 56, é apresentada a designação de cada subconjunto e descrita a respetiva função.

Tabela 56 – Subconjuntos da máquina Rehm VXP.

Subconjunto	Descrição da função	Tipo
Sistema de Aquecimento	Contribui para manter as diferentes zonas de aquecimento da câmara da máquina de soldadura e a zona de pirólise à temperatura predefinida.	Fixo
Sistema de Controlo Elétrico	Realiza a alimentação e o controlo elétrico do equipamento.	Fixo
Sistema de Exaustão	Efetua a extração dos gases da câmara da máquina de soldadura, de forma a possibilitar a renovação do ar interior.	Fixo
Sistema de Monitorização	Realiza a medição dos parâmetros relevantes do processo produtivo.	Fixo/Móvel
Sistema de Refrigeração	Mantém a zona de refrigeração à temperatura predefinida.	Fixo/Móvel
Sistema de Transporte	Realiza o apoio e o transporte do PCB à velocidade predefinida.	Fixo
Sistema de Ventilação	Efetua a redistribuição do ar da câmara da máquina de soldadura, transportando-o da zona de refrigeração para a zona de pré-aquecimento.	Fixo

O Sistema de Monitorização e o Sistema de Refrigeração são constituídos por componentes fixos e por componentes móveis. A troca verifica-se sobretudo quando os componentes são removidos do equipamento para serem limpos. Tendo em conta que as operações de limpeza são demoradas, a disponibilidade imediata de um componente idêntico permite eliminar o tempo de espera. Estas peças sobressalentes são designadas de componentes porque não são reparadas quando falham.

A concentração de O_2 é medida por um dispositivo móvel instalado no exterior do equipamento. Este dispositivo está integrado no Sistema de Monitorização e tem capacidade de medir em simultâneo a concentração de O_2 no ar proveniente de quatro locais da câmara da máquina de soldadura. Porém, a

concentração de O_2 só é medida no ar da zona de pico. A realização de medições no ar proveniente de outros locais da câmara poderia permitir detetar mais cedo falhas que contribuem para o aumento da concentração de O_2 e facilitar o seu diagnóstico.

O Sistema de Monitorização dispõe de sensores instalados em diferentes pontos do equipamento, para medir seis tipos de parâmetros. Cada um destes parâmetros tem associado um valor limite superior e/ou um valor limite inferior. Sempre que o limite predefinido é atingido, é emitida uma mensagem de erro. Os parâmetros medidos durante o processo produtivo são descritos na Tabela 57.

Tabela 57 – Parâmetros do processo medidos na máquina Rehm VXP.

Parâmetro	Descrição	Unidade
Concentração de O_2	Ar da zona de pico (dispositivo externo)	ppm
Temperatura	Ar da câmara	°C
	Ar da zona de pirólise	°C
	Ventiladores da câmara	°C
	Resistência da zona de pirólise	°C
	Resistências das zonas de pré-aquecimento e de pico	°C
	Água de arrefecimento no tanque	°C
Velocidade	Transporte do PCB	mm/min
Largura	Distância entre as correntes laterais	mm
Pressão	Diferença entre a pressão de entrada e a pressão de saída do ar da zona de pirólise	mbar
	Ar de exaustão	mbar
Caudal	Ar de exaustão (dispositivo externo)	m ³ /hora

A temperatura do ar nas diferentes zonas da câmara da máquina de soldadura, a velocidade de transporte do PCB e a distância entre as correntes laterais dependem das características do produto que se pretende fabricar. Por isso, o valor pretendido para estes parâmetros é ajustado no início da produção.

5.5.1.2. Identificação dos componentes do equipamento

A identificação dos tipos de componentes do equipamento foi realizada a partir dos consumos registados no SAP, no período entre 09 de março de 2011 e 31 de março de 2021. De forma a obter um conjunto mais vasto de registos, também foram considerados os consumos imputados às máquinas Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT. Estas máquinas são mais recentes. No entanto, a maioria dos seus componentes são idênticos aos componentes das máquinas Rehm VXP e são constituídas pelos mesmos subconjuntos. Embora tenham sido identificados 91 tipos de componentes pertencentes a estes equipamentos, com

um número interno associado, optou-se por considerar na análise apenas os tipos de componentes que obedecem a pelo menos uma das seguintes condições:

- Consumo superior a 19 unidades, independentemente do preço unitário;
- Consumo superior a 4 unidades e preço unitário igual ou superior a 300 €;
- Preço unitário superior a 1500 euros, independentemente do consumo.

Estas condições foram definidas para se poder começar mais rapidamente a testar a abordagem de apoio à implementação da MPC e com vista a assegurar que os tipos de componentes financeiramente mais relevantes são considerados na análise. Para este propósito, foram tidas em consideração as opiniões dos responsáveis da área da manutenção e a experiência adquirida no estudo realizado para a máquina Ekra Serio 5000.

Também foram excluídos da análise os tipos componentes que deixaram de ser utilizados, por terem sido substituídos por outros com características diferentes, e consumíveis. De um modo geral, considera-se que as ações de manutenção associadas aos tipos de componentes excluídos têm um impacto pouco significativo do ponto de vista financeiro. Assim, a análise focou-se somente em 14 tipos de componentes (11 fixos e 3 móveis).

A empresa dispõe de 11 máquinas do subtipo Rehm VXP, 4 máquinas do subtipo Rehm VXP + e 8 máquinas do subtipo Rehm VXP+ DT. No total, estas máquinas estão presentes em 23 linhas de produção. As máquinas Rehm VXP+ DT distinguem-se das Rehm VXP + pelo facto de terem transporte duplo. Por este motivo, têm o dobro da capacidade produtiva. Todas as máquinas entraram em funcionamento há mais de 2 anos. O tempo médio de funcionamento é de 4,1 anos. A máquina de soldadura da linha SMD25 foi a primeira a entrar em funcionamento. Esta máquina iniciou a atividade no dia 9 de março de 2011. A máquina de soldadura da linha SMD18 iniciou a atividade no dia 2 de fevereiro de 2017. Isto corresponde a um período de atividade de 4,2 anos, até 31 de março de 2021.

Na Tabela 58, é apresentada a data de início de atividade de cada uma das 23 máquinas de soldadura e o período de atividade em dias e anos, até 31 de março de 2021.

Tabela 58 – Datas de entrada em funcionamento e período de atividade das máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT, até 31/03/2021.

Subtipo	Linha	Data de início	Dias	Anos
Rehm VXP	SMD25	09/03/2011	3663	10,0
Rehm VXP	SMD09	14/03/2011	3658	10,0
Rehm VXP	SMD21	23/07/2011	3527	9,7

Subtipo	Linha	Data de início	Dias	Anos
Rehm VXP	SMD05	07/07/2016	1716	4,7
Rehm VXP	SMD08	08/08/2016	1684	4,6
Rehm VXP	SMD11	01/08/2016	1691	4,6
Rehm VXP	SMD17	12/12/2016	1558	4,3
Rehm VXP	SMD18	02/01/2017	1537	4,2
Rehm VXP	SMD02	24/01/2017	1515	4,2
Rehm VXP	SMD30	18/04/2017	1431	3,9
Rehm VXP	SMD32	28/06/2017	1360	3,7
Rehm VXP +	SMD13	26/01/2018	1148	3,1
Rehm VXP +	SMD33	29/01/2018	1145	3,1
Rehm VXP + DT	SMD27	19/02/2018	1124	3,1
Rehm VXP + DT	SMD16	16/03/2018	1099	3,0
Rehm VXP +	SMD19	30/07/2018	963	2,6
Rehm VXP +	SMD12	06/09/2018	925	2,5
Rehm VXP + DT	SMD34	19/11/2018	851	2,3
Rehm VXP + DT	SMD35	28/11/2018	842	2,3
Rehm VXP + DT	SMD36	06/12/2018	834	2,3
Rehm VXP + DT	SMD37	14/01/2019	795	2,2
Rehm VXP + DT	SMD38	29/01/2019	780	2,1
Rehm VXP + DT	SMD22	21/02/2019	757	2,1
Total			34603	94,8
Média			1504	4,1

5.5.1.3. Associação dos componentes aos subconjuntos do equipamento

Os 14 tipos de componentes a analisar foram associados aos diferentes subconjuntos da máquina de soldadura, conforme mostra a Tabela 59. O Sistema de Refrigeração é o subconjunto que tem associado o maior número destes tipos de componentes (7 no total). Também se constata que nenhum dos tipos de componentes a analisar faz parte dos subconjuntos Sistema de Controlo Elétrico e Sistema de Exaustão.

Tabela 59 – Associação dos componentes aos subconjuntos (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).

Subconjunto	Componente	Descrição
Sistema de Aquecimento	“Heating element 1186410”	Resistências
	“1034229 Sealing Outer Tube”	Isolante
Sistema de Monitorização	“FLUOR FILTER ;4207.0101 (1019435)”	Filtro
Sistema de Refrigeração	“1019449;panel filter mediumF9,536x193x44”	Filtro
	“Water pump MH1203-1/E3-3/80 50Hz;1093504”	Bomba
	“EC Gas Fan 24VDC/2,5A ,54W;1094107”	Ventilador
	“1019551;Rectus Cap Coupling; 4217.0029”	Engate
	“Rectus Locking Nipple;4217.0030;1019552”	Engate

Subconjunto	Componente	Descrição
	“KF-center ring DN 50;4400.0047;1020024”	Vedante
	“KF-center ring DN 40; 4400.0044;1020022”	Vedante
Sistema de Transporte	“1016083;Lash chain 05B, one side”	Corrente central
	“Roller chain 05B1;1132349”	Corrente central
	“Strip brush STL4006 38mm;1130568”	Escova
	“Roller chain special 4mm;1110437”	Corrente lateral
Sistema de Ventilação	“KF-center ring DN 50;4400.0047;1020024”	Vedante
	“KF-center ring DN 40; 4400.0044;1020022”	Vedante

Na lista de componentes a analisar (Tabela 59), constam dois tipos de componentes que ainda não têm substituições associadas: “Heating element 1186410” e “Water pump MH1203-1/E3-3/80 50Hz;1093504”. No entanto, dada a sua importância para o processo produtivo, optou-se por considerá-los na análise. Estes tipos de componentes foram adquiridos recentemente para substituir os componentes originais das máquinas de soldadura que realizavam a mesma função, por se considerar que são mais robustos e fiáveis. O “Heating element 1186410” é o único componente da lista que tem um custo unitário superior a 1500 euros. É formado por um conjunto de 9 resistências e tem a função de aquecer o ar durante o processo de pirólise. As resistências podem falhar em simultâneo ou em momentos diferentes, no entanto não podem ser substituídas individualmente. Assim, a ocorrência da falha de uma resistência implica a substituição do componente. No que diz respeito ao “Water pump MH1203-1/E3-3/80 50Hz;1093504”, tem a função de fazer circular a água no sistema de refrigeração.

5.5.1.4. Aplicação do método de classificação dos componentes do equipamento

O método de classificação dos componentes foi aplicado aos 14 tipos componentes que se pretendeu analisar, tendo em conta o subconjunto ao qual se encontram associados. A classificação realizada permitiu identificar 10 tipos de componentes “Vitais”, 3 “Essenciais” e 1 “Desejável” (ver Tabela 60). Todos os tipos de componentes considerados são críticos, visto que não existem tipos de componentes com “função auxiliar” e “sem impacto na produção” (combinação 1x0 da matriz de combinações). No caso dos 10 tipos de componentes com classificação “Vital”, verifica-se que a ocorrência da falha funcional causa a paragem súbita da máquina. Esta circunstância é motivada pela ocorrência de erros despoletados automaticamente, quando um parâmetro específico da máquina se altera significativamente.

5.5.2. Definição da criticidade dos modos de falha

Os modos de falha potenciais foram identificados para cada uma das 16 combinações “subconjunto – tipo de componente” existentes. Posteriormente, definiu-se o efeito, as causas, os sintomas, a subcategoria e o comportamento da função de risco de cada modo de falha. Nesta análise, participaram o especialista das máquinas de soldadura e dois colaboradores da empresa externa que realizam as ações de manutenção preventiva. A informação obtida foi registada no formulário F1 (Tabela 60), utilizando termos e expressões normalizados.

Na análise dos modos de falha, também foi considerada informação dos registos de falhas efetuados no CMMS. Porém, na data da análise, apenas 3 dos 14 tipos de componentes tinham consumos associados a ordens de reparação, designadamente o “1019449;panel filter mediumF9,536x193x44”, o “FLUOR FILTER ;4207.0101 (1019435)” e o “EC Gas Fan 24VDC/2,5A ,54W;1094107”.

Para o “1034229 Sealing Outer Tube” do Sistema de Aquecimento não foram identificados modos de falha que podem manifestar-se durante o funcionamento do equipamento. Este tipo de componente é um isolante fabricado a partir de fibra de vidro (lã de vidro). Por isso, é resistente ao calor e tem uma durabilidade elevada. A sua substituição é realizada anualmente, porque é danificado quando as blindagens de proteção do Sistema de Aquecimento são retiradas, para substituir o carvão ativado utilizado no filtro que retém os resíduos resultantes da pirólise. Assim, neste caso, propõe-se que a política de manutenção seja definida ao nível do componente.

A ausência de registos de falha relativos aos tipos de componentes analisados impossibilitou uma caracterização mais rigorosa dos seus modos de falha e dos respetivos efeitos. Estes tipos componentes são substituídos sobretudo no âmbito das ações de manutenção preventiva. Por isso, os modos de falha identificados são genéricos.

Tabela 60 – Formulário “F1 – Informação relativa aos componentes críticos” (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).

Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT

Legenda

Componente nunca substituído

Componente não crítico

Componente ausente dos registos de falhas do CMMS

Componente presente nos registos de falhas do CMMS

Máquina	Tipo	Subconjunto	Componente	Função	Impacto na produção	Criticidade	Modo de falha	Efeito	Causas	Sintomas	Subcategoria	Função de risco
Todas	Fixo	Sistema de Aquecimento	Heating element 1186410	1	3	Vital	Danificado	Máquina parada - A temperatura de <i>set point</i> da pirólise não é atingida; Erro de temperatura	Desgaste	Diminuição da temperatura do ar; Diminuição do consumo de corrente	A.3	Crescente
Todas	Fixo	Sistema de Aquecimento	1034229 Sealing Outer Tube	1	2	Essencial	-	-	-	-	-	-
Todas	Fixo	Sistema de Monitorização	FLUOR FILTER ;4207.0101 (1019435)	1	3	Vital	Obstruído	Máquina parada - Redução do caudal de ar; Erro de fluxo	Acumulação de resíduos existentes no fluxo de ar	Redução do caudal de ar	A.3	Crescente
Todas	Fixo	Sistema de Refrigeração	1019449;panel filter mediumF9,536x193 x44	1	3	Vital	Obstruído	Máquina parada - Aumento de temperatura na zona de refrigeração; Erro de temperatura	Acumulação de resíduos existentes no fluxo de ar	Aumento de temperatura; Aumento da pressão na câmara do radiador	A.3	Crescente
Todas	Fixo	Sistema de Refrigeração	Water pump MH1203-1/E3-3/80 50Hz;1093504	3	3	Vital	Palhetas danificadas	Máquina parada - Redução do fluxo de água; Erro de fluxo	Desgaste	Redução do caudal de água; Aumento de temperatura	A.3	Crescente
Todas	Móvel	Sistema de Refrigeração	EC Gas Fan 24VDC/2,5A ,54W;1094107	3	3	Vital	Bloqueado	Máquina parada - Redução do fluxo de ar; Erro de fluxo	Acumulação de resíduos existentes no fluxo de ar	Diminuição do consumo de corrente; Aumento da velocidade de rotação	A.3	Crescente
Todas	Fixo	Sistema de Refrigeração - Mangueira	1019551;Rectus Cap Coupling; 4217.0029	1	3	Vital	Entupido	Máquina parada - Redução do caudal de água; Erro de temperatura	Corrosão devido ao contacto com moléculas de água; Resíduos de anticongelante	Redução do caudal de água; Aumento de temperatura na zona de refrigeração; Aumento de pressão no circuito	A.3	Crescente

Máquina	Tipo	Subconjunto	Componente	Função	Impacto na produção	Criticidade	Modo de falha	Efeito	Causas	Sintomas	Subcategoria	Função de risco
Todas	Fixo	Sistema de Refrigeração - Mangueira	Rectus Locking Nipple;4217.0030;1019552	1	3	Vital	Entupido	Máquina parada - Redução do caudal de água; Erro de temperatura	Corrosão devido ao contacto com moléculas de água; Resíduos de anticongelante	Redução do caudal de água; Aumento de temperatura na zona de refrigeração; Aumento de pressão no circuito	A.3	Crescente
Todas	Móvel	Sistema de Refrigeração - Radiador	1019551;Rectus Cap Coupling; 4217.0029	1	3	Vital	Entupido	Máquina parada - Redução do caudal de água; Erro de temperatura	Corrosão devido ao contacto com moléculas de água; Resíduos de anticongelante	Redução do caudal de água; Aumento de temperatura na zona de refrigeração; Aumento de pressão no circuito	A.3	Crescente
Todas	Móvel	Sistema de Refrigeração - Radiador	Rectus Locking Nipple;4217.0030;1019552	1	3	Vital	Entupido	Máquina parada - Redução do caudal de água; Erro de temperatura	Corrosão devido ao contacto com moléculas de água; Resíduos de anticongelante	Redução do caudal de água; Aumento de temperatura na zona de refrigeração; Aumento de pressão no circuito	A.3	Crescente
Todas	Fixo	Sistema de Refrigeração; Sistema de Ventilação	KF-center ring DN 50;4400.0047;1020024	1	2	Essencial	Deformado	Aumento da concentração de O_2	Desgaste gerado pela temperatura e pela compressão	Aumento da concentração de O_2	B.2	Crescente
Todas	Fixo	Sistema de Refrigeração; Sistema de Ventilação	KF-center ring DN 40; 4400.0044;1020022	1	2	Essencial	Deformado	Aumento da concentração de O_2	Desgaste gerado pela temperatura e pela compressão	Aumento da concentração de O_2	B.2	Crescente
VXP	Fixo	Sistema de Transporte	1016083;Lash chain 05B, one side	3	3	Vital	Alongado	Máquina parada - O PCB não é transportado; Erro de transporte	Temperatura elevada; Funcionamento incorreto do tensor; Desgaste	Alteração da tensão mecânica; Alteração da frequência de oscilação; Variação da intensidade de corrente do motor	A.3	Crescente
							Sujo	Máquina parada - O PCB não é transportado; Erro de transporte	Excesso de lubrificação; Acumulação de resíduos existentes no fluxo de ar	Alteração da tensão mecânica; Alteração da frequência de oscilação; Variação da intensidade de corrente do motor	A.3	Crescente
VXP +; VXP + DT	Fixo	Sistema de Transporte	Roller chain 05B1;1132349	3	3	Vital	Alongado	Máquina parada - O PCB não é transportado; Erro de transporte	Temperatura elevada; Funcionamento incorreto do tensor; Desgaste	Alteração da tensão mecânica; Alteração da frequência de oscilação; Variação da intensidade de corrente do motor	A.3	Crescente

Máquina	Tipo	Subconjunto	Componente	Função	Impacto na produção	Criticidade	Modo de falha	Efeito	Causas	Sintomas	Subcategoria	Função de risco
							Sujo	Máquina parada - O PCB não é transportado; Erro de transporte	Excesso de lubrificação; Acumulação de resíduos existentes no fluxo de ar	Alteração da tensão mecânica; Alteração da frequência de oscilação; Variação da intensidade de corrente do motor	A.3	Crescente
Todas	Fixo	Sistema de Transporte	Strip brush STL4006 38mm;1130568	1	1	Desejável	Fios danificados	Limpeza incorreta dos elos da corrente	Desgaste por fricção	-	B.1	Crescente
							Sujo	Contaminação da corrente	Acumulação de resíduos removidos da corrente	-	B.1	Crescente
Todas	Fixo	Sistema de Transporte	Roller chain special 4mm;1110437	3	3	Vital	Alongado	Máquina parada - O PCB não é transportado; Erro de transporte	Temperatura elevada; Funcionamento incorreto do tensor; Desgaste	Alteração da tensão mecânica; Alteração da frequência de oscilação; Variação da intensidade de corrente do motor	A.3	Crescente
							Sujo	Máquina parada - O PCB não é transportado; Erro de transporte	Excesso de lubrificação; Acumulação de resíduos existentes no fluxo de ar	Alteração da tensão mecânica; Alteração da frequência de oscilação; Variação da intensidade de corrente do motor	A.3	Crescente

Na Tabela 61, são apresentados o número e a percentagem de modos de falha em função da categoria, da subcategoria e do comportamento da função de risco. No total, foram identificados 19 modos de falha.

Tabela 61 – Quantidade de modos de falha por categoria e por subcategoria (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).

Subcategoria	Função de risco	Quantidade		Total	
		Un.	%	Un.	%
A.0 – Causa perdas financeiras moderadas ou ligeiras	Crescente	0	0	0	0
	Não crescente	0	0		
A.1 – Causa perdas elevadas de qualidade	Crescente	0	0	0	0
	Não crescente	0	0		
A.2 – Causa redução significativa do desempenho	Crescente	0	0	0	0
	Não crescente	0	0		
A.3 – Causa a paragem súbita do equipamento	Crescente	15	78,9	15	78,9
	Não crescente	0	0		
A.4 – Tem impacto adverso na segurança ou ambiente	Crescente	0	0	0	0,0
	Não crescente	0	0		
Categoria A – Falha evidente	Crescente	15	78,9	15	78,9
	Não crescente	0	0		
B.0 – Contribui para originar modos de falha da subcategoria A.0	Crescente	0	0	0	0
	Não crescente	0	0		
B.1 – Contribui para originar modos de falha da subcategoria A.1	Crescente	2	10,5	2	10,5
	Não crescente	0	0		
B.2 – Contribui para originar modos de falha da subcategoria A.2	Crescente	2	10,5	2	10,5
	Não crescente	0	0		
B.3 – Contribui para originar modos de falha da subcategoria A.3	Crescente	0	0	0	0
	Não crescente	0	0		
B.4 – Afeta dispositivos de segurança e/ou contribui para originar modos de falha da subcategoria A.4	Crescente	0	0	0	0
	Não crescente	0	0		
Categoria B – Falha oculta	Crescente	4	21,1	4	21,1
	Não crescente	0	0		
Total	Crescente	19	100	19	100
	Não crescente	0	0		

Dos 19 modos de falha identificados, 15 são da subcategoria A.3, 2 são da subcategoria B.1 e 2 são da subcategoria B.2. Todos os modos de falha identificados têm função de risco crescente, visto que resultam do desgaste ou da acumulação de sujidade.

Os modos de falha classificados na subcategoria A.3 geram habitualmente erros do sistema que controla o funcionamento da máquina. Contudo, para a maioria dos modos de falha identificados, o tempo que decorre entre a falha potencial e a falha funcional pode ser significativo. Assim, durante o seu desenvolvimento, podem ser originados defeitos no produto ou verificar-se um aumento do consumo de N_2 , motivado pelo aumento da concentração de O_2 na câmara da máquina de soldadura. Este aumento pode resultar de causas bastante diversas. Por isso, é difícil associá-lo a um modo de falha específico.

Os problemas mais comuns, verificados durante o desenvolvimento dos modos de falha dos tipos de componentes em análise, são os seguintes:

- Deslocamento ou queda de dispositivos eletrónicos do PCB, devido ao contacto com pontos de sujidade existentes nas correntes de transporte (ex.: crostas pontiagudas);
- Torção do PCB, motivada por diferenças na velocidade de funcionamento das duas correntes laterais;
- Aumento da concentração de O_2 , devido à acumulação de sujidade nos filtros, ao aumento da temperatura na zona de refrigeração e/ou à deformação dos vedantes.

Os modos de falha da Categoria B estão associadas aos componentes “KF-center ring DN 50;4400.0047;1020024”, “KF-center ring DN 40; 4400.0044;1020022” e “Strip brush STL4006 38mm;1130568”. Estes modos de falha não originam mensagens de erro durante o funcionamento da máquina, por isso são mais difíceis de detetar.

A partir da análise da informação apresentada na Tabela 60, foram identificados 13 modos de falha candidatos à aplicação da MPC e 2 modos de falha candidatos à aplicação de uma TD utilizando sensores. Os modos de falha candidatos à aplicação da MPC são relativos a tipos de componentes classificados como “Vitais” e pertencem à subcategoria A.3. Enquanto os modos de falha candidatos à aplicação de uma TD utilizando sensores estão associados a componentes classificados como “Essenciais” e pertencem à subcategoria B.2. Assim, no total, foram identificados 15 modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores.

Desta análise, excluíram-se 2 modos de falha para os quais não foram identificados sintomas e 2 modos de falha associados a tipos de componentes móveis. Os componentes móveis cujos modos de falha foram excluídos da análise são o “1019551;Rectus Cap Coupling; 4217.0029” e o “Rectus Locking Nipple;4217.0030;1019552” do Sistema de Refrigeração – Radiador.

5.5.3. Atribuição da política de manutenção

A política de manutenção foi atribuída com base na informação associada aos modos de falha identificados na subsecção 5.5.2 (Tabela 60), aplicando a árvore de decisão AD2 e recorrendo aos mesmos critérios utilizados no caso da máquina Ekra Serio 5000 (subsecção 5.4.3).

No formulário F2 (Tabela 62), é apresentada a política de manutenção atual (ao nível do componente), a política de manutenção proposta para cada modo de falha, o número de substituições de cada tipo de componente, o “Tempo de paragem”, a “Complexidade da TI” e o “ C_{ps} ” (em março de 2021). As políticas de manutenção atuais e as decisões tomadas no âmbito da atribuição das políticas propostas são explicadas no Apêndice VII.

No caso das correntes de transporte, a análise dos registos efetuados no SAP permitiu constatar que a quantidade consumida não é sempre registada da mesma forma. Para correntes do mesmo tipo, foram encontrados registos que especificam o número de peças e registos que especificam o número de metros. Além disso, alguns consumos cujo valor corresponde ao número de metros foram registados como sendo o número de peças e vice-versa. Por este motivo, foi necessário realizar correções nos registos. Esta circunstância impede que as quantidades consumidas possam ser determinadas de uma forma direta.

Os componentes “1016083;Lash chain 05B, one side”, “Roller chain 05B1;1132349” e “Roller chain special 4mm;1110437” são adquiridas em rolos e, posteriormente, cortados à medida. As correntes centrais têm um comprimento de 15 metros e as correntes laterais de 13,5 metros. O número de substituições do “1016083;Lash chain 05B, one side” e do “Roller chain special 4mm;1110437” (Tabela 62) não é um número inteiro porque, por vezes, existe desperdício de uma porção de corrente. No entanto, esta situação também poderá dever-se a erros na introdução dos consumos no SAP. Por exemplo, o facto de existirem correntes com comprimentos diferentes pode contribuir para que ocorram lapsos no registo do número de metros consumidos.

Também se verificou que algumas máquinas de soldadura têm associados um ou mais consumos de valor superior à quantidade de componentes do mesmo tipo que utilizam habitualmente (ver Apêndice VIII). Ou seja, é possível que os consumos de componentes do mesmo tipo, realizados na mesma data em máquinas diferentes, tenham sido agregados e imputados a uma única máquina. Por isso, não se recomendada a utilização dos registos existentes para estabelecer comparações entre máquinas.

Tabela 62 – Formulário “F2 – Política de manutenção” (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).

Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT

Legenda

Número de substituições igual 0

Número de substituições superior a 0 e inferior a 242

Número de substituições igual ou superior a 242



Máquina	Tipo	Subconjunto	Componente	Modo de falha	Subcategoria	Função de risco	Política atual	Política proposta	Número de substituições	Tempo de paragem (min)	Complexidade da TI	C _{ps} (€)
Todas	Fixo	Sistema de Aquecimento	Heating element 1186410	Danificado	A.3	Crescente	MC	MC	0	225	Não é eficaz	1605,00
Todas	Fixo	Sistema de Aquecimento	1034229 Sealing Outer Tube	-	-	-	MPS (Anual)	MPS	61	136	Não é eficaz	90,00
Todas	Fixo	Sistema de Monitorização	FLUOR FILTER ;4207.0101 (1019435)	Obstruído	A.3	Crescente	MPS (Mensal)	MPS	675	30	Não é eficaz	17,80
Todas	Fixo	Sistema de Refrigeração	1019449;panel filter mediumF9,536x193x44	Obstruído	A.3	Crescente	MPS (Quinzenal)	MPS	2215	85	Não é eficaz	15,63
Todas	Fixo	Sistema de Refrigeração	Water pump MH1203-1/E3-3/80 50Hz;1093504	Palhetas danificadas	A.3	Crescente	MC	MC	0	255	Não é aplicável	569,4
Todas	Móvel	Sistema de Refrigeração	EC Gas Fan 24VDC/2,5A ,54W;1094107	Bloqueado	A.3	Crescente	MPC - Inspeção visual (Mensal)	TI	5	90	Média	340,52
Todas	Fixo	Sistema de Refrigeração - Mangueira	1019551;Rectus Cap Coupling; 4217.0029	Entupido	A.3	Crescente	MPC - Inspeção visual (Quinzenal)	TI	79	85	Baixa	46,79
Todas	Móvel	Sistema de Refrigeração - Radiador	1019551;Rectus Cap Coupling; 4217.0029	Entupido	A.3	Crescente	MPC - Inspeção visual (Quinzenal)	TI			Baixa	
Todas	Fixo	Sistema de Refrigeração - Mangueira	Rectus Locking Nipple;4217.0030;1019552	Entupido	A.3	Crescente	MPC - Inspeção visual (Quinzenal)	TI	55	85	Baixa	27,35
Todas	Móvel	Sistema de Refrigeração - Radiador	Rectus Locking Nipple;4217.0030;1019552	Entupido	A.3	Crescente	MPC - Inspeção visual (Quinzenal)	TI			Baixa	
Todas	Fixo	Sistema de Refrigeração; Sistema de Ventilação	KF-center ring DN 50;4400.0047;1020024	Deformado	B.2	Crescente	MPC - Inspeção visual (Mensal)	TD	86	85		11,68

CAPÍTULO 5 | IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA

Máquina	Tipo	Subconjunto	Componente	Modo de falha	Subcategoria	Função de risco	Política atual	Política proposta	Número de substituições	Tempo de paragem (min)	Complexidade da TI	C_{ps} (€)
Todas	Fixo	Sistema de Refrigeração; Sistema de Ventilação	KF-center ring DN 40; 4400.0044;1020022	Deformado	B.2	Crescente	MPC - Inspeção visual (Mensal)	TD	65	85		11,47
VXP	Fixo	Sistema de Transporte	1016083;Lash chain 05B, one side	Alongado	A.3	Crescente	MPC - Inspeção visual (Mensal e Anual)	TI	17,07	315	Baixa	1281,73
				Sujo	A.3	Crescente		TI			Baixa	
VXP +; VXP + DT	Fixo	Sistema de Transporte	Roller chain 05B1;1132349	Alongado	A.3	Crescente	MPC - Inspeção visual (Mensal e Anual)	TI	13	315	Baixa	662,79
				Sujo	A.3	Crescente		TI			Baixa	
Todas	Fixo	Sistema de Transporte	Strip brush STL4006 38mm;1130568	Fios danificados	B.1	Crescente	MPC - Inspeção visual (Mensal)	TD	66	150		4,13
				Sujo	B.1	Crescente	MPC - Inspeção visual (Mensal)	TD				
Todas	Fixo	Sistema de Transporte	Roller chain special 4mm;1110437	Alongado	A.3	Crescente	MPC - Inspeção visual (Mensal e Anual)	TI	32,44	315	Baixa	276,44
				Sujo	A.3	Crescente		TI			Baixa	
								Total	3369,51			
								Tipos de componentes	14			
								Média	240,68			

O tempo de paragem requerido para a substituição dos tipos de componentes identificados na Tabela 62 foi estimado com base na soma dos seguintes tempos: tempo de arrefecimento do equipamento, tempo de substituição do componente e tempo de aquecimento do equipamento. Porém, salienta-se que o tempo de paragem poderá ser superior ao valor de referência, quando as substituições são realizadas no âmbito de ações de MC, devido a dificuldades inerentes ao diagnóstico da falha.

O tempo de arrefecimento requerido para realizar a substituição, em segurança, é de 30 minutos para os componentes do Sistema de Refrigeração e de 90 minutos para os componentes do Sistema de Aquecimento e do Sistema de Transporte. Após a substituição, o tempo de aquecimento necessário para reestabelecer o funcionamento do equipamento é de 45 minutos.

5.5.4. Definição dos parâmetros da política de MPS

A política de MPS proposta com base na informação associada aos modos de falha dos componentes “1019449;panel filter mediumF9,536x193x44” e “FLUOR FILTER ;4207.0101 (1019435)” envolve a realização de substituições após ter de sido processada uma quantidade predefinida de pasta de solda (limite de utilização) ou depois de ocorrer a falha do componente. Assim, para estes tipos de componentes, será estabelecido um limite de utilização expresso em “Kg de pasta de solda”. Ou seja, o limite de substituição preventiva (t_p) passará a ser definido com base no uso. Este limite será ajustado gradualmente com base na análise dos valores relativos à quantidade de pasta processada até se verificar uma perda significativa de desempenho do componente.

A política atual envolve a substituição do componente em intervalos de tempo regulares definidos com base na experiência (ver Apêndice VII). Contudo, na prática, verifica-se que alguns componentes são substituídos quando ainda estão longe do fim do seu tempo de vida útil. A alteração recomendada baseia-se na análise das causas dos modos de falha e tem em conta as seguintes constatações: o desenvolvimento dos modos de falha é influenciado pela quantidade de pasta processada e a quantidade de pasta processada é variável, uma vez que depende do produto fabricado. Com esta alteração, pretende-se reduzir o número de substituições dos filtros, sem aumentar o número de avarias do equipamento.

Para se poder monitorizar a quantidade de pasta processada entre substituições de forma automática, foi definida uma aplicação informática destinada a cruzar os registos de substituição preventiva dos filtros com os registos de produção. A aplicação permite que a atualização das quantidades associadas a cada componente seja efetuada em tempo real.

No caso do “1019449;panel filter mediumF9,536x193x44”, serão definidos limites de utilização referentes a três combinações distintas, tais como:

1. Filtro das máquinas Rehm VXP;
2. Filtro da zona 1 das máquinas Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT;
3. Filtro da zona 2 das máquinas Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT.

Desta forma, os filtros da zona 1 e da zona 2 das máquinas Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT poderão deixar de ser substituídos em simultâneo, caso se verifique que a substituição individual é mais vantajosa financeiramente do que a substituição em grupo.

A taxa de acumulação de resíduos no interior da máquina de soldadura tende a aumentar com a perda gradual de eficácia do componente. Por isso, na definição do limite de utilização do “1019449;panel filter mediumF9,536x193x44”, será considerado o desempenho do componente. Para esse efeito, foram instalados sensores de pressão em dois pontos de medição, situados nas zonas de entrada e de saída do fluxo de ar que atravessa o filtro, de uma das máquinas de soldadura. Os valores medidos pelos sensores serão comparados com a quantidade de pasta processada, de forma a definir um limite que permita assegurar um desempenho satisfatório.

5.5.5. Estimativa dos custos de manutenção: componentes com modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores

Os custos da política de manutenção associada aos tipos de componentes que têm modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores foram estimados recorrendo aos dados dos registos de consumos das 23 máquinas de soldadura.

Na estimativa do C_f (Tabela 63), só foram considerados o C_{ps} , o C_{mo} e o C_{pp} . O C_{ps} corresponde ao preço do componente, registado no SAP, em março de 2021. Enquanto o C_{mo} e o C_{pp} foram estimados com base nos valores de referência especificados na subsecção 5.4.4. O C_{pq} e o C_{ops} não foram contemplados na estimativa do C_f , devido à ausência de dados quantitativos adequados. Porém, salienta-se que existem evidências que demonstram que o desenvolvimento dos modos de falha associados às correntes de transporte pode originar perdas de qualidade (ver subsecção 5.5.2).

O “Heating element 1186410” é o tipo de componente que tem o C_f mais elevado (2105,25 €). Isto deve-se ao seu elevado custo de aquisição e ao elevado tempo de paragem requerido para realizar a substituição e reiniciar o funcionamento do equipamento.

Tabela 63 – Custo de falha dos componentes que têm modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).

Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT															
Subconjunto	Componente	Quantidade			Modos de falha	Tempo de paragem (minutos)	Custo de paragem (€)	Número de substituições	C_{ps}	C_{mo}	C_{pq}	C_{pp}	C_{ops}	C_f	Política atual
		(1)	(2)	(3)											
Sistema de Aquecimento	Heating element 1186410	1	1	1	Danificado	225	393,00	0	1 605,00	107,25	0	393,00	0	2 105,25	MC
Sistema de Monitorização	FLUOR FILTER ;4207.0101 (1019435)	1	1	1	Obstruído	30	52,40	675	17,80	14,30	0	52,40	0	84,50	MPS (Mensal)
Sistema de Refrigeração – Mangueira	1019551;Rectus Cap Coupling; 4217.0029	3	4	4	Entupido	85	148,47	79	46,79	40,52	0	148,47	0	235,78	MPC - Inspeção visual (Quinzenal)
Sistema de Refrigeração – Mangueira	Rectus Locking Nipple;4217.0030;1019552	3	4	4	Entupido	85	148,47	55	27,35	40,52	0	148,47	0	216,34	MPC - Inspeção visual (Quinzenal)
Sistema de Refrigeração	1019449;panel filter mediumF9,536x193x44	1	2	2	Obstruído	85	148,47	2 215	15,63	40,52	0	148,47	0	204,62	MPS (Quinzenal)
Sistema de Refrigeração	EC Gas Fan 24VDC/2,5A ,54W;1094107	1	1	1	Bloqueado	90	157,20	5	340,52	42,90	0	157,20	0	540,62	MPC - Inspeção visual (Mensal)
Sistema de Refrigeração	Water pump MH1203-1/E3-3/80 50Hz;1093504	1	1	1	Palhetas danificadas	255	445,40	0	569,40	121,55	0	445,40	0	1 136,35	MC
Sistema de Refrigeração; Sistema de Ventilação	KF-center ring DN 50;4400.0047;1020024	3	9	12	Deformado	85	148,47	82	11,68	40,52	0	148,47	0	200,67	MPC - Inspeção visual (Mensal)

Legenda C_f inferior ao valor médio C_f superior ao valor médio

Subconjunto	Componente	Quantidade			Modos de falha	Tempo de paragem (minutos)	Custo de paragem (€)	Número de substituições	C_{ps}	C_{mo}	C_{pq}	C_{pp}	C_{ops}	C_f	Política atual
		(1)	(2)	(3)											
Sistema de Refrigeração; Sistema de Ventilação	KF-center ring DN 40; 4400.0044;1020022	4	4	3	Deformado	85	148,47	63	11,47	40,52	0	148,47	0	200,46	MPC - Inspeção visual (Mensal)
Sistema de Transporte	1016083;Lash chain 05B, one side	1	0	0	Alongado; Sujo	315	550,20	17,07	1 281,73	150,15	0	550,20	0	1 982,08	MPC - Inspeção visual (Mensal e Anual)
Sistema de Transporte	Roller chain 05B1;1132349	0	1	2	Alongado; Sujo	315	550,20	13	662,79	150,15	0	550,20	0	1 363,14	MPC - Inspeção visual (Mensal e Anual)
Sistema de Transporte	Roller chain special 4mm;1110437	2	2	4	Alongado; Sujo	315	550,20	32,44	276,44	150,15	0	550,20	0	976,79	MPC - Inspeção visual (Mensal e Anual)

⁽¹⁾ Rehm VXP; ⁽²⁾ Rehm VXP+; ⁽³⁾ Rehm VXP+ DT.

O “Water pump MH1203-1/E3-3/80 50Hz;1093504” e as correntes de transporte também apresentam um C_f superior ao C_f médio dos 12 tipos de componentes considerados (770,55 €).

Depois de ter sido estimado o C_f , determinou-se o valor médio anual do C_{PA} para o conjunto de 23 máquinas de soldadura, onde cada tipo de componente é utilizado, por máquina e por unidade de componente (Tabela 64).

O “Heating element 1186410” e o “Water pump MH1203-1/E3-3/80 50Hz;1093504” não foram substituídos até 31 de março. Por isso, tendo em conta que a MC é a política associada a ambos os componentes, considerou-se que o C_{PA} correspondente é igual 0 €. Para os restantes tipos de componentes, o custo das substituições preventivas tem um impacto bastante mais elevado no valor do C_{PA} do que o custo das substituições corretivas. De acordo com os registos de falhas das 23 máquinas de soldadura, apenas 3 dos 12 tipos de componentes identificados na Tabela 63 foram substituídos no âmbito das ações de MC.

A estimativa do custo anual das substituições corretivas baseia-se no pressuposto de que o motivo da avaria do equipamento foi o funcionamento irregular do componente substituído. Porém, na maioria dos casos, os registos não permitem identificar a origem da avaria. Além disso, por vezes, foi necessário substituir e/ou ajustar outros componentes na mesma intervenção.

O “1019449;panel filter mediumF9,536x193x44” apresenta o C_{PA} por unidade mais elevado (1010,15 €/ano). Contudo, o valor estimado para as máquinas Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT é significativamente mais baixo (661,78 €/ano), visto que, em cada ação de MPS, são substituídas 2 unidades. Por outro lado, os vedantes e os engates têm associados custos inferiores aos restantes tipos de componentes. Por este motivo, a aplicação da MPC/TD aos seus modos de falha deverá envolver gastos mais reduzidos.

As estimativas obtidas permitiram constatar que poderão ser alcançados ganhos significativos, se for evitada a substituição prematura dos tipos de componentes que têm associadas políticas de MPS. Salienta-se ainda que, embora os custos de substituição corretiva sejam reduzidos para os componentes que têm associadas políticas de MPC, não se pode concluir que as políticas utilizadas são eficazes. Isto verifica-se porque as perdas de desempenho e as perdas de qualidade, que ocorrem quando os respetivos modos de falha estão em desenvolvimento, não são quantificadas. Desta forma, considera-se que a aplicação da MPC utilizando sensores irá permitir alcançar ganhos de eficiência, detetando mais cedo o funcionamento irregular do componente. Por isso, salienta-se a importância de se verificar a aplicabilidade da MPC utilizando sensores aos modos de falha dos componentes que têm contacto direto com o produto.

Tabela 64 – Custo da política de manutenção atual dos componentes que têm modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).

Subconjunto	Componente	Número de substituições corretivas/ano	Número de substituições preventivas/ano	C_p	Custo das substituições corretivas/ano	Custo das substituições preventivas/ano	Custo de utilização da política/ano	C_{PA}/ano	$C_{PA}/(máquina \times ano)$	$C_{PA}/(unidade \times ano)$
Sistema de Monitorização	FLUOR FILTER ;4207.0101 (1019435)	0,07	8,15	32,10	141,01	6 015,55	0	6 156,57	267,68	267,68
Sistema de Refrigeração – Mangueira e Radiador	1019551;Rectus Cap Coupling; 4217.0029	0	0,82	51,56	0	969,85	231,66 ⁽³⁾	1 201,51	52,24	7,42
Sistema de Refrigeração – Mangueira e Radiador	Rectus Locking Nipple;4217.0030;1019552	0	2,39	32,12	0	1 766,42	231,66 ⁽³⁾	1 998,08	86,87	12,33
Sistema de Refrigeração	1019449;panel filter mediumF9,536x193x44	0,03	17,87	56,15 ⁽¹⁾	72,61	11 038,92	0	11 111,70	1 010,15	1 010,15
Sistema de Refrigeração	1019449;panel filter mediumF9,536x193x44	0,17	16,91	76,24 ⁽²⁾	411,66	15 470,95	0	15 882,60	1 323,55	661,78
Sistema de Refrigeração	EC Gas Fan 24VDC/2,5A ,54W;1094107	0,03	0,05	347,67	369,67	379,79	1 973,40	2 722,87	118,39	118,39
Sistema de Refrigeração; Sistema de Ventilação	KF-center ring DN 50;4400.0047;1020024	0	1,39	16,45	0	526,85	471,90 ⁽⁴⁾	998,75	43,42	6,05
Sistema de Refrigeração; Sistema de Ventilação	KF-center ring DN 40; 4400.0044;1020022	0	1,09	16,24	0	405,73	240,24 ⁽⁴⁾	645,97	28,09	7,69
Sistema de Transporte	1016083;Lash chain 05B, one side	0	0,29	1 367,53	0	4 435,06	0	4 435,06	403,19	403,19
Sistema de Transporte	Roller chain 05B1;1132349	0	0,36	748,59	0	3 273,62	0	3 273,62	272,80	81,84
Sistema de Transporte	Roller chain special 4mm;1110437	0	1,13	362,24	0	4 933,66	0	4 933,66	411,14	123,34

⁽¹⁾ Substituição de 1 unidade nas máquinas Rehm VXP; ⁽²⁾ Substituição de 2 unidades nas máquinas Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT; ⁽³⁾ O tempo de inspeção por par de engates é de 0.5 minutos; ⁽⁴⁾ O tempo de inspeção por unidade é de 0.5 minutos.

5.5.6. Identificação dos modos de falha prioritários para a implementação da MPC

Os 15 modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores foram analisados com vista a definir prioridades. Em seguida, são descritas as etapas envolvidas na priorização dos modos de falha para a análise da viabilidade da MPC/TD utilizando sensores.

5.5.6.1. Listagem dos parâmetros mensuráveis com os sensores existentes

A observação das máquinas de soldadura permitiu verificar que somente 3 dos 14 tipos de componentes analisados têm associados sensores, nomeadamente o “Heating element 1186410”, o “Water pump MH1203-1/E3-3/80 50Hz;1093504” e o “EC Gas Fan 24VDC/2,5A ,54W;1094107”. Esta informação foi registada no formulário F3 (Tabela 65).

Tabela 65 – Formulário “F3 – Parâmetros mensuráveis com os sensores existentes” (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).

Subconjunto	Componente	Tipo de sensor	Parâmetro
Sistema de Aquecimento	Heating element 1186410	Sensor de temperatura (Termopar)	Temperatura
Sistema de Refrigeração	Water pump MH1203-1/E3-3/80 50Hz;1093504	Sensor de caudal	Caudal
Sistema de Refrigeração	EC Gas Fan 24VDC/2,5A ,54W;1094107	Sensor de frequência (Encoder)	Velocidade de rotação

As medições realizadas pelos três tipos de sensores identificados são utilizadas pelo sistema que controla o funcionamento do equipamento definido pelo fabricante. Assim, é possível detetar, de forma automática, problemas que afetam o funcionamento dos componentes aos quais estão associados. No entanto, os valores medidos não estão a ser registados e utilizados para prever ou detetar os modos de falha na sua fase de desenvolvimento.

5.5.6.2. Identificação dos parâmetros relacionados com os modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD

Os parâmetros relacionados com os modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores foram definidos com base na descrição dos sintomas e no conhecimento da equipa de projeto. Depois, o formulário F4 (Tabela 66) foi utilizado para verificar a disponibilidade de sensores para adquirir dados referentes a cada combinação “modo de falha – parâmetro”.

Tabela 66 – Formulário “F4 – Parâmetros a analisar e disponibilidade de sensores” (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).

Subconjunto	Componente	Modo de falha	Parâmetro	Sensores
Sistema de Aquecimento	Heating element 1186410	Danificado	Intensidade de corrente	Não
			Temperatura	Sim
Sistema de Monitorização	FLUOR FILTER ;4207.0101 (1019435)	Obstruído	Caudal	Não
			Pressão	Não
Sistema de Refrigeração	1019449;panel filter mediumF9,536x193x44	Obstruído	Pressão	Não
			Temperatura	Não
	Water pump MH1203-1/E3-3/80 50Hz;1093504	Palhetas danificadas	Caudal	Sim
			Frequência de vibração	Não
Sistema de Refrigeração - Mangueira	1019551;Rectus Cap Coupling; 4217.0029	Entupido	Temperatura	Não
			Pressão	Não
			Caudal	Não
Sistema de Refrigeração - Mangueira	Rectus Locking Nipple;4217.0030;1019552	Entupido	Temperatura	Não
			Pressão	Não
			Caudal	Não
Sistema de Refrigeração	EC Gas Fan 24VDC/2,5A ,54W;1094107	Bloqueado	Intensidade de corrente	Sim
			Velocidade de rotação	Sim
Sistema de Refrigeração; Sistema de Ventilação	KF-center ring DN 50;4400.0047;1020024	Deformado	ppm de O ₂	Não
	KF-center ring DN 40; 4400.0044;1020022	Deformado	ppm de O ₂	Não
Sistema de Transporte	1016083;Lash chain 05B, one side	Alongado	Alongamento	Não
			Frequência de oscilação	Não
			Intensidade de corrente	Não
			Tensão mecânica	Não
	Sujo	Sujo	Alongamento	Não
			Frequência de oscilação	Não

Subconjunto	Componente	Modo de falha	Parâmetro	Sensores
			Intensidade de corrente	Não
			Tensão mecânica	Não
	Roller chain 05B1;1132349	Alongado	Alongamento	Não
			Frequência de oscilação	Não
			Intensidade de corrente	Não
			Tensão mecânica	Não
		Sujo	Alongamento	Não
			Frequência de oscilação	Não
			Intensidade de corrente	Não
			Tensão mecânica	Não
	Roller chain special 4mm;1110437	Alongado	Alongamento	Não
			Frequência de oscilação	Não
			Intensidade de corrente	Não
			Tensão mecânica	Não
		Sujo	Alongamento	Não
			Frequência de oscilação	Não
Intensidade de corrente			Não	
Tensão mecânica			Não	

A informação registada no formulário F4 permite constatar que existem sensores relativos a apenas 4 das 43 combinações “modo de falha – parâmetro”. No entanto, cada um destes casos, deve ser sujeito a uma análise de viabilidade técnica, para verificar a adequação dos sensores que estão a ser utilizados e a necessidade de instalar outros sensores no equipamento.

5.5.6.3. Classificação da relação entre os parâmetros e os modos de falha

A classificação da relação entre os parâmetros e os modos de falha foi auxiliada por um técnico especialista das máquinas de soldadura. Os resultados obtidos foram registados no formulário F5 (Tabela 67). A análise dos resultados mostra que todos os modos de falha candidatos à aplicação da MPC têm uma relação “Muito evidente” (Nível 1) com pelo menos um parâmetro. Das 43 combinações “modo de falha – parâmetro” analisadas, 30 têm uma relação “Muito evidente” e 13 têm uma relação “Evidente” (Nível 2).

Tabela 67 – Formulário “F5 – Relação entre os parâmetros e os modos de falha” (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).

Subconjunto/ Componente/ Modo de falha	Criticidade/ Subcategoria	Alongamento	Caudal	Frequência de oscilação	Frequência de vibração	Intensidade de corrente	ppm de O ₂	Pressão	Temperatura	Tensão mecânica	Velocidade de rotação
Sistema de Aquecimento											
Heating element 1186410	Vital					-			Sensor de temperatura		
Danificado	A.3					1			1		
Sistema de Monitorização											
FLUOR FILTER ;4207.0101 (1019435)	Vital		-					-			
Obstruído	A.3		1					1			
Sistema de Refrigeração											
1019449;panel filter mediumF9,536x193x44	Vital							-	-		
Obstruído	A.3							1	2		
Water pump MH1203-1/E3-3/80 50Hz;1093504	Vital		Sensor de caudal		-				-		
Palhetas danificadas	A.3		2		1				2		
EC Gas Fan 24VDC/2,5A ,54W;1094107	Vital					Encoder					Encoder
Bloqueado	A.3					1					1
Sistema de Refrigeração - Mangueira											
1019551;Rectus Cap Coupling; 4217.0029	Vital		-					-	-		
Entupido	A.3		1					1	2		
Rectus Locking Nipple;4217.0030;1019552	Vital		-					-	-		
Entupido	A.3		1					1	2		
Sistema de Refrigeração; Sistema de Ventilação											
KF-center ring DN 50;4400.0047;1020024	Essencial							-			
Deformado	B.2							2			
KF-center ring DN 40;4400.0044;1020022	Essencial							-			

Subconjunto/ Componente/ Modo de falha	Criticidade/ Subcategoria	Alongamento	Caudal	Frequência de oscilação	Frequência de vibração	Intensidade de corrente	ppm de O ₂	Pressão	Temperatura	Tensão mecânica	Velocidade de rotação
Deformado	B.2						2				
Sistema de Transporte											
1016083;Lash chain 05B, one side	Vital	-		-		-				-	
Alongado	A.3	1		1		2				1	
Sujo	A.3	1		1		2				1	
Roller chain 05B1;1132349	Vital	-		-		-	-			-	
Alongado	A.3	1		1		2				1	
Sujo	A.3	1		1		2				1	
Roller chain special 4mm;1110437	Vital	-		-		-	-			-	
Alongado	A.3	1		1		2				1	
Sujo	A.3	1		1		2				1	

5.5.6.4. Definição de prioridades

A ordenação dos modos de falha para a análise da viabilidade da MPC/TD utilizando sensores é apresentada na Tabela 68. Na coluna “custo total”, encontra-se o custo de todas as unidades do tipo de componente ao qual está associado o modo de falha, substituídas nas 23 máquinas de soldadura, no período entre 09 de março de 2011 e 31 de março de 2021. Os resultados obtidos mostram que existem diferenças significativas entre tipos de componentes no que diz respeito ao custo unitário e ao número de substituições. Esta facto reforça a importância da utilização do critério “custo total dos componentes substituídos” na definição de prioridades.

O modo de falha “Bloqueado” referente ao “EC Gas Fan 24VDC/2,5A ,54W;1094107” é aquele que ocupa o primeiro lugar na lista de prioridades. Este tipo de componente foi substituído por um componente novo apenas cinco vezes, o que corresponde a um custo total de 1 702,60 €. O valor obtido representa apenas cerca de 5% do valor mais elevado da lista de prioridades. No entanto, salienta-se que a ocorrência do modo de falha “Bloqueado” não implica a substituição definitiva do componente. Na maioria dos casos, o componente é sujeito a uma operação de limpeza corretiva ou preventiva. Por outro lado, também é necessário ter em conta que o funcionamento irregular do componente pode ser motivado pelo “entupimento” da tubagem do circuito em que se encontra inserido. Assim, a monitorização da “velocidade de rotação” e/ou da “Intensidade de corrente” poderá permitir antever a ocorrência de dois modos de falha responsáveis pela redução do fluxo de ar no circuito.

Os modos de falha que se seguem na lista de prioridades são relativos aos componentes “Heating element 1186410” e “Water pump MH1203-1/E3-3/80 50Hz;1093504”. O “Heating element 1186410” tem um “sensor de temperatura” acoplado a uma das nove resistências. No entanto, a aplicação da MPC ao modo de falha deste componente requer a associação de um “sensor de temperatura” ou “sensor de corrente” a cada uma das 9 resistências. No caso do modo de falha do “Water pump MH1203-1/E3-3/80 50Hz;1093504”, existe a convicção de que a análise de vibrações é a técnica de MPC mais apropriada porque permitirá detetar o modo de falha numa fase mais inicial e distinguir diferentes tipos de anomalias. Porém, para monitorizar a “frequência de vibração”, será necessário instalar novos sensores no equipamento. Em ambos os casos, a instalação de novos sensores contribuirá para aumentar significativamente o custo de implementação da MPC.

Tabela 68 – Lista de prioridades (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).

Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT

Legenda

O componente tem associada uma ou mais ações de MPC/TD subjetivas

O componente não tem associada nenhuma ação de MPC/TD

Subconjunto	Componente	Modo de falha	Tipo de sensor	Relação mais forte	Nº de substituições	Custo unitário	Custo total	Criticidade	Subcategoria
Sistema de Refrigeração	EC Gas Fan 24VDC/2,5A ,54W;1094107	Bloqueado	Encoder	1	5	340,52	1 702,60	Vital	A.3
Sistema de Aquecimento	Heating element 1186410	Danificado	Sensor de temperatura	1	0	1 605,00	0	Vital	A.3
Sistema de Refrigeração	Water pump MH1203-1/E3-3/80 50Hz;1093504	Palhetas danificadas	Sensor de caudal	1	0	569,40	0	Vital	A.3
Sistema de Refrigeração	1019449;panel filter mediumF9,536x193x44	Obstruído	-	1	2 215	15,63	34 620,45	Vital	A.3
Sistema de Transporte	1016083;Lash chain 05B, one side	Alongado	-	1	17,07	1 281,73	21 879,13	Vital	A.3
		Sujo	-	1					A.3
Sistema de Monitorização	FLUOR FILTER ;4207.0101 (1019435)	Obstruído	-	1	675	17,80	12 015,00	Vital	A.3
Sistema de Transporte	Roller chain special 4mm;1110437	Alongado	-	1	32,44	276,44	8 967,71	Vital	A.3
		Sujo	-	1					A.3
Sistema de Transporte	Roller chain 05B1;1132349	Alongado	-	1	13	662,79	8 616,27	Vital	A.3
		Sujo	-	1					A.3
Sistema de Refrigeração - Mangueira	1019551;Rectus Cap Coupling; 4217.0029	Entupido	-	1	79	46,79	3 696,41	Vital	A.3
Sistema de Refrigeração - Mangueira	Rectus Locking Nipple;4217.0030;1019552	Entupido	-	1	55	27,35	1504,25	Vital	A.3
Sistema de Refrigeração; Sistema de Ventilação	KF-center ring DN 50;4400.0047;1020024	Deformado	-	2	82	11,68	957,76	Essencial	B.2
Sistema de Refrigeração; Sistema de Ventilação	KF-center ring DN 40; 4400.0044;1020022	Deformado	-	2	63	11,47	722,61	Essencial	B.2

O modo de falha “Obstruído” associado ao componente “1019449;panel filter mediumF9,536x193x44” tem o valor mais elevado no critério “custo total dos componentes substituídos” (34 620,45 €). No entanto, caso se verifique que pode ser definido um sistema de MPC idêntico para todas as correntes de transporte, considera-se que deverá ser dada uma prioridade maior aos modos de falha associados aos componentes “1016083;Lash chain 05B, one side”, “Roller chain 05B1;1132349” e “Roller chain special 4mm;1110437”. Esta decisão é justificada pelo facto de o valor da soma do “custo total dos componentes substituídos” ser superior (39 463,11 €).

Desta forma, o modo de falha “Obstruído”, relativo ao “FLUOR FILTER ;4207.0101 (1019435)”, também terá uma prioridade mais baixa do que as correntes de transporte. A aplicação da MPC aos modos de falha associados aos filtros tem como principal vantagem estender o tempo de utilização destes tipos de componentes, visto que a acumulação de sujidade não depende somente do tempo de utilização. Por este motivo, em situações excecionais, os técnicos optam por adiar a substituição dos filtros para a ação de manutenção preventiva seguinte. Esta decisão resulta sempre de uma análise subjetiva.

O modo de falha “Entupido”, relativo aos componentes “1019551;Rectus Cap Coupling; 4217.0029” e “Rectus Locking Nipple;4217.0030;1019552”, tem uma prioridade mais baixa do que os restantes modos de falha candidatos à aplicação da MPC. Tendo em conta que os dois tipos de componentes têm características idênticas e fazem parte do mesmo subconjunto, é conveniente definir um sistema de MPC comum.

O modo de falha “Deformado”, associado ao “KF-center ring DN 50;4400.0047;1020024” e ao “KF-center ring DN 40; 4400.0044;1020022”, é candidato à aplicação de uma TD. Este modo de falha tem uma relação de Nível 2 com o parâmetro a monitorizar (“ppm de O_2 ”). Por isso, encontra-se no fim da lista de prioridades. O sistema de deteção do modo de falha poderá ser idêntico para ambos os tipos de componentes, visto que realizam a mesma função e só diferem na sua dimensão.

Após a análise da lista de prioridades, os responsáveis da área da manutenção tomaram as decisões descritas em seguida.

- Excluir da análise os modos de falha referentes aos tipos de componentes que não têm associadas substituições. Tendo em conta os meios tecnológicos disponíveis e o respetivo histórico de funcionamento, considerou-se que os potenciais benefícios da aplicação da MPC não superam o custo e o esforço requeridos. Contudo, a viabilidade financeira da aplicação da MPC poderá ser analisada de forma mais rigorosa, quando existirem dados que permitam estimar o MTTF destes tipos de componentes.

- Realizar a análise da viabilidade da aplicação da MPC aos modos de falha associados aos filtros somente depois de serem estimados os custos da política de MPS descrita na subsecção 5.5.4, para que possa ser estabelecida uma comparação entre ambas as políticas.
- Começar por analisar a viabilidade da MPC para os modos de falha do “EC Gas Fan 24VDC/2,5A ,54W;1094107” e das correntes de transporte.

A análise da viabilidade da aplicação da MPC ao modo de falha do “EC Gas Fan 24VDC/2,5A ,54W;1094107” será realizada recorrendo aos dados obtidos pelo “Encoder” instalado no equipamento. Neste caso, irá começar-se por comparar os valores medidos durante o funcionamento de ventiladores com diferentes níveis de sujidade, a fim de verificar se existem diferenças significativas. No entanto, não foi possível reunir dados suficientes para análise no período concedido para a realização do caso de estudo, visto que o estado dos ventiladores só é verificado mensalmente. Por este motivo, nas subsecções seguintes, é abordada somente a análise relativa aos modos de falha das correntes de transporte.

As correntes de transporte das máquinas de soldadura são de dois tipos: corrente lateral e corrente central (Figura 57). Nas máquinas Rehm VXP e Rehm VXP+, o Sistema de Transporte é constituído por uma corrente central e duas correntes laterais, e, nas máquinas Rehm VXP+ DT, por duas correntes centrais e quatro correntes laterais. Durante o transporte, as correntes movem-se com uma velocidade constante, definida de acordo com as características do produto. A velocidade de operação mais usual é de aproximadamente 850 mm/min.

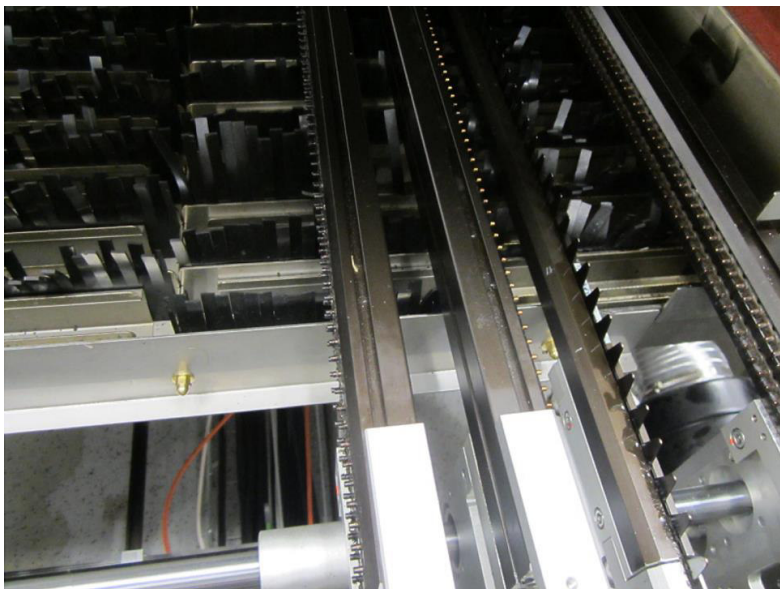


Figura 57 – Sistema de Transporte.

As correntes laterais têm a função de transportar os PCBs ao longo da câmara da máquina de soldadura e a corrente central tem a função de suportar os PCBs, para que estes não sofram deformação por ação térmica: “*bending*”. As correntes laterais contactam sempre com os PCBs durante o transporte. Enquanto a corrente central só tem contacto com o produto quando é requerido. Esta necessidade é avaliada durante a produção de amostras, na fase inicial da produção.

Durante o funcionamento da máquina de soldadura, as correntes de transporte acumulam quantidades significativas de resíduos. A acumulação de sujidade deve-se ao contacto com os resíduos libertados durante o processo de soldadura. Por isso, todas as correntes são limpas, periodicamente, recorrendo a um solvente apropriado. No entanto, dado que as operações de limpeza não são totalmente eficazes, verifica-se uma acumulação progressiva e irreversível de resíduos na sua superfície. O excesso de sujidade contribui para o funcionamento irregular das correntes, nomeadamente uma maior força de movimentação e incerteza no arrasto, provocando vibração.

Com o uso, as correntes também tendem a alongar. O alongamento ocorre devido à ação isolada ou combinada de fatores, tais como o calor, o desgaste e o funcionamento incorreto do respetivo tensor. Quando o equipamento inicia o seu funcionamento, o aumento de temperatura causa sempre um aumento do comprimento do componente, devido à dilatação do material. Em condições normais, este alongamento é compensado pelo tensor. Contudo, o desgaste decorrente da utilização do componente contribui para que o aumento do comprimento se acentue gradualmente, até deixar de ser compensado pelo tensor. Esta circunstância resulta no aumento da “frequência de oscilação” e na diminuição da “tensão mecânica” do componente.

Nas subsecções seguintes, são apresentados os resultados da análise da viabilidade do sistema definido para aplicar a MPC utilizando sensores aos modos de falha das correntes laterais “Roller chain special 4mm;1110437”. O conhecimento adquirido nesta análise será posteriormente aplicado para definir sistemas de MPC para os modos de falha das correntes centrais “1016083;Lash chain 05B, one side” e “Roller chain 05B1;1132349”, com base nos mesmos princípios teóricos.

5.5.7. Definição dos dispositivos de medição de dados

O sistema de monitorização desenvolvido utiliza um potenciómetro linear para obter dados destinados a avaliar o desenvolvimento dos modos de falha “alongado” e “sujo” em cada corrente lateral. Por isso, o número de potenciómetros requeridos é igual ao número de correntes laterais existentes nas máquinas de soldadura onde se pretende implementar o sistema.

Os potenciômetros são instalados nos tensores das correntes e visam medir a distância entre a posição instantânea do tensor e o fim do seu curso. O curso do tensor tem uma amplitude de 50 mm. À medida que a corrente alonga, o tensor também alonga e a distância em relação ao fim do curso vai diminuindo. Quando o tensor atinge o fim do seu curso, estendido (0 mm), deixa de ter capacidade para compensar o alongamento da corrente. Assim, a distância entre a posição instantânea do tensor e o fim do seu curso é inversamente proporcional ao alongamento da corrente.

A seleção dos potenciômetros lineares foi realizada com base em sete critérios e seis requisitos específicos. A Tabela 69 mostra as características das duas marcas de potenciômetros lineares identificadas no mercado, que se enquadram nos critérios definidos.

Tabela 69 – Critérios de seleção e características dos potenciômetros lineares.

Critérios	Novotechnik TX2 0050-716-002-101	Contelec KL500-5K0/M-SE
Alcance	50 mm	50 mm
Repetibilidade	0,01 mm	0,05 mm
Linearidade	±0,05 %	±1 %
Posição do conetor	Lateral	Topo
Grau de proteção	IP67	IP65
Prazo de entrega	16 dias	21 dias
Custo unitário	203,90 €	125,15 €

Os requisitos definidos para apoiar a seleção dos potenciômetros lineares são os seguintes:

- Capacidade para efetuar medições ao longo do curso de movimento do tensor (50 mm);
- Repetibilidade do valor medido de pelo menos 0,05 mm;
- Linearidade do valor medido de pelo menos 1%;
- Conetor posicionado na zona lateral do potenciômetro;
- Grau de proteção para ambientes severos IP67;
- O prazo de entrega não deve exceder 30 dias.

A aplicação do método de seleção de sensores (Figura 66) permitiu constatar que somente o potenciômetro “Novotechnik TX2 0050-716-002-101” cumpre todos os requisitos definidos. O potenciômetro “Contelec KL500-5K0/M-SE” tem o conetor posicionado no topo, o que impede a correta instalação do dispositivo, e a sua superfície não tem um grau de proteção adequado ao ambiente de

operação. Por isso, embora o potenciômetro “Contelec KL500-5K0/M-SE” tenha um custo mais reduzido, foi selecionado o potenciômetro “Novotechnik TX2 0050-716-002-101”.

Requisitos de desempenho		Critérios		Total
		Alcance	Repetibilidade	
		50 mm	≤ 0,05	
Sensor	Novotechnik TX2 0050-716-002-101	2	2	4
	Contelec KL500-5K0/M-SE	2	1	2
Total		2		2

(a)

Requisitos físicos		Critérios			Total
		Linearidade	Posição do conetor	Grau de proteção	
		≤ 1%	Conetor lateral	IP67	
Sensor	Novotechnik TX2 0050-716-002-101	2	2	2	8
	Contelec KL500-5K0/M-SE	1	0	0	0
Total		2			1

(b)

Requisitos comerciais		Critérios		Total	Pontuação geral
		Prazo de entrega	Custo normalizado		
		≤ 30 dias	0,1-1		
Sensor	Novotechnik TX2 0050-716-002-101	2	0,1	0,2	6,4
Total		1			1

(c)

Figura 58 – Matrizes relativas aos requisitos de desempenho (a), requisitos físicos (b) e requisitos comerciais (c) dos potenciômetros lineares.

Na Figura 59, é apresentado o potenciômetro linear “Novotechnik TX2 0050-716-002-101” instalado no tensor de uma corrente lateral.



Figura 59 – Potenciômetro linear “Novotechnik TX2 0050-716-002-101”.

5.5.8. Análise do impacto dos modos de falha no parâmetro monitorizado

Os dados medidos pelo potenciômetro associado ao tensor de cada corrente foram registados, de forma automática, no CMMS e num ficheiro local que inclui a seguinte informação:

- Data e hora da medição;
- Designação atribuída ao potenciômetro;
- Distância entre a posição instantânea do tensor e a posição estendido (0 mm);
- Designação do programa de produção;
- Velocidade da corrente de transporte.

A identificação do programa de produção visa facilitar o cruzamento do valor medido pelo potenciômetro com os dados referentes ao controlo da qualidade do produto, efetuado na máquina de inspeção ótica automatizada. Desta forma, o limite que determina a necessidade de substituir a corrente poderá ser definido tendo em conta o impacto do limite posicional.

A Figura 60 mostra um extrato do ficheiro de dados gerado pelo sistema de monitorização. Os dados são relativos a 9 medições consecutivas da “distância entre a posição instantânea do tensor e a posição estendido”. O valor medido é registado sempre que se verifica uma alteração do valor anterior. Por este motivo, os intervalos entre as medições não são regulares.

	A	B	C	D	E
1	Date	Sensor	Elongation (µm)	RhemProgram	Transport speed (mm/min)
2	2021-10-13 13:45:55:237	S2	2004	Reflow_16_Lead_Free.rcp	900
3	2021-10-13 13:45:55:252	S2	1907	Reflow_16_Lead_Free.rcp	900
4	2021-10-13 13:49:12:572	S2	2004	Reflow_16_Lead_Free.rcp	900
5	2021-10-13 13:49:12:588	S2	1907	Reflow_16_Lead_Free.rcp	900
6	2021-10-13 13:53:45:993	S2	2004	Reflow_16_Lead_Free.rcp	900
7	2021-10-13 13:53:46:040	S2	1907	Reflow_16_Lead_Free.rcp	900
8	2021-10-13 13:54:31:668	S2	2004	Reflow_16_Lead_Free.rcp	900
9	2021-10-13 13:54:31:683	S2	1907	Reflow_16_Lead_Free.rcp	900
10	2021-10-13 13:57:55:025	S2	2004	Reflow_16_Lead_Free.rcp	900

Figura 60 – Extrato do ficheiro de dados (correntes laterais).

O gráfico da Figura 61 representa os valores medidos por um potenciómetro linear, entre os dias 01 e 05 de outubro de 2021. Neste intervalo, ocorreram dois períodos de repouso e dois períodos de produção. Quando a máquina de soldadura se encontrava em repouso, os valores medidos situaram-se entre 5000 e 6000 µm. Nos períodos de produção, os valores medidos baixaram rapidamente, com a consequente dilatação da corrente, e permaneceram abaixo dos 3000 µm, até se iniciar um novo período de repouso do equipamento. Contudo, salienta-se que, durante o segundo período de produção, também se verificou uma redução significativa dos valores medidos, que representa um alongamento relevante da corrente.

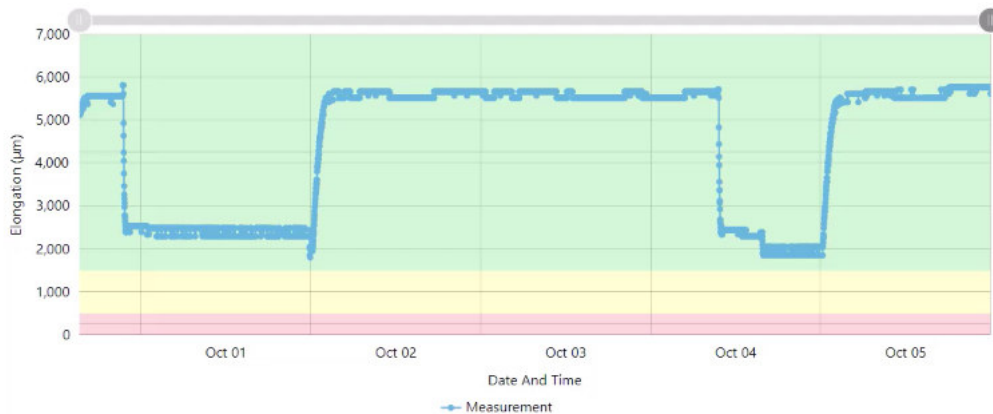


Figura 61 – Representação gráfica da “distância entre a posição instantânea do tensor e a posição estendido”.

O desenvolvimento do modo de falha “alongado” será avaliado observando a evolução dos valores medidos pelo potenciómetro linear. Por isso, foram estabelecidos limites para os valores da “distância entre a posição instantânea do tensor e a posição estendido”. O limite de aviso situa-se nos 1500 µm e o limite crítico nos 500 µm. Isto significa que o alongamento da corrente é adequado se o valor medido for superior 1500 µm. Caso o valor medido se situe entre 1500 e 500 µm, o alongamento ainda é aceitável, no entanto o estado da corrente e o desempenho do processo produtivo deverão ser alvo de uma análise mais atenta. Por exemplo, recomenda-se que, nesta fase, se verifique se o número de produtos defeituosos, identificados no fim da linha, está a aumentar. De forma a evitar que o tensor fique

muito próximo do fim do seu curso, a substituição da corrente deverá ser realizada antes de ser atingido o limite crítico.

No caso do modo de falha “sujo”, a avaliação será baseada nas variações localizadas em momentos específicos do funcionamento. Quando existe sujidade em excesso na corrente, verificam-se variações do esforço do motor e consequentes alterações súbitas de alongamento, observáveis no gráfico. São estas alterações que, uma vez classificadas, permitirão determinar a necessidade de realizar ações de limpeza. A avaliação por diferenciação das alterações apresentadas nos gráficos das mudanças súbitas também permitirá definir o limite de aviso e o limite crítico.

Os valores medidos no final do segundo período de produção encontram-se próximos do limite de aviso, representado no gráfico da Figura 61. Isto significa que a corrente analisada já se encontra perto do fim do seu tempo de vida útil. Com base nos registos de consumos, constata-se que, na data em que foram efetuadas as medições, a corrente tinha um tempo de vida de 20 meses.

Tendo em conta que, em teoria, o tempo de vida útil de uma corrente lateral é de aproximadamente 24 meses, a vida útil restante da corrente analisada é de 4 meses. Porém, salienta-se que este valor varia em função dos tempos de paragem da linha de produção e da quantidade de pasta processada. Este facto contribui para reforçar a importância da aplicação da MPC utilizando sensores para monitorizar o estado das correntes.

Os limites estabelecidos nos gráficos serão ajustados com base na análise dos dados, com vista a melhorar a eficácia das decisões de manutenção.

Para apoiar a tomada de decisão em tempo real, foi criada uma interface que permite visualizar, de forma organizada, informação relativa ao estado de cada corrente da máquina de soldadura e informação relevante relacionada com o processo.

5.5.9. Comparação do custo da MPC com o custo da política atual

O sistema de MPC tem um custo unitário de 868,60 € para as máquinas Rehm VXP e Rehm VXP+, e um custo unitário de 1 276,40 € para a máquina Rehm VXP+ DT. Assim, tendo em conta que 8 das 23 máquinas de soldadura são do subtipo Rehm VXP+ DT, o custo médio de um protótipo é de 1 010,44 €.

A Tabela 70 apresenta o custo dos elementos físicos que constituem os dois protótipos e o custo total de cada protótipo.

Tabela 70 – Custo dos protótipos do sistema de MPC (correntes laterais).

Elementos do protótipo	Custo unitário (€)	Rehm VXP e Rehm VXP+		Rehm VXP+ DT	
		Quantidade	Custo total (€)	Quantidade	Custo total (€)
Potenciômetro linear	203,90	2	407,80	4	815,60
Microcontrolador	454,80	1	454,80	1	454,80
Extensão do cabo USB	6,00	1	6,00	1	6,00
Total			868,60		1 276,40

O elemento do sistema de MPC que apresenta o custo unitário mais elevado é o microcontrolador. No entanto, este dispositivo poderá ser partilhado com outros sistemas de monitorização que venham a ser aplicados no mesmo equipamento. Desta forma, assumindo que a MPC utilizando sensores será aplicada a todos os tipos de componentes que constam na lista de prioridades (Tabela 68), recorrendo ao mesmo microcontrolador, o custo unitário do sistema de MPC é de 455,15 €, para as máquinas Rehm VXP e Rehm VXP+, e de 862,95 € para a máquina Rehm VXP+ DT. Enquanto o custo unitário médio para o conjunto das 23 máquinas de soldadura é de 596,99 €.

A lista de prioridades é composta por 12 tipos de componentes. Porém, nas estimativas, o custo de um microcontrolador foi repartido por 11, visto que as correntes “1016083;Lash chain 05B, one side” e “Roller chain 05B1;1132349” ocupam a mesma posição em máquinas de subtipos diferentes. Desta forma, as estimativas efetuadas representam o valor mínimo que poderá ser despendido no desenvolvimento do sistema proposto para aplicar a MPC aos modos de falha das correntes laterais. Ou seja, o custo unitário médio do sistema de MPC poderá variar entre 596,99 € e 1 010,44 €.

O custo anual médio da política de manutenção associada às correntes laterais “Roller chain special 4mm;1110437” é de 411,14 € por máquina (ver Tabela 64). No entanto, nesta estimativa, não foram consideradas as perdas de qualidade resultantes do funcionamento irregular do componente.

O custo associado à aplicação da MPC utilizando sensores foi comparado com o custo da política atual tendo em conta os seguintes pressupostos:

- O sistema de MPC será utilizado durante um período de 10 anos;
- A duração média das correntes laterais, sem originar perdas de qualidade, é 2 anos.

Considerou-se ainda que o custo anual de operação e manutenção do sistema de MPC é de 7,15 €. Este valor contempla apenas os custos de mão de obra necessária para realizar tarefas de inspeção e/ou de ajuste, visto que se considera que os elementos do sistema têm uma durabilidade superior a 10 anos.

O custo de implementação corresponde à soma do custo unitário médio do sistema de MPC (1 010,44 €) com o C_{mo} correspondente a 2,5 horas de intervenção no equipamento (71,50 €).

Na Tabela 71, são apresentados os custos (por máquina) considerados na comparação do custo associado à aplicação da MPC utilizando sensores com o custo da política atual.

Tabela 71 – Custos considerados na comparação do custo da MPC com o custo da política atual.

Custos	Ano de implementação	Valor acumulado (10 anos)
Custo da política de manutenção atual (€)	411,14	4 111,40
Custo de substituição preventiva (€)	489,02	4 890,20
Custo de operação e manutenção do sistema (€)	7,15	71,50
Custo de implementação (€)	1 081,94	1 081,94

Com base nos valores obtidos, constata-se que só serão gerados ganhos com a implementação do sistema de MPC proposto, se a redução média dos custos decorrentes do funcionamento irregular da corrente (ex.: fabrico de produto defeituoso) for superior a 193,22 €/ano. Porém, assumindo que o microcontrolador será partilhado com os sistemas associados aos restantes tipos de componentes da lista de prioridades, a redução deverá ser superior a 151,88 €/ano.

5.5.10. Análise da viabilidade da MPC utilizando sensores

A comparação do custo da MPC utilizando sensores com o custo da política atual não permitiu demonstrar a viabilidade financeira do sistema de MPC proposto, devido à dificuldade em prever as perdas de qualidade que serão evitadas com a sua aplicação. Contudo, tendo em conta que o custo associado a 1 unidade de PCB poderá atingir os 92,91 € (valor máximo em janeiro de 2021), considera-se que a decisão de implementar o sistema de MPC é aceitável do ponto de vista estratégico, caso se verifique que a sua utilização permite prevenir os custos induzidos pela falha.

No que diz respeito à análise da viabilidade técnica, verificou-se que a monitorização da “distância entre a posição instantânea do tensor e a posição estendido” permite detetar com precisão alterações do alongamento da corrente. No entanto, para aferir com rigor a eficácia do sistema de MPC, será necessário analisar um conjunto mais vasto de dados.

5.6. Síntese dos resultados da implementação

A metodologia desenvolvida foi implementada numa linha de produção composta por 21 máquinas. Inicialmente, as máquinas foram ordenadas de acordo com a sua criticidade, recorrendo ao “M1 – Método para ranking dos equipamentos”. A utilização dos critérios “Tempo de paragem” e “Custo de manutenção” permitiu estimar de forma simples e objetiva o valor de criticidade das diferentes máquinas. No entanto, devido a problemas relacionados com a organização dos registos considerados e à necessidade de corrigir erros esporádicos, não foi possível obter os dados necessários de uma forma direta. Esta circunstância contribuiu para aumentar o tempo despendido na aplicação do método.

A estimativa dos valores de criticidade foi realizada recorrendo a dados dos registos de consumos e dos registos de falhas do equipamento. Estes registos foram consultados em dois sistemas informáticos distintos: SAP e CMMS. Os dados considerados são relativos ao período entre abril de 2018 e outubro de 2020, uma vez que o CMMS só começou a ser utilizado em abril de 2018. Este intervalo corresponde a cerca de 2/3 do período total de atividade da linha, na data em que foi elaborado o ranking. Contudo, existe a convicção de que os valores estimados são representativos.

Na estimativa do “Tempo de paragem”, não se consideraram as paragens relacionadas com problemas de configuração do equipamento (ex.: parametrização incorreta). Tendo em conta que estes eventos também são registados no CMMS, foi necessário filtrar os registos de modo a contemplar apenas as paragens relacionadas com avarias do equipamento. Os dados para estimar o “Custo de manutenção” foram obtidos a partir dos registos de consumos. Porém, em alguns casos, foi necessário excluir registos relativos a componentes cuja aquisição foi imputada erradamente ao tipo de máquina em análise.

Os dois equipamentos com o valor de criticidade mais elevado foram sequencialmente analisados aplicando os métodos e os procedimentos subsequentes da metodologia. Estes equipamentos são a máquina de impressão de pasta Ekra Serio 5000 e a máquina de soldadura Rehm VXP.

Nesta análise, foram considerados os registos de consumos e os registos de falhas das máquinas da linha estudada e de todas as máquinas idênticas existentes no mesmo departamento da empresa. Os registos de consumos das máquinas de impressão de pasta são referentes a 27 máquinas do subtipo Ekra Serio 5000 e abrangem o período entre 29 de julho de 2016 e 31 de dezembro de 2020. Enquanto os registos de consumos das máquinas de soldadura são relativos a 23 equipamentos de 3 subtipos similares (Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT) e foram obtidos no período entre 09 de março de 2011 e 31 de março de 2021. No que diz respeito aos registos de falhas, apenas foram considerados

os dados que estão disponíveis no CMMS da empresa. Estes registos não incluem informação relativa a reparações realizadas no âmbito de ações de manutenção corretiva diferida.

O acesso a dados do histórico de outros equipamentos do parque de máquinas da empresa permitiu obter informação sobre uma quantidade mais vasta de tipos de componentes e acerca dos seus modos de falha. Os registos de consumos foram consultados com o objetivo de obter a seguinte informação:

- Número de substituições associadas a cada tipo de componente;
- Custo unitário de cada tipo de componente (C_{ps});
- Tipo de ação de manutenção em que a substituição foi realizada (corretiva ou preventiva).

Posteriormente, devido à inexistência de dados suficientes para estimar o custo de aplicação das políticas de manutenção para cada combinação “subconjunto – tipo de componente – posição – modo de falha”, a informação relativa ao número de substituições (“Frequência” anual de substituição) foi utilizada para apoiar a seleção da política de manutenção, em conjunto com outros três critérios considerados relevantes. Ou seja, os registos existentes não permitiram identificar a localização do componente substituído e o modo de falha que originou a substituição. Estas informações são particularmente úteis porque alguns tipos de componentes estão presentes em mais do que uma posição do mesmo equipamento e existem componentes que estão sujeitos a mais do que um modo de falha (ex.: correias de transporte).

De forma a possibilitar uma análise mais completa, na atribuição da política de manutenção, também foi considerado o “Tempo de paragem” associado à substituição do componente, a “Complexidade da TI” (quando é aplicável e eficaz) e o “ C_{ps} ”. O “Tempo de paragem” foi determinado a partir dos registos de falhas (valor médio) ou estimado com base na experiência, devido à inexistência de registos.

A análise conjunta dos quatro critérios (“Frequência”, “Tempo de paragem”, “Complexidade da TI” e “ C_{ps} ”) foi efetuada com o auxílio de uma matriz definida para o efeito (ver subsecção 5.4.3). A utilização desta ferramenta conjuntamente com a árvore de decisão AD2 permitiu, de forma rápida, associar políticas de manutenção a todos os modos de falha com função de risco crescente, pertencentes às subcategorias A.1, A.2, A.3 e B.4. Embora a aplicação da matriz se baseie numa análise subjetiva, existe a convicção de que permitiu atribuir a política mais vantajosa financeiramente em todos os casos. Por isso, recomenda-se a sua aplicação, sempre que não existam dados para estimar os custos das políticas de manutenção aplicáveis.

Tendo em conta que a árvore de decisão AD1 apenas requer a realização de uma análise de custos para decidir se deve ser aplicada uma ação de melhoria, considerou-se que não seria útil definir uma matriz para associar a política de manutenção aos modos de falha com função de risco não crescente.

No caso dos tipos de componentes que têm associados modos de falha prioritários para a implementação da MPC/TD utilizando sensores, as informações obtidas a partir dos registos de consumos permitiram estimar o “custo total dos componentes substituídos”, em todo o período considerado, e o valor anual médio do “custo da política atual”. No entanto, salienta-se que os dados existentes apenas permitiram determinar estes custos para a combinação “subconjunto – tipo de componente”.

Os registos de falha também foram consultados para obter informação para a aplicação do “P1 – Procedimento para definir a criticidade dos modos de falha”. Contudo, verificou-se que a maioria dos registos existentes têm informação imprecisa e de difícil interpretação. Por isso, o preenchimento do formulário “F1 – Informação relativa aos componentes críticos” baseou-se sobretudo em informação transmitida pelos engenheiros/técnicos de manutenção.

Na análise relativa à máquina Ekra Serio 5000, foram classificados 80 tipos componentes, pertencentes a 84 combinações “subconjunto – tipo componente”, recorrendo ao “M2 – método de classificação multicritério dos componentes do equipamento”. Os tipos de componentes classificados são somente aqueles que têm um código interno atribuído pela empresa. Estes tipos de componentes foram adquiridos pela empresa para suprir necessidades de substituição imediatas ou futuras. Por isso, nem todos têm consumos associados no período considerado. Assim, os tipos de componentes do equipamento que não constavam na lista de aquisições da empresa não foram alvo de análise. Para os tipos componentes que estão presentes em mais do que um subconjunto do equipamento, classificaram-se todas as combinações “subconjunto – tipo componente”. Desta forma, foram identificados 77 tipos de componentes críticos, pertencentes a 81 combinações “subconjunto – tipo componente”.

No total, foram identificados 116 modos de falha, associados às diferentes combinações “subconjunto – tipo componente”. Com base no “P1 – Procedimento para definir a criticidade dos modos de falha”, foram identificados 114 modos de falha críticos. A análise dos modos de falha críticos permitiu selecionar 35 modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores. Para cada um destes modos de falha, foi possível definir pelo menos um parâmetro a monitorizar a partir da análise dos sintomas. Posteriormente, foi elaborada uma lista que ordena os modos de falha de acordo com a sua prioridade para a implementação da MPC/TD utilizando sensores. Dos 35 modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores, verificou-se que somente 14 são relativos a tipos de componentes que

têm associadas substituições no período considerado. Para os restantes 21 modos de falha, assumiu-se o pressuposto de que a aplicação da MPC/TD utilizando sensores não é financeiramente viável. No entanto, tendo em conta que o modo de falha do componente “Suction hose;2299005870” também foi excluído da análise (ver subsubsecção 5.4.5.4), foram selecionados somente 13 modos de falha para uma análise preliminar, destinada a identificar possíveis soluções de monitorização. Os modos de falha em questão são relativos a 9 tipos de componentes.

Dos 41 modos de falha relativos aos tipos de componentes que já tinham associada uma política de MPC, apenas 10 não são candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores, pelo facto de serem relativos a subconjuntos móveis. Ou seja, dos 35 modos de falha candidatos à aplicação de MPC/TD utilizando sensores, 31 já tinham associada uma política de MPC sem recurso a sensores. Para os 10 modos de falha associados a subconjuntos móveis, propôs-se que continue a ser aplicada a política que está associada ao componente, visto que os registos existentes não permitem efetuar a rastreabilidade destes subconjuntos. Além disso, a instalação de sensores no subconjunto pode dificultar a sua colocação e remoção do equipamento.

As políticas de manutenção foram associadas aos 114 modos de falha críticos. A Tabela 72 mostra o número de vezes que cada uma das políticas consideradas nas árvores de decisão foi atribuída, consoante a subcategoria e o comportamento da função de risco do modo de falha.

Tabela 72 – Número de vezes que as políticas consideradas nas árvores de decisão AD1 e AD2 foram atribuídas (maquinas Ekra Serio 5000).

Modo de falha		Políticas				
Subcategoria	Função de risco	MC	MPS	TI	TD	Ação de Melhoria
A.1	Crescente	0	0	3	0	0
	Não crescente	0	0	0	0	0
A.2	Crescente	0	0	1	0	0
	Não crescente	1	0	0	0	1
A.3	Crescente	8	0	41	0	0
	Não crescente	39	0	0	0	0
B.1	Crescente	0	0	0	7	0
	Não crescente	0	0	0	4	0
B.2	Crescente	0	0	0	3	0
	Não crescente	0	0	0	4	0
B.3	Crescente	0	0	0	1	0
	Não crescente	0	0	0	0	0
B.4	Crescente	0	0	1	0	0
	Não crescente	0	0	0	0	0
Total		48	0	46	19	1

A MC é a política que foi recomendada mais vezes. Esta política foi associada sobretudo a modos de falha da Categoria A, com função de risco não crescente. Na maioria dos casos, a ocorrência destes modos de falha despoleta uma mensagem de erro que bloqueia o funcionamento do equipamento, contribuindo assim para mitigar o custo de falha. Contudo, os tipos de componentes que estão sujeitos aos modos de falha em questão poderão ainda ser analisados com vista a identificar ações de melhoria, destinadas a reduzir os custos induzidos pela falha. Esta análise não foi realizada de imediato devido a restrições de tempo.

A 33 dos 114 modos de falha considerados foi associada uma política de manutenção distinta da política atual (ao nível do componente). No conjunto dos 33 modos de falha, estão incluídos os seguintes:

- 14 modos de falha das subcategorias B.1 e B.2, aos quais foi associada a política TD;
- 9 modos de falha da subcategoria A.3, com função de risco crescente, aos quais foi associada a política TI;
- 9 modos de falha das subcategorias A.1, A.2 e A.3, com função de risco não crescente, aos quais foi associada a política MC;
- 1 modo de falha da subcategoria A.2, ao qual foi associada a política ação de melhoria, com um ganho anual médio de 497,87 € (ver Apêndice VII).

No que diz respeito às máquinas de soldadura, devido a restrições de tempo, a análise focou-se somente em 14 tipos de componentes. A seleção dos tipos de componentes considerados baseou-se no “preço unitário” e no “número de substituições”. Desta forma, foi possível reduzir significativamente o tempo despendido na aplicação da metodologia e assegurar a análise dos tipos de componentes mais relevantes do ponto de vista financeiro. No entanto, salienta-se que a análise realizada para a máquina Ekra Serio 5000 permitiu adquirir um conhecimento mais profundo sobre o funcionamento do equipamento e, em particular, sobre as interações entre os diferentes tipos de componentes. Por este motivo, recomenda-se a utilização destes critérios, para selecionar os componentes a considerar na análise, somente nos casos em que o equipamento tem um histórico de operação relevante e o tempo disponível para a aplicação da metodologia é reduzido.

A associação dos tipos de componente aos respetivos subconjuntos do equipamento permitiu identificar 16 combinações “subconjunto – tipo de componente”. De acordo com a classificação realizada, constatou-se que os 14 tipos de componentes são críticos. A partir da análise das diferentes combinações “subconjunto – tipo de componente”, identificaram-se 19 modos de falha. Estes modos de falha foram todos classificados como críticos e todos têm função de risco crescente. Com base na análise dos

sintomas associados aos modos de falha e tendo em conta o comportamento da função de risco, identificaram-se 15 modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores. Na lista de prioridades, estão incluídos 2 modos de falha relativos a 2 tipos de componentes que não têm associadas substituições no período considerado na análise. Por isso, desta lista, foram selecionados 13 modos de falha referentes a 10 tipos de componentes, com vista a analisar possíveis soluções de monitorização.

Somente 2 modos de falha relativos a tipos de componentes que tinham originalmente associadas políticas de MPC não são candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores, em virtude de não terem sido identificados sintomas relacionados. Assim, para estes modos de falha, recomendou-se que continue a ser aplicada a política existente. As políticas de MPC existentes não recorrem a sensores do equipamento e são sempre baseadas numa análise subjetiva.

As políticas de manutenção consideradas na árvore de decisão AD2 foram associadas aos 19 modos de falha identificados, com o auxílio da matriz de decisão definida previamente. Na Tabela 73, é apresentado o número de vezes que cada uma das políticas foi atribuída, de acordo com a subcategoria e o comportamento da função de risco do modo de falha.

Tabela 73 – Número de vezes que as políticas consideradas na árvore de decisão AD2 foram atribuídas (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).

Modo de falha		Políticas				
Subcategoria	Função de risco	MC	MPS	TI	TD	Ação de Melhoria
A.3	Crescente	2	2	11	0	0
B.1	Crescente	0	0	0	2	0
B.2	Crescente	0	0	0	2	0
Total		2	2	11	4	0

A MC foi recomendada somente para os modos de falha relativos aos tipos de componentes que não têm associadas substituições no período considerado. No caso dos 2 modos de falha aos quais foi associada a MPS, propôs-se que o intervalo de substituição seja definido em função da quantidade de pasta de solda processada na linha de produção. Estes modos de falha são relativos a dois tipos de filtros que já tinham associada uma política de MPS. As políticas TI e TD que foram propostas envolvem somente a inspeção visual do componente, tal como é feito no âmbito das políticas atuais (ver Apêndice VII).

Na Tabela 74, são sintetizados os principais resultados obtidos nas análises efetuadas para a máquina de impressão de pasta e para a máquina de soldadura.

Tabela 74 – Resultados da aplicação da metodologia.

Classificação multicritério dos componentes do equipamento												
Máquinas	Componentes classificados		Categorias dos componentes classificados						Componentes críticos			
			Vital		Essencial		Desejável					
	Un.		Un.	%	Un.	%	Un.	%	Un.	%		
Ekra Serio 5000	80		53	66,25	11	13,75	16	20,00	77	96,25		
Rehm VXP Rehm VXP+ Rehm VXP+ DT	14		10	71,43	3	21,43	1	7,14	14	100		
Total	94		67	71,28	14	14,89	17	18,09	91	96,81		
Definição da criticidade dos modos de falha												
Máquinas	Modos de falha identificados		Categorias dos modos de falha				Modos de falha com função de risco crescente		Modos de falha críticos			
			Categoria A – Falha evidente		Categoria B – Falha oculta							
	Un.		Un.	%	Un.	%	Un.	%	Un.	%		
Ekra Serio 5000	116		96	82,76	20	17,24	69	59,48	114	98,28		
Rehm VXP Rehm VXP+ Rehm VXP+ DT	19		15	78,95	4	21,05	19	100	19	100		
Total	135		111	82,22	24	17,78	88	65,19	133	98,52		
Atribuição da política de manutenção												
Máquinas	MC		MPS		TI		TD		Ação de melhoria		Alterações da política existente	
	Un.	%	Un.	%	Un.	%	Un.	%	Un.	%	Un.	%
	Ekra Serio 5000	48	42,11	0	0	46	40,35	19	16,67	1	0,88	33
Rehm VXP Rehm VXP+ Rehm VXP+ DT	2	10,53	2	10,53	11	57,89	4	21,05	0	0	2	10,53
Total	50	37,59	2	1,50	57	42,86	23	17,29	1	0,75	35	26,32
Identificação dos modos de falha prioritários para a implementação da MPC												
Máquinas	Modos de falhas candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores				Modos de falha selecionados				Componentes selecionados			
	Un.		%		Un.		%		Un.		%	
	Ekra Serio 5000	35		30,70		13		11,40		9		11,69
Rehm VXP Rehm VXP+ Rehm VXP+ DT	15		78,95		13		68,42		10		71,43	
Total	50		37,59		26		19,55		19		20,88	

Os custos da política de manutenção relativa aos componentes que têm associados modos de falha prioritários para a implementação da MPC/TD utilizando sensores foram estimados a partir dos dados

do histórico de funcionamento das máquinas Ekra Serio 5000 (subsecção 5.4.4) e das máquinas de soldadura (subsecção 5.5.4). No entanto, devido à ausência de dados quantitativos apropriados, não foram considerados os custos de perdas de qualidade resultantes da aplicação destas políticas. Com esta estimativa, pretendeu-se obter um valor de referência, para evitar incorrer em despesas excessivas na aquisição dos dispositivos de medição de dados, destinados a verificar a viabilidade técnica da MPC/TD.

A comparação do custo da política de MPC/TD utilizando sensores com o custo da política atual requer estimativas dos custos de implementação e de aplicação da política definida. Porém, para determinar o custo de aplicação da política, é necessário estimar o valor do MTTF dos tipos de componentes aos quais estão associados os modos de falha considerados. No caso do componente “válvula VUVG-B10-M52-RZT-F;573416” (máquina de impressão de pasta) e das correntes de transporte (máquina de soldadura), é preciso ter em conta que a falha funcional pode ser precedida por um intervalo de tempo significativo em que o componente já não tem um desempenho adequado.

Para os modos de falha dos componentes “válvula VUVG-B10-M52-RZT-F;573416” e “Roller chain special 4mm;1110437” (corrente de transporte) foram propostas soluções de monitorização utilizando sensores e a sua viabilidade foi analisada, com base nos dados resultantes do teste dos respetivos protótipos. A seleção destes modos de falha foi realizada tendo em conta a análise das listas de prioridades relativas à máquina de impressão de pasta (ver subsubsecção 5.4.5.4) e à máquina de soldadura (ver subsubsecção 5.5.6.4), respetivamente, e o tempo disponível para o desenvolvimento das soluções.

Em ambos os casos, a ordenação efetuada foi considerada útil e relevante para apoiar a tomada de decisão. Contudo, uma vez que o critério “existência de sensores” é o primeiro a ser considerado na definição da prioridade, os modos de falha associados a alguns tipos de componentes que não tinham associadas substituições ficaram situados em posições elevadas da lista de prioridades. Devido à elevada durabilidade destes tipos componentes, os responsáveis da área de manutenção optaram por excluí-los da análise.

Apesar disso, considerou-se que a ordem pela qual os critérios são aplicados na definição de prioridades deveria manter-se. Esta decisão deve-se ao facto de alguns componentes estarem sujeitos a desvios às condições normais de operação difíceis de detetar, que podem originar perdas de desempenho e/ou de qualidade. Nestes casos, a aplicação da MPC utilizando sensores poderá ser vantajosa, mesmo que o tempo de vida do componente seja longo.

Em geral, a análise da viabilidade técnica da MPC/TD utilizando sensores requer o cruzamento dos dados medidos pelos sensores com dados dos registos de falhas do equipamento. Tendo em conta as lacunas evidenciadas nos registos de falhas existentes (secção 5.2), considerou-se que seria útil definir e integrar no CMMS listas predefinidas que identificassem os principais “modos de falha” associados a cada tipo de componente do equipamento, o “efeito” resultante da ocorrência de cada modo de falha e a “ação” realizada quando os modos de falha identificados se verificam.

Na elaboração das listas relativas ao modo de falha e ao efeito, deve recorrer-se aos mesmos termos e expressões utilizados no preenchimento do formulário F1, a fim de evitar duplicações. Desta forma, durante o preenchimento do registo, bastará selecionar a opção apropriada em cada uma das listas. A utilização de listas predefinidas permite obter informação mais fidedigna e uniforme, e possibilita o cruzamento automático dos dados dos registos de falhas com os valores dos parâmetros monitorizados nas máquinas. Assim, caso um modo de falha para o qual se questiona a viabilidade da MPC/TD utilizando sensores tenha ocorrido, poderá ser avaliado o seu impacto nos valores de parâmetros do equipamento que estavam a ser monitorizados quando o modo de falha se verificou.

Para que o MTTF possa ser calculado de forma automática, também é necessário definir um campo que permita identificar a posição que os componentes substituídos ocupam no equipamento e passar a registar as substituições realizadas no âmbito das ações de manutenção preventiva no CMMS. Desta forma, será mais fácil efetuar a análise conjunta dos registos de manutenção corretiva e preventiva.

No sentido de melhorar a organização dos dados para análise, foi recomendada uma reestruturação do registo de falhas do CMMS, que envolve a alteração da designação de alguns campos e a redefinição das listas de opções disponíveis. A estrutura de dados que foi proposta utiliza somente os campos já existentes, de forma a evitar a necessidade de efetuar, de imediato, alterações significativas ao *software*. No Apêndice IX, são descritos os campos propostos para o registo de falhas e o respetivo procedimento de preenchimento.

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO

6.1. Conclusões

Nesta tese, é proposta uma metodologia para orientar a seleção de políticas de manutenção do equipamento, com base em informação sobre o modo de falha, e para apoiar a implementação da manutenção condicionada. A metodologia desenvolvida destina-se a empresas de diferentes sectores cuja atividade depende substancialmente do desempenho dos seus equipamentos, em particular, empresas industriais.

Devido à sua abrangência e flexibilidade, a metodologia pode ser utilizada para orientar a definição do plano de manutenção dos equipamentos de uma empresa, verificar a viabilidade técnica e financeira da manutenção condicionada, e apoiar a sua implementação de uma forma organizada e progressiva. No âmbito da metodologia, as políticas de manutenção são selecionadas tendo em conta o comportamento da função de risco e o impacto do modo de falha, a natureza da falha funcional que é originada (evidente ou oculta), e os custos associados às políticas aplicáveis.

A metodologia proposta contempla a aplicação das seguintes políticas: MPC, MPS, TI, TD, MC e ação de melhoria. A MPC, a TI e a TD enquadram-se no conceito de manutenção condicionada abordado na norma EN 13306:2017, visto que, no âmbito destas políticas, a decisão de manutenção é tomada com base em informação sobre o estado do componente ao qual está associado o modo de falha considerado (observação da degradação). Contudo, estas políticas distinguem-se pelos objetivos associados e/ou pelos meios envolvidos na sua aplicação.

Para apoiar a implementação da manutenção condicionada (MPC e TD) utilizando sensores, são estabelecidos critérios para selecionar e priorizar os modos de falha relevantes, e são fornecidos métodos e procedimentos que permitem orientar de forma simples a análise da viabilidade técnica e financeira de uma técnica de monitorização específica. Os métodos e procedimentos propostos formam uma abordagem sistemática de apoio à implementação da manutenção condicionada.

Nos últimos anos, a manutenção condicionada tem sido alvo de um destaque cada vez maior na literatura científica, sobretudo devido aos desenvolvimentos tecnológicos recentes, impulsionados pela Indústria 4.0, tais como a IoT e os CPS. No entanto, a implementação da manutenção condicionada nas empresas

ainda é reduzida e, quando é aplicada, nem sempre é eficaz e eficiente. Por isso, diversos autores defendem a necessidade de se desenvolver uma abordagem holística para apoiar a implementação da manutenção condicionada/PHM, de uma forma estruturada, que considere os aspetos tecnológicos e financeiros envolvidos.

As abordagens de apoio à implementação da manutenção condicionada identificadas na literatura foram classificadas em duas categorias: arquiteturas e metodologias. A análise destas abordagens permitiu constatar que, em geral, no mesmo estudo, não são fornecidas orientações para:

- Selecionar e priorizar os modos de falha para a aplicação da manutenção condicionada;
- Definir os parâmetros a monitorizar no equipamento e selecionar dispositivos de aquisição de dados;
- Analisar o impacto do desenvolvimento do modo de falha nos parâmetros a monitorizar;
- Comparar o custo de aplicação da manutenção condicionada com o custo de outras políticas de manutenção.

Esta situação contribui para aumentar a dependência de profissionais especializados e, por isso, pode desencorajar a aplicação da manutenção condicionada em empresas onde existe pouco conhecimento nesta área. Também se salienta que a implementação das abordagens identificadas na literatura em contexto industrial ainda é limitada e que algumas destas abordagens são focadas num domínio específico, nomeadamente a aplicação de técnicas de análise das vibrações. Assim, considera-se que a metodologia definida no âmbito desta tese contribui significativamente para suprir as lacunas evidenciadas na literatura.

No que diz respeito ao planeamento da manutenção, a metodologia desenvolvida é inspirada na metodologia RCM. A utilização da metodologia RCM é frequentemente recomendada para sistematizar a aplicação da manutenção condicionada. Contudo, a sua aplicação é complexa e, geralmente, requer um investimento significativo em termos de recursos e de tempo. Esta circunstância impossibilita, muitas vezes, a sua utilização nas empresas, sobretudo quando o nível de maturidade na gestão da manutenção é reduzido. Por este motivo, no âmbito da metodologia desenvolvida, são propostos métodos e procedimentos simples e adaptáveis para priorizar os equipamentos a analisar, classificar os seus componentes e os respetivos modos de falha de acordo com a sua criticidade, e associar uma política de manutenção apropriada a cada modo de falha.

A metodologia inclui ainda um conjunto de formulários destinados a auxiliar a recolha e a análise dos dados necessários para a sua aplicação. Uma vez que a implementação da manutenção condicionada

nem sempre é viável, também são fornecidas orientações para apoiar a seleção de políticas de MPS específicas, nomeadamente a substituição em bloco, a substituição baseada na idade e a substituição baseada numa probabilidade de falha predefinida.

A metodologia proposta foi aplicada aos equipamentos de uma linha de produção, pertencente a uma empresa que produz placas de circuito impresso. A aplicação prática contribuiu para aperfeiçoar a estrutura geral da metodologia e os seus métodos e procedimentos. Os resultados obtidos na análise realizada aos equipamentos da linha de produção permitiram demonstrar a utilidade da metodologia desenvolvida para orientar a seleção de políticas de manutenção e apoiar a aplicação da manutenção condicionada de uma forma sistemática. No entanto, durante a implementação, foram identificadas algumas limitações que contribuíram para dificultar a aplicação dos métodos e procedimentos da metodologia. Estas limitações estão sobretudo relacionadas com a indisponibilidade de dados apropriados, e com a dispersão e a inconsistência dos dados existentes na empresa onde foi realizado o estudo.

Devido à indisponibilidade de dados quantitativos adequados, foi necessário adaptar a metodologia de forma a tirar partido dos dados disponíveis. Por isso, algumas das decisões tomadas basearam-se numa análise qualitativa. A dispersão e a inconsistência dos dados existentes contribuíram para aumentar consideravelmente o tempo despendido na implementação. Esta circunstância deveu-se à necessidade de aceder a diferentes sistemas de informação e de corrigir erros detetados durante a recolha e a análise dos dados.

Com base no “M1 – Método para ranking dos equipamentos”, foi possível ordenar as máquinas da linha de produção, da mais crítica para a menos crítica, utilizando critérios quantitativos considerados relevantes pela empresa (tempo de paragem e custo de manutenção) e recorrendo a dados do histórico dos equipamentos. Posteriormente, a análise focou-se nas duas máquinas mais críticas (máquina de impressão de pasta e máquina de soldadura).

A aplicação do “M2 – Método de classificação multicritério dos componentes do equipamento” e do “P1 – Procedimento para definir a criticidade dos modos de falha” permitiu obter e sistematizar informação relevante sobre os tipos de componentes analisados e acerca dos seus modos de falha, com vista a seleccionar a política de manutenção e identificar os modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores. Durante o preenchimento do formulário “F1 – Informação relativa aos componentes críticos”, procurou-se uniformizar os termos e as expressões utilizados para designar e/ou descrever os modos de falha, e os respetivos efeitos, causas e sintomas. A informação obtida foi revista e validada

pelos especialistas dos equipamentos analisados. Assim, considera-se que a metodologia desenvolvida também proporciona uma abordagem para sistematizar a recolha e o tratamento da informação relacionada com os subconjuntos, os componentes e os modos de falha dos equipamentos. Esta característica é particularmente útil para facilitar a gestão do conhecimento nas empresas, visto que o conhecimento técnico está habitualmente concentrado num pequeno número de funcionários.

A seleção das políticas de manutenção foi efetuada tendo em conta o impacto dos modos de falha (subcategoria) e o comportamento da função de risco. Porém, não foi possível obter dados para comparar os custos de aplicação das políticas propostas nas árvores de decisão.

Para estimar o custo de aplicação da MC utilizando o método descrito na subsecção 4.7.1, é requerido o MTTF de cada combinação “máquina – subconjunto – tipo de componente – posição – modo de falha” e o custo de falha. Embora o custo de falha possa ser estimado utilizando os dados existentes, nas situações em que o modo de falha tem impacto na qualidade, o valor da estimativa pode ser pouco preciso.

A estimativa do custo de aplicação de uma política de MPS específica aplicando os métodos apresentados na subsecção 4.7.2 requer a disponibilidade de dados de falha relativos a cada combinação “máquina – subconjunto – tipo de componente – posição – modo de falha” e que os dados de falha possam ser descritos por uma distribuição de probabilidade. Contudo, os dados existentes apenas permitem determinar o valor do tempo até à falha ao nível do tipo de componente. A este respeito salienta-se ainda o seguinte:

- O tempo até à falha pode ser obtido somente para os componentes que têm associadas substituições devido a falha;
- Em geral, o número de substituições devido a falha associado a cada combinação “máquina – subconjunto – tipo de componente” é bastante reduzido e, por isso, não permite obter uma média fiável do tempo até à falha;
- Existe a convicção, por parte dos engenheiros/técnicos de manutenção, de que o tempo de vida de componentes do mesmo tipo pode variar significativamente consoante a posição que ocupam na máquina;
- Existem evidências de que alguns consumos de componentes não foram imputados à máquina correta.

A política “ação de melhoria” foi proposta somente num caso em que existe uma convicção elevada de que os benefícios da sua aplicação são superiores aos custos. Para analisar a viabilidade técnica e

financeira de outras ações de melhoria, será necessário efetuar um estudo mais aprofundado dos componentes e de possíveis soluções.

Para os modos de falha com função de risco crescente das subcategorias A.1, A.2, A.3 e B.4, em alternativa à estimativa dos custos das políticas indicadas na árvore de decisão, a tomada de decisão baseou-se numa análise conjunta dos critérios: “Frequência” de substituição do componente, “Tempo de paragem” requerido para substituir o componente ao qual está associado o modo de falha considerado, “Complexidade da TI” (quando é recomendada) e “ C_{ps} ” (custo de aquisição da peça sobressalente).

Apesar das lacunas existentes, considera-se que a abordagem adotada para associar a política de manutenção aos modos de falha dos componentes do equipamento, permitiu selecionar as políticas mais adequadas. Assim, tendo em conta que muitas das políticas atribuídas são diferentes da política atual (26,32 % no conjunto das duas máquinas analisadas), espera-se que a empresa obtenha uma redução significativa do custo global de manutenção. Esta análise poderá ainda ser revista no futuro, utilizando informação mais detalhada e rigorosa.

A aplicação do “P2 – Procedimento para identificar os modos de falha prioritários” permitiu organizar a informação relacionada com os modos de falha candidatos à aplicação da MPC/TD utilizando sensores, e utilizá-la sequencialmente com a seguinte finalidade:

- Identificar parâmetros potencialmente mensuráveis com os sensores já instalados no equipamento;
- Definir os parâmetros a monitorizar, tendo em conta uma avaliação da sua relação com o modo de falha;
- Classificar a relação entre os parâmetros e os modos de falhas, de forma a identificar os mais relevantes e a estabelecer prioridades;
- Priorizar os modos de falha considerando recorrendo aos critérios técnicos e financeiros definidos no âmbito da metodologia.

A ordenação obtida com base na aplicação deste procedimento permitiu identificar os casos em que a implementação da manutenção condicionada pode proporcionar ganhos mais significativos e em que a sua viabilidade técnica é mais provável.

O “P3 – Procedimento para definir os dispositivos de medição de dados” foi utilizado para apoiar a seleção de dois tipos distintos de dispositivos, utilizados nos sistemas de monitorização propostos,

nomeadamente sensores de proximidade e potenciómetros lineares. Em ambos casos, os dispositivos selecionados mostraram ser adequados.

Por fim, a aplicação do “P4 – Procedimento para analisar o impacto dos modos de falha em parâmetros do equipamento/processo” foi útil sobretudo para orientar a organização e segmentação dos dados relativos aos parâmetros monitorizados. Este procedimento não foi aplicado na totalidade, devido à impossibilidade de recolher dados suficientes no período concedido para a implementação da metodologia.

A análise do impacto dos modos de falha nos parâmetros monitorizados, geralmente, requer dados referentes ao funcionamento de diversos componentes do mesmo tipo, em diferentes regimes de operação, para que possam ser definidas técnicas de processamento e de análise de dados adequadas. Assim, a realização de uma análise aprofundada da viabilidade técnica da aplicação da manutenção condicionada pode ser bastante demorada. Por este motivo, não foi possível aperfeiçoar o procedimento P4, através da experiência adquirida no caso de estudo. Contudo, devido seu carácter genérico, considera-se que este procedimento fornece um contributo importante para a literatura, visto que os estudos existentes neste domínio se focam na aplicação de modelos de diagnóstico e de prognóstico de falhas específicos.

Também se salienta que a análise da viabilidade financeira da aplicação da MPC/TD utilizando sensores poderá ser melhorada, caso seja possível quantificar as perdas de qualidade que resultam da ocorrência dos modos de falha considerados. Para esse efeito, é necessário cruzar os valores dos parâmetros relacionados com os modos de falha considerados com dados relativos ao controlo da qualidade do produto.

Devido à complexidade envolvida no processo de manutenção condicionada, a definição de uma metodologia para apoiar a implementação da manutenção condicionada, de forma simples e eficaz, constitui uma tarefa exigente e desafiante.

Tendo em conta os resultados obtidos com a aplicação da metodologia desenvolvida, considera-se que, de um modo geral, os objetivos da tese foram alcançados, sobretudo no que diz respeito ao apoio da implementação da manutenção condicionada. A metodologia definida foi aplicada, de forma rápida, a diferentes tipos de equipamentos e componentes, e mostrou ser eficaz a orientar a identificação de modos de falha para os quais a manutenção condicionada é aplicável e a apoiar a definição de soluções de monitorização apropriadas.

Porém, salienta-se que para facilitar a aplicação da manutenção condicionada utilizando sensores é importante que as empresas mantenham registos que permitam identificar rapidamente os principais modos de falha do equipamento, caracterizar as suas causas e efeitos, e avaliar o seu impacto no processo produtivo, consoante a localização do componente. Estes registos devem ser estruturados de forma a possibilitar a análise conjunta de dados de falhas, dados de ações de manutenção preventiva e de melhoria, e valores dos parâmetros monitorizados no equipamento.

Em seguida, sintetizam-se as principais vantagens evidenciadas pela metodologia desenvolvida, durante a fase de validação.

- Dispõe de uma estrutura fácil de compreender, que permite efetuar o planeamento da manutenção e apoiar a implementação da manutenção condicionada de forma independente e globalmente integrada;
- Permite que os esforços sejam concentrados, em primeiro lugar, nos equipamentos, componentes e modos de falha que têm um impacto mais significativo, em termos de segurança e de custos;
- Os seus formulários permitem reunir, organizar e normalizar conhecimento técnico sobre os componentes e os seus modos de falha, que se encontra habitualmente disperso;
- Recorre a ferramentas adaptáveis e fáceis de utilizar, por isso a sua aplicação não requer um nível de conhecimento elevado no domínio da manutenção condicionada;
- Promove a utilização de dispositivos de medição existentes no equipamento, de forma a reduzir os custos de implementação da manutenção condicionada.

6.2. Sugestões para trabalho futuro

Alguns subconjuntos das máquinas analisadas têm uma parte móvel, que pode ser utilizada em máquinas do mesmo modelo. Por este motivo, considera-se que a parte móvel do subconjunto deve ser abordada como um equipamento de suporte. Sendo assim, para os subconjuntos móveis, é proposta a seguinte atuação:

- Elaboração de um registo individual de avarias e de reparações: isto requer a definição de uma área de registo dedicada aos subconjuntos móveis, no CMMS, e a atribuição de uma designação e/ou código específico a cada subconjunto do mesmo tipo, para que possa ser assegurada a sua rastreabilidade;

- Aplicação de políticas de manutenção preventiva tendo em conta o respetivo histórico de funcionamento;
- Caso a política de manutenção seja definida do ponto de vista do equipamento principal, as políticas de MPC e MPS devem ser aplicadas ao nível do subconjunto.

Uma vez que, para implementar a manutenção condicionada utilizando sensores, é fundamental efetuar, em tempo real, o cruzamento de dados de eventos e de dados relativos aos parâmetros monitorizados, considera-se que seria útil definir uma arquitetura de dados e um sistema informático compatível que possibilitem realizar, de forma automática, uma análise conjunta de dados provenientes das seguintes fontes:

- Registos de falhas e de ações corretivas;
- Registos de ações preventivas;
- Registos de ações de melhoria;
- Sensores instalados no equipamento.

Para trabalho futuro, sugere-se ainda o aperfeiçoamento do “P4 – Procedimento para analisar o impacto dos modos de falha em parâmetros do equipamento/processo” ou o desenvolvimento de uma metodologia específica neste domínio. A definição de uma metodologia holística, destinada a apoiar a seleção e aplicação de diferentes técnicas de diagnóstico e prognóstico de falhas, tendo em conta o tipo de dados a analisar, seria um importante contributo para melhorar a eficácia dos sistemas de manutenção condicionada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdulrahman, S., Saleh, U. A., & Onuigbo, F. I. (2017). Application of Information and Communication Technology in Engineering for Effective Maintenance Management. *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*, 4(2), 10–13.
- ADS-79D-HDBK. (2013). *United States Army, ADS-79D-HDBK - Aeronautical Design Standard Handbook for Condition Based Maintenance Systems for US Army Aircraft*. Department of Defense.
- Afey, I. H. (2010). Reliability-Centered Maintenance Methodology and Application: A Case Study. *Engineering*, 02(11), 863–873. <https://doi.org/10.4236/eng.2010.211109>
- Agrawal, S., & Agrawal, J. (2015). Survey on anomaly detection using data mining techniques. *Procedia Computer Science*, 60(1), 708–713. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.220>
- Agustiady, T. K., & Cudney, E. A. (2018). Total Productive Maintenance. *Total Quality Management & Business Excellence*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ISSM.1993.670316>
- Ahmad, R., & Kamaruddin, S. (2012a). A review of condition-based maintenance decision-making. *European J. of Industrial Engineering*, 6(5), 519–541. <https://doi.org/10.1504/ejie.2012.048854>
- Ahmad, R., & Kamaruddin, S. (2012b). An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Computers and Industrial Engineering*, 63(1), 135–149. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.02.002>
- Ahuja, I. P. S., & Khamba, J. S. (2008a). Strategies and success factors for overcoming challenges in TPM implementation in Indian manufacturing industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 14(2), 123–147. <https://doi.org/10.1108/13552510810877647>
- Ahuja, I. P. S., & Khamba, J. S. (2008b). Total productive maintenance: literature review and directions. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 25(7), 709–756. <https://doi.org/10.1108/0265671081089089>
- Al-Najjar, B. (1996). Total quality maintenance An approach for continuous reduction in costs of quality products. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2(3), 4–19. <https://doi.org/10.1108/13552519610130413>
- Al-Najjar, B. (2007). The lack of maintenance and not maintenance which costs: A model to describe and quantify the impact of vibration-based maintenance on company's business. *International Journal of Production Economics*, 107(1), 260–273. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.09.005>
- Al-Najjar, B. (2012). On establishing cost-effective condition-based maintenance: Exemplified for vibration-based maintenance in case companies. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 18(4), 401–416. <https://doi.org/10.1108/13552511211281561>
- Al-Najjar, B., & Alsyouf, I. (2003). Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making. *Int. J. Production Economics*, 84, 85–100. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(02\)00380-8](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(02)00380-8)
- Al-Turki, U. (2012). A framework for strategic planning in maintenance. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 17(2), 150–162. <https://doi.org/10.1108/13552511111134583>
- Alaswad, S., & Xiang, Y. (2017). A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system. *Reliability Engineering and System Safety*, 157, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.08.009>

- Almeida, A. T. de, Cavalcante, C. A. V., Alencar, M. H., Ferreira, R. J. P., Almeida-Filho, A. T., De, & Garcez, T. V. (2015). *Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis* (First). Springer International Publishing.
- Alsyouf, I. (2007). The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability. *International Journal of Production Economics*, *105*(1), 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.06.057>
- Alsyouf, I., & Shamsuzzaman, M. (2016). Improving reliability of repairable systems using preventive maintenance and time-between-failures monitoring. *European J. Industrial Engineering*, *10*(5), 596–617.
- Amadi-Echendu, J. E., Brown, K., Willett, R., & Mathew, J. (2010). *Definitions, Concepts and Scope of Engineering Asset Management*. Springer-Verlag.
- Amadi-Echendu, J., Willett, R., Brown, K., Lee, J., Mathew, J., Yang, B.-S., & Vyas, N. (2010). What Is Engineering Asset Management? *The 2nd World Congress on Engineering Asset Management (EAM) and The 4th International Conference on Condition Monitorin, January*, 116–129. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-178-3>
- Andersson, R., Manfredsson, P., & Lantz, B. (2015). Total productive maintenance in support processes: an enabler for operation excellence. *Total Quality Management*, *26*(10), 1042–1055. <https://doi.org/10.1080/14783363.2015.1068598>
- Angelov, S., Kunal, K., & McGregor, A. (2008). Sorting and selection with random costs. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): Vol. 4957 LNCS*. https://doi.org/10.1007/978-3-540-78773-0_5
- Ashjaei, M., & Bengtsson, M. (2017). Enhancing Smart Maintenance Management Using Fog Computing Technology. *Proceedings of the 2017 IEEE IEEM*, 1561–1565.
- Aspinwall, E., & Elgharib, M. (2013). TPM implementation in large and medium size organisations. *EJournal of Manufacturing Technology Management*, *24*(5), 688–710. <https://doi.org/10.1108/17410381311327972>
- Attri, R., Grover, S., & Dev, N. (2014). A graph theoretic approach to evaluate the intensity of barriers in the implementation of total productive maintenance (TPM). *International Journal of Production Research*, *52*(10), 3032–3051. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.860250>
- Attwate, A., Wang, J. Q., Parlikad, A., & Russel, P. (2014). Measuring the performance of asset management systems. *Asset Management Conference 2014, 27-28 November*, 1–6.
- Ayo-Imoru, R. M., & Cilliers, A. C. (2018). A survey of the state of condition-based maintenance (CBM) in the nuclear power industry. *Annals of Nuclear Energy*, *112*, 177–188. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.10.010>
- Banjevic, D., Jardine, A. K. S., Makis, V., & Ennis, M. (2001). A Control-Limit Policy And Software For Condition-Based Maintenance Optimization. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, *39*(1), 32–50. <https://doi.org/10.1080/03155986.2001.11732424>
- Baranwal, G., Singh, M., & Vidyarthi, D. P. (2020). A framework for IoT service selection. In *Journal of Supercomputing* (Vol. 76, Issue 4). Springer US. <https://doi.org/10.1007/s11227-019-03076-1>
- Barlow, R. E., & Proschan, F. (1996). *Mathematical Theory of Reliability* (First). John Wiley & Sons, Inc.
- Barringer, P. (2013). Weibull Analysis. In A. K. S. Jardine & A. H. C. Tsang (Eds.), *Maintenance, Replacement, and Reliability* (Second). CRC Press Taylor & Francis Group.

- Başkarada, S., Nguyen, V., & Koronios, A. (2018). Architecting Microservices: Practical Opportunities and Challenges. *Journal of Computer Information Systems*, 1–9. <https://doi.org/10.1080/08874417.2018.1520056>
- Baur, M., Albertelli, P., & Monno, M. (2020). A review of prognostics and health management of machine tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(5–6), 2843–2863. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05202-3>
- Bekar, E. T., Nyqvist, P., & Skoogh, A. (2020). An intelligent approach for data pre-processing and analysis in predictive maintenance with an industrial case study. *Advances in Mechanical Engineering*, 12(5), 168781402091920. <https://doi.org/10.1177/1687814020919207>
- Bell, P. C., & Zaric, G. S. (2013). *Analytics for Managers: With Excel* (First). Taylor & Francis.
- Benbow, D. W., & Broome, H. W. (2009). *The Certified Reliability Engineer Handbook* (First). ASQ Quality Press.
- Bevilacqua, M., & Braglia, M. (2000). The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering & System Safety*, 70(1), 71–83. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(00\)00047-8](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00047-8)
- Bharadwaj, U. R., Silberschmidt, V. V., & Wintle, J. B. (2012). A risk based approach to asset integrity management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 18(4), 417–431. <https://doi.org/10.1108/13552511211281570>
- Birolini, A. (2014). *Reliability Engineering* (Seventh). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39535-2>
- Bish, A. J., Newton, C. J., Browning, V., O'Connor, P., & Anibaldi, R. (2014). An exploration of the professional competencies required in engineering asset management. *European Journal of Engineering Education*, 39(4), 432–447. <https://doi.org/10.1080/03043797.2014.895701>
- Blischke, W. R., & Murthy, D. N. P. (2003). *Case Studies in Reliability and Maintenance* (First). John Wiley & Sons, Inc.
- Bousdekis, A., Magoutas, B., Apostolou, D., & Mentzas, G. (2015). A proactive decision making framework for condition-based maintenance. *Industrial Management and Data Systems*, 115(7), 1225–1250. <https://doi.org/10.1108/IMDS-03-2015-0071>
- Bousdekis, A., & Mentzas, G. (2017). *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing* (H. Lödding, R. Riedel, K.-D. Thoben, G. von Cieminski, & D. Kiritsis (eds.); Vol. 513). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-66923-6>
- Bousdekis, A., Mentzas, G., Hribernik, K., Lewandowski, M., Stietencron, M. Von, & Thoben, K. (2015). Enterprise Interoperability. In *Enterprise Interoperability* (Issue April). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1002/9781119081418>
- Bousdekis, A., Papageorgiou, N., Magoutas, B., Apostolou, D., & Mentzas, G. (2018). Enabling condition-based maintenance decisions with proactive event-driven computing. *Computers in Industry*, 100(November 2016), 173–183. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.019>
- Brous, P., Herder, P., & Janssen, M. (2016). Governing Asset Management Data Infrastructures. *Procedia Computer Science*, 95, 303–310. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.339>
- Brous, P., Janssen, M., & Herder, P. (2018). Internet of Things adoption for reconfiguring decision-making processes in asset management. *Business Process Management Journal*.

- <https://doi.org/10.1108/BPMJ-11-2017-0328>
- Brous, P., Janssen, M., Schraven, D., Spiegelers, J., & Duzgun, B. C. (2017). *Factors Influencing Adoption of IoT for Data-driven Decision Making in Asset Management Organizations*. *IoTBDs*, 70–79. <https://doi.org/10.5220/0006296300700079>
- Brous, P., Overtoom, I., Herder, P., Versluis, A., & Janssen, M. (2014). Data Infrastructures for Asset Management Viewed as Complex Adaptive Systems. *Procedia Computer Science*, 36(C), 124–130. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.09.048>
- Brown, R. E., & Humphrey, B. G. (2005). Asset management for transmission and distribution. *IEEE Power and Energy Magazine*, 3(3), 39–45. <https://doi.org/10.1109/MPAE.2005.1436499>
- Brown, R. E., & Spare, J. H. (2004). Asset management, risk, and distribution system planning. *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004.*, 130–135. <https://doi.org/10.1109/PSCE.2004.1397445>
- BSI. (2008a). *Asset Management Part 1: Specification for the optimized management of physical assets*. British Standards Institution. www.theIAM.org
- BSI. (2008b). *Asset Management Part 2: Guidelines for the application of PAS 55-1*. British Standards Institution. www.theIAM.org
- BSI. (2014). *Moving from PAS 55 to BS ISO 55001*. BSI Group.
- Burnett, S., & Vlok, P. J. (2014). A simplified numerical decision-making methodology for physical asset management decisions. *South African Journal of Industrial Engineering*, 25(1), 162–175.
- Cabrita, C. P., & Cardoso, A. J. M. (2015). Conceitos e definições de falha e avaria nasa normas portuguesas de manutenção NP EN 13303:2007 e NP EN 15341:2009. *Manutenção*, 125, 4–9.
- Cahyo, W., El-Akruti, K., Dwight, R., & Zhang, T. (2015). Managing maintenance resources for better asset utilisation. *Australian Journal of Multi-Disciplinary Engineering*, 11(2), 123–134. <https://doi.org/10.7158/N14-AM06.2015.11.2>
- Cárcel, C. R., Cao, Y., & Mba, D. (2014). A benchmark of Canonical Variate Analysis for fault detection and diagnosis. *UKACC International Conference on Control*, 13(July 9-11), 425–431. [https://doi.org/10.1016/S0167-4137\(07\)80012-6](https://doi.org/10.1016/S0167-4137(07)80012-6)
- Carretero, J., Pérez, J. M., García-Carballeira, F., Calderón, A., Fernández, J., García, J. D., Lozano, A., Cardona, L., Cotaina, N., & Prete, P. (2003). Applying RCM in large scale systems: A case study with railway networks. *Reliability Engineering and System Safety*, 82(3), 257–273. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(03\)00167-4](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(03)00167-4)
- Carvalho, T. P., Soares, F. A. A. M. N., Vita, R., & Francisco, P. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137(August). <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>
- Chareonsuk, C., & Chansa-ngavej, C. (2008). Intangible asset management framework for long-term financial performance. *Industrial Management & Data Systems*, 108(6), 812–828. <https://doi.org/10.1108/02635570810884021>
- Chen, C. (2013). A developed autonomous preventive maintenance programme using RCA and FMEA. *International Journal of Production Research*, 51(18), 5404–5412. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.775521>
- Cheng, S., Azarian, M. H., & Pecht, M. G. (2010). Sensor systems for prognostics and health

- management. *Sensors*, *10*(6), 5774–5797. <https://doi.org/10.3390/s100605774>
- de Jonge, B., Teunter, R., & Tinga, T. (2017). The influence of practical factors on the benefits of condition-based maintenance over time-based maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, *158*, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.10.002>
- Departement of Defense. (2008). *Condition Based Maintenance Plus DoD Guidebook* (Issue May). DoD.
- Deshpande, V. S., & Modak, J. P. (2002). Application of RCM to a medium scale industry. *Reliability Engineering and System Safety*, *77*(1), 31–43. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(02\)00011-X](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(02)00011-X)
- Design, L., Velde, J. Van Der, Klatter, L., & Bakker, J. (2013). A holistic approach to asset management in the Netherlands. *Structure and Infrastructure Engineering*, *9*(4), 340–348. <https://doi.org/10.1080/15732479.2012.657650>
- Dhillon, B. S. (2007). *Applied Reliability and Quality* (First). Springer-Verlag.
- Diez-Olivan, A., Del Ser, J., Galar, D., & Sierra, B. (2019). Data fusion and machine learning for industrial prognosis: Trends and perspectives towards Industry 4.0. *Information Fusion*, *50*(July 2018), 92–111. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.10.005>
- Djurdjanovic, D., Lee, J., & Ni, J. (2003). Watchdog agent - An infotronics-based prognostics approach for product performance degradation assessment and prediction. *Advanced Engineering Informatics*, *17*(3–4), 109–125. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2004.07.005>
- Dong, Y., Xia, T., Fang, X., Zhang, Z., & Xi, L. (2019). Prognostic and health management for adaptive manufacturing systems with online sensors and flexible structures. *Computers and Industrial Engineering*, *133*(December 2018), 57–68. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.04.051>
- Dragomir, O. E., Gouriveau, R., Dragomir, F., Minca, E., & Zerhouni, N. (2009). Review of prognostic problem in condition-based maintenance. *European Control Conference, ECC'09., August*, 1585–1592.
- Durán, O. (2011). Computer-aided maintenance management systems selection based on a fuzzy AHP approach. *Advances in Engineering Software*, *42*(10), 821–829. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.05.023>
- Durivage, M. A. (2017). *The Certified Reliability Engineer Handbook* (Third). ASQ Quality Press.
- Efthymiou, K., Papakostas, N., Mourtzis, D., & Chryssolouris, G. (2012). On a Predictive Maintenance Platform for Production Systems. *45th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2012*, *3*, 221–226. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.039>
- El-akruti, K., & Dwight, R. (2013). A framework for the engineering asset management system. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *19*(4), 398–412. <http://ro.uow.edu.au/eispapers/1352>
- Elghazel, W., Bahi, J., Guyeux, C., Hakem, M., Medjaher, K., & Zerhouni, N. (2015). Dependability of wireless sensor networks for industrial prognostics and health management. *Computers in Industry*, *68*, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.10.004>
- Eliot, C. W. (2013). Inspection Decisions. In A. K. S. Jardine & A. H. C. Tsang (Eds.), *Maintenance, Replacement, and Reliability* (Second). CRC Press Taylor & Francis Group.
- EN 13306. (2017). *Maintenance – Maintenance terminology*. European Committee for Standardization.
- Fedele, L. (2011). *Methodologies and Techniques for Advanced Maintenance* (First). Springer-Verlag London Limited. <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-103-5>

- Feldman, K., Jazouli, T., & Sandborn, P. A. (2009). A methodology for determining the return on investment associated with prognostics and health management. *IEEE Transactions on Reliability*, *58*(2), 305–316. <https://doi.org/10.1109/TR.2009.2020133>
- Fodor, I. K. (2002). A survey of dimension reduction techniques. In *Technical report*. <https://doi.org/10.2172/15002155>
- Fouladirad, M., & Grall, A. (2015). Monitoring and condition-based maintenance with abrupt change in a system's deterioration rate. *International Journal of Systems Science*, *46*(12), 2183–2194. <https://doi.org/10.1080/00207721.2013.859327>
- Fraser, K., Hvolby, H.-H., & Tseng, T.-L. (2015). Maintenance management models: a study of the published literature to identify a greater practical focus is needed. *International Journal of Quality & Reliability Management*, *32*(6), 635–664. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-11-2013-0185>
- Galar, D., Stenstrom, C., Parida, A., Kumar, R., & Berges, L. (2011). Human factor in maintenance performance measurement. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, December 2011*, 1569–1576. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2011.6118181>
- Garg, A., & Deshmukh, S. G. (2006). Maintenance management: literature review and directions. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *12*(3), 205–238. <https://doi.org/10.1108/13552510810877674>
- Ghasemi, a., Yacout, S., & Ouali, M. S. (2007). Optimal condition based maintenance with imperfect information and the proportional hazards model. *International Journal of Production Research*, *45*(4), 989–1012. <https://doi.org/10.1080/00207540600596882>
- Giglio, J. M., Friar, J. H., & Crittenden, W. F. (2018). Integrating lifecycle asset management in the public sector. *Business Horizons*, *61*(4), 511–519. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2018.03.005>
- Gold, V. (2013). Component Replacement Decisions. In A. K. S. Jardine & A. H. C. Tsang (Eds.), *Maintenance, Replacement, and Reliability* (Second). CRC Press Taylor & Francis Group.
- Golmakani, H. R., & Fattahipour, F. (2011). Optimal replacement policy and inspection interval for condition-based maintenance. *International Journal of Production Research*, *49*(17), 5153–5167. <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.505935>
- Guillén, A.J., Crespo, A., Macchi, M., & Gómez, J. (2016). On the role of Prognostics and Health Management in advanced maintenance systems. *Production Planning & Control*, *27*(12), 991–1004. <https://doi.org/10.1080/09537287.2016.1171920>
- Guillén, Antonio J., Crespo, A., Gómez, J. F., & Sanz, M. D. (2016). A framework for effective management of condition based maintenance programs in the context of industrial development of E-Maintenance strategies. *Computers in Industry*, *82*, 170–185. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.07.003>
- Gunasekaran, A., & Sandhu, M. (2010). *Handbook on Business Information Systems*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Gupta, P., & Vardhan, S. (2016). Optimizing OEE , productivity and production cost for improving sales volume in an automobile industry through TPM: a case study. *International Journal of Production Research*, *54*(10), 2976–2988. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1145817>
- Haddad, G., Sandborn, P. A., & Pecht, M. G. (2012). An options approach for decision support of systems with prognostic capabilities. *IEEE Transactions on Reliability*, *61*(4), 872–883.

- <https://doi.org/10.1109/TR.2012.2220699>
- Hand, D. J., & Adams, N. M. (2015). Data Mining. In *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online* (pp. 1–7). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat06466.pub2>
- Harte, J. (2013). Introduction. In *Maintenance, Replacement, and Reliability* (Second, pp. 1–25). CRC Press Taylor & Francis Group.
- Hashemian, H. M. (2010). State-of-the-Art Predictive Maintenance Techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *60*(1), 226–236. <https://doi.org/10.1109/tim.2010.2047662>
- Hastings, N. A. J. (2010). *Physical Asset Management* (First). Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-751-6>
- Hastings, N. A. J. (2015). *Physical Asset Management: With an Introduction to ISO55000* (Second). Springer International Publishing.
- Henderson, K. A. M. – A. I. in S., Pahlenkemper, G., & Kraska, O. (2014). Integrated Asset Management – An Investment in Sustainability. *Procedia Engineering*, *83*, 448–454. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.077>
- Heng, A., Zhang, S., Tan, A. C. C., & Mathew, J. (2009). Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *23*(3), 724–739. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2008.06.009>
- Hodkiewicz, M., & Ho, M. T.-W. (2016). Cleaning historical maintenance work order data for reliability analysis. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *22*(2), 146–163.
- Horenbeek, A. Van, Pintelon, L., & Muchiri, P. (2010). Maintenance optimization models and criteria. *Int J Syst Assur Eng Manag*, *1*(3), 189–200. <https://doi.org/10.1007/s13198-011-0045-x>
- Hoskins, C. G. (1974). Benefit-Cost Ratios Versus Net Present Value: Revisited. *Journal of Business Finance & Accounting*, *1*(2), 249–264. <https://doi.org/10.1111/j.1468-5957.1974.tb00862.x>
- Hwang, H. J., Lee, J. H., Hwang, J. S., & Jun, H. B. (2018). A study of the development of a condition-based maintenance system for an LNG FPSO. *Ocean Engineering*, *164*(July), 604–615. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.07.004>
- IAM. (2014). *The Self-Assessment Methodology - Guidance*. The Institute of Asset Management. <https://www.theiam.org/>
- IAM. (2015). *Asset Management – an anatomy* (Issue December). The Institute of Asset Management.
- IBM. (2007). *The Evolution of Asset Management*. IBM Corporation.
- Ingemarsdotter, E., Kambanou, M. L., Jamsin, E., & Sakao, T. (2021). Challenges and solutions in condition-based maintenance implementation - a multiple case study. *Journal of Cleaner Production*, *296*, 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126420>
- ISO 13374. (2003). *Condition monitoring and diagnostics of machines – Data processing, communication and presentation – Part 1: General guidelines*. International Standards Organization.
- ISO 17359. (2018). *Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines*. International Standards Organization.
- ISO 55000. (2014). *Asset management – Overview, principles and terminology* (First). International Standards Organization.

- Jain, A., Bhatti, R., & Singh, H. (2014). Total productive maintenance (TPM) implementation practice. *International Journal of Lean Six Sigma*, 5(3), 293–323. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-06-2013-0032>
- Janssens, O., Slavkovikj, V., Vervisch, B., Stockman, K., Loccufier, M., Verstockt, S., Van de Walle, R., & Van Hoecke, S. (2016). Convolutional Neural Network Based Fault Detection for Rotating Machinery. *Journal of Sound and Vibration*, 377, 331–345. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.05.027>
- Jaramillo, V. H., Ottewill, J. R., Dudek, R., Lepiarczyk, D., & Pawlik, P. (2017). Condition monitoring of distributed systems using two-stage Bayesian inference data fusion. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 87(August 2016), 91–110. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.10.004>
- Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2005.09.012>
- Jardine, A. K. S., & Tsang, A. H. C. (2013). *Maintenance, Replacement, and Reliability* (Second). CRC Press Taylor & Francis Group.
- Jiang, R. (2013). A multivariate CBM model with a random and time-dependent failure threshold. *Reliability Engineering and System Safety*, 119, 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.05.023>
- Jiang, Renyan. (2015). *Introduction to Quality and Reliability Engineering* (First). Springer-Verlag GmbH. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-47215-6>
- Jiao, J., Zhao, M., Lin, J., & Zhao, J. (2018). A multivariate encoder information based convolutional neural network for intelligent fault diagnosis of planetary gearboxes. *Knowledge-Based Systems*, 160(July), 237–250. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.07.017>
- Johnson, R. A., & Wichern, D. W. (2007). *Applied multivariate statistical analysis* (Sixth). Pearson Prentice Hall.
- Jones, P. M., Lonne, Q., Talaia, P., Leighton, G. J. T., Botte, G. G., Mutnuri, S., & Williams, L. (2018). A Straightforward Route to Sensor Selection for IoT Systems. *Research Technology Management*, 61(5), 41–50. <https://doi.org/10.1080/08956308.2018.1495965>
- Jun, H. B., & Kim, D. (2017). A Bayesian network-based approach for fault analysis. *Expert Systems with Applications*, 81, 332–348. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.03.056>
- Kans, M., & Ingwald, A. (2008). Common database for cost-effective improvement of maintenance performance. *International Journal of Production Economics*, 113(2), 734–747. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.10.008>
- Kardon, B., & Fredendall, L. D. (2002). Incorporating overall probability of system failure into a preventive maintenance model for a serial system. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 8(4), 331–345. <https://doi.org/10.1108/13552510210448531>
- Khan, S., & Yairi, T. (2018). A review on the application of deep learning in system health management. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 107, 241–265. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.11.024>
- Kobbacy, K. A. H., & Murthy, D. N. P. (2008). *Complex System Maintenance Handbook* (K. A. H. Kobbacy & D. N. P. Murthy (eds.); First). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-011-7>
- Köhler, T., & Lorenz, D. (2005). A comparison of denoising methods for one dimensional time series. *Technical Report DFG SPP1114, University of Bremen, Bremen, Germany*, 1, 1–15.

- <http://www.math.uni-bremen.de/zetem/DFG-Schwerpunkt/preprints/orig/lorenz20051dreport.pdf>
- Komljenovic, D., Gaha, M., Abdul-nour, G., Langheit, C., & Bourgeois, M. (2016). Risks of extreme and rare events in Asset Management. *Safety Science*, *88*, 129–145. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.05.004>
- Koronios, A., Lin, S., & Gao, J. (2005). A Data Quality Model for Asset Management in Engineering Organisations. *Proceedings of the 10th International Conference on Information Quality (ICIQ 2005)*.
- Koronios, A., Nastasie, D., Chanana, V., & Haider, A. (2007). Integration through Standards – an Overview of International Standards for Engineering Asset Management. *Proceedings of the Fourth International Conference on Condition Monitoring, June*, 1–24.
- Kumar, A., Shankar, R., & Thakur, L. S. (2018). A big data driven sustainable manufacturing framework for condition-based maintenance prediction. *Journal of Computational Science*, *27*, 428–439. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jocs.2017.06.006>
- Kumar, U., Berges, L., Galar, D., Parida, A., & Stenström, C. (2013). Maintenance performance metrics: a state-of-the-art review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *19*(3), 233–277. <https://doi.org/10.1108/JQME-05-2013-0029>
- Kusumawardhani, M., Gundersen, S., & Tore, M. (2017). Mapping the research approach of asset management studies in the petroleum industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *23*(1), 57–70. <https://doi.org/https://doi.org/10.1108/JQME-07-2015-0031>
- Kutucuoglu, K. Y., Hamali, J., Irani, Z., & Sharp, J. M. (2001). A framework for managing maintenance using performance measurement systems. *International Journal of Operations & Production Management*, *21*(1/2), 173–195. <https://doi.org/10.1108/01443570110358521>
- Labib, A. W. (2004). A decision analysis model for maintenance policy selection using a CMMS. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *10*(3), 191–202. <https://doi.org/10.1108/13552510410553244>
- Latyshev, E. (2018). Sensor Data Preprocessing, Feature Engineering and Equipment Remaining Lifetime Forecasting for Predictive Maintenance. *DAMDID/RCDL*, 226–231.
- Lazim, H. M., & Ramayah, T. (2010). Maintenance strategy in Malaysian manufacturing companies: a total productive maintenance (TPM) approach. *Business Strategy Series*, *11*(6), 387–396. <https://doi.org/10.1108/17515631011093098>
- Lee, J., Ardakani, H. D., Yang, S., & Bagheri, B. (2015). Industrial Big Data Analytics and Cyber-physical Systems for Future Maintenance & Service Innovation. *Procedia CIRP*, *38*, 3–7. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.026>
- Lee, J., Ni, J., Djurdjanovic, D., Qiu, H., & Liao, H. (2006). Intelligent prognostics tools and e-maintenance. *Computers in Industry*, *57*(6), 476–489. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2006.02.014>
- Lee, J., & Wang, H. (2008). New Technologies for Maintenance. In K. A. H. Kobbacy & D. N. P. Murthy (Eds.), *Complex System Maintenance Handbook* (First, pp. 49–78). Springer-Verlag.
- Lee, J., Wu, F., Zhao, W., Ghaffari, M., Liao, L., & Siegel, D. (2014). Prognostics and health management design for rotary machinery systems - Reviews, methodology and applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *42*(1–2), 314–334. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.06.004>
- Lee, S. J., & Siau, K. (2001). A review of data mining techniques. *Industrial Management and Data Systems*, *101*(1), 41–46. <https://doi.org/10.1108/02635570110365989>

- Lei, Y., Li, N., Guo, L., Li, N., Yan, T., & Lin, J. (2018). Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *104*, 799–834. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.11.016>
- Levrat, E., lung, B., & Crespo Marquez, A. (2008). E-maintenance: review and conceptual framework. *Production Planning & Control*, *19*(4), 408–429. <https://doi.org/10.1080/09537280802062571>
- Li, Q., Gao, Z., Tang, D., & Li, B. (2016). Remaining useful life estimation for deteriorating systems with time-varying operational conditions and condition-specific failure zones. *Chinese Journal of Aeronautics*, *29*(3), 662–674. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2016.04.007>
- Li, R., Verhagen, W. J. C., & Curran, R. (2020). A systematic methodology for Prognostic and Health Management system architecture definition. *Reliability Engineering & System Safety*, *193*(December 2018), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106598>
- Li, X., Ding, Q., & Sun, J. Q. (2018). Remaining useful life estimation in prognostics using deep convolution neural networks. *Reliability Engineering and System Safety*, *172*(October 2017), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.11.021>
- Li, X., Zhang, W., & Ding, Q. (2018). A robust intelligent fault diagnosis method for rolling element bearings based on deep distance metric learning. *Neurocomputing*, *310*, 77–95. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.05.021>
- Li, X., Zhang, W., & Ding, Q. (2019). Deep learning-based remaining useful life estimation of bearings using multi-scale feature extraction. *Reliability Engineering and System Safety*, *182*(July 2018), 208–218. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.11.011>
- Li, X., Zhang, W., Ding, Q., & Sun, J. Q. (2019). Multi-Layer domain adaptation method for rolling bearing fault diagnosis. *Signal Processing*, *157*, 180–197. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2018.12.005>
- Li, Zhe, Wang, Y., & Wang, K. (2019). A deep learning driven method for fault classification and degradation assessment in mechanical equipment. *Computers in Industry*, *104*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.07.002>
- Li, Zhixiong, Wu, D., Hu, C., & Terpenney, J. (2019). An ensemble learning-based prognostic approach with degradation-dependent weights for remaining useful life prediction. *Reliability Engineering and System Safety*, *184*(December 2017), 110–122. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.12.016>
- Liao, S. H., Chu, P. H., & Hsiao, P. Y. (2012). Data mining techniques and applications - A decade review from 2000 to 2011. *Expert Systems with Applications*, *39*(12), 11303–11311. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.02.063>
- Lin, S., Gao, J., & Koronios, A. (2008). A data quality framework for engineering asset management. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, *5*(2), 209–219. <https://doi.org/10.1080/14484846.2008.11464549>
- Lin, Shien, Gao, J., Koronios, A., & Chanana, V. (2007). Developing a data quality framework for asset management in engineering organisations. *Int. J. Information Quality*, *1*(1), 100–126.
- Lin, Y., Li, X., & Hu, Y. (2018). Deep diagnostics and prognostics: An integrated hierarchical learning framework in PHM applications. *Applied Soft Computing Journal*, *72*, 555–564. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.01.036>
- Liu, M., & Frangopol, D. M. (2003). Multiobjective Maintenance Planning Optimization for Deteriorating Bridges Considering Condition, Safety, and Life-Cycle Cost. *Journal of Structural Engineering*, *131*(5), 833–842. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2005\)131:5\(833\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:5(833))

- Liu, R., Yang, B., Zio, E., & Chen, X. (2018). Artificial intelligence for fault diagnosis of rotating machinery: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *108*, 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.02.016>
- Liu, Y., Hu, X., & Zhang, W. (2019). Remaining useful life prediction based on health index similarity. *Reliability Engineering and System Safety*, *185*(January), 502–510. <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.02.002>
- López, A. J. G., Crespo Márquez, A., Gómez Fernández, J. F., & Guerrero Bolaños, A. (2014). Towards the Industrial Application of PHM: Challenges and Methodological Approach. *European Conference of the PHM Society 2014 Proceedings*, 1–10.
- Lundgren, C., Skoogh, A., & Bokrantz, J. (2018). Quantifying the Effects of Maintenance – a Literature Review of Maintenance Models. *Procedia CIRP*, *72*, 1305–1310. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.175>
- Macchi, M., Crespo Márquez, A., Holgado, M., Fumagalli, L., & Barberá Martínez, L. (2014). Value-driven engineering of E-maintenance platforms. *Journal of Manufacturing Technology Management*, *25*(4), 568–598. <https://doi.org/10.1108/JMTM-04-2013-0039>
- Macchi, M., Roda, I., Negri, E., & Fumagalli, L. (2018). Exploring the role of Digital Twin for Asset Lifecycle Management. *IFAC-PapersOnLine*, *51*(11), 790–795. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.415>
- Maletič, D., Maletič, M., Lovrenčić, V., Al-Najjar, B., & Gomišček, B. (2014). An Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) and Sensitivity Analysis for Maintenance Policy Selection. *Organizacija*, *47*(3), 177–188. <https://doi.org/10.2478/orga-2014-0016>
- Manly, B. F., & Alberto, J. A. N. (2016). *Multivariate Statistical Methods: A Primer*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Márquez, A. C. (2007). *The Maintenance Management Framework: Models and Methods for Complex Systems Maintenance* (First). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-821-0>
- Marseguerra, M., Zio, E., & Podofillini, L. (2002). Condition-based maintenance optimization by means of genetic algorithms and Monte Carlo simulation. *Reliability Engineering & System Safety*, *77*(2), 151–165. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(02\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(02)00043-1)
- Martinetti, A., Braaksma, A. J. J., & van Dongen, L. A. M. (2017). Beyond RAMS Design: Towards an Integral Asset and Process Approach. In L. Redding, R. Roy, & A. Shaw (Eds.), *Advances in Through-life Engineering Services* (First, pp. 417–428). Springer. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-49938-3_25
- Mcglynn, J., & Fenhagen, D. (2011). The Future of Asset Management Solutions: Consolidation, Capability, Convergence. In J. D. Campbell, A. K. S. Jardine, & J. McGlynn (Eds.), *Asset Management Excellence: Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions* (Second, pp. 391–400). Taylor & Francis Group.
- Mcglynn, J., & Jardine, A. K. S. (2011). *Asset Management Excellence: Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions* (J. D. Campbell, A. K. S. Jardine, & J. McGlynn (eds.); Second). Taylor & Francis Group.
- Mehairjan, R. P. Y. (2017). Asset, Risk and Maintenance Management. In *Risk-Based Maintenance for Electricity Network Organizations* (First). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49235-3>
- Millar, R. C. (2008). The role of reliability data bases in deploying CBM+, RCM and PHM with TLCSM.

- IEEE Aerospace Conference Proceedings, March*. <https://doi.org/10.1109/AERO.2008.4526633>
- MIMOSA. (2006). *Open Systems Architecture for Condition-based Maintenance (OSA-CBM)* (Issue August). Machinery Information Management Open Standards Alliance (MIMOSA).
- Morales Méndez, J. D., & Rodriguez, R. S. (2017). Total productive maintenance (TPM) as a tool for improving productivity: a case study of application in the bottleneck of an auto-parts machining line. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(1–4), 1013–1026. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0052-4>
- Moubray, J. (1997). *Reliability-Centered Maintenance* (Second). Butterworth-Heinemann.
- Muchiri, P., Pintelon, L., Gelders, L., & Martin, H. (2011). Development of maintenance function performance measurement framework and indicators. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 295–302. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.04.039>
- Murthy, D. N. P., Atrens, A., & Eccleston, J. A. (2002). Strategic maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 8(4), 287–305. <https://doi.org/IHFIIHVGIOSSPSIHPHRRVSHR>
- Mwanza, B. G., & Mbohwa, C. (2015). Design of a total productive maintenance model for effective implementation: Case study of a chemical manufacturing company. *Procedia Manufacturing*, 4(less), 461–470. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.11.063>
- Nam-Ho Kim, An, D., & Choi, J.-H. (2017). *Prognostics and Health Management of Engineering Systems: An Introduction* (First). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44742-1>
- Nezami, F. G., & Yildirim, M. B. (2013). A sustainability approach for selecting maintenance strategy. *International Journal of Sustainable Engineering*, 6(4), 332–343. <https://doi.org/10.1080/19397038.2013.765928>
- Nguyen, K. T. P., & Medjaher, K. (2019). A new dynamic predictive maintenance framework using deep learning for failure prognostics. *Reliability Engineering & System Safety*, 188(September 2018), 251–262. <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.03.018>
- Nicolai, R. P., & Dekker, R. (2008). Optimal Maintenance of Multi-component Systems: A Review. In K. A. H. Kobacy & D. N. P. Murthy (Eds.), *Complex System Maintenance Handbook* (First, pp. 262–286). Springer-Verlag.
- Niu, G., Yang, B. S., & Pecht, M. (2010). Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, 95(7), 786–796. <https://doi.org/10.1016/j.res.2010.02.016>
- Nowlan, F. S., & Heap, H. (2013). Statistics Primer. In A. K. S. Jardine & A. H. C. Tsang (Eds.), *Maintenance, Replacement, and Reliability* (Second). CRC Press Taylor & Francis Group.
- Nowlan, F. S., & Heap, H. F. (1978). *Reliability centered maintenance. Report of work by United Airlines for the U.S. Department of Defense*.
- Nuñez, D. L., & Borsato, M. (2017). An ontology-based model for prognostics and health management of machines. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 33–46. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.02.006>
- Nuñez, D. L., & Borsato, M. (2018). OntoProg: An ontology-based model for implementing Prognostics Health Management in mechanical machines. *Advanced Engineering Informatics*, 38(October), 746–759. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.10.006>

- O'Donoghue, C. D., & Prendergast, J. G. (2004). Implementation and benefits of introducing a computerised maintenance management system into a textile manufacturing company. *Journal of Materials Processing Technology*, 153–154(1–3), 226–232. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.022>
- Ojanen, V. (2014). Maintenance Innovations - Types, Patterns and Emerging Trends. *2014 IEEE International Conference on Management of Innovation and Technology*, 321–326. <https://doi.org/10.1109/ICMIT.2014.6942446>
- Okano, K. (2001). Life cycle costing - An approach to life cycle cost management : A consideration from historical development. *Asia Pacific Management Review*, 6(3), 317–341.
- Okoh, C., Roy, R., Mehnen, J., & Redding, L. (2014). Overview of Remaining Useful Life prediction techniques in Through-life Engineering Services. *Procedia CIRP*, 16, 158–163. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.006>
- Oluwasegun, A., & Jung, J.-C. (2020). The application of machine learning for the prognostics and health management of control element drive system. *Nuclear Engineering and Technology*, 52(10), 2262–2273. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.03.028>
- Palanivelu, V. R. (2013). *Accounting for Management* (Third). University Science Press.
- Pan, D., Liu, J. B., & Cao, J. (2016). Remaining useful life estimation using an inverse Gaussian degradation model. *Neurocomputing*, 185, 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.12.041>
- Park, K. S., & Han, S. W. (2001). TPM - Total productive maintenance: Impact on competitiveness and a framework for successful implementation. *Human Factors and Ergonomics In Manufacturing*, 11(4), 321–338. <https://doi.org/10.1002/hfm.1017>
- Pascual, D. G., & Kumar, U. (2016). *Maintenance Audits Handbook* (First). CRC Press Taylor & Francis Group.
- Peng, Y., Dong, M., & Zuo, M. J. (2010). Current status of machine prognostics in condition-based maintenance: A review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50(1–4), 297–313. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2482-0>
- Petersdorff, H. von, & Vlok, P. J. (2014). Prioritising maintenance improvement opportunities in physical asset management. *South African Journal of Industrial Engineering*, 25(3), 154–168.
- Piechnicki, A. S., Sola, A. V. H., & Trojan, F. (2015). Decision-making towards achieving world-class total productive maintenance. *International Journal of Operations & Production Management*, 35(12), 1594–1621. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-11-2013-0479>
- Pintelon, L., & Parodi-Herz, A. (2008). Maintenance: An Evolutionary Perspective. In K. A. H. Kobbacy & D. N. P. Murthy (Eds.), *Complex System Maintenance Handbook* (pp. 21–48). Springer-Verlag.
- Prajapati, A., Bechtel, J., & Ganesan, S. (2012). Condition based maintenance: a survey. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 18(4), 384–400. <https://doi.org/10.1108/13552511211281552>
- Rainer, R. K., Prince, B., & Cegielski, C. (2013). *Introduction to Information Systems: Supporting and Transforming Business* (Fifth). John Wiley & Sons, Inc.
- Randhawa, J. S., & Ahuja, I. S. (2017). 5S – a quality improvement tool for sustainable performance: literature review and directions. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 34(3), 334–361.

- Rasmekomen, N., & Parlikad, A. K. (2016). Condition-based maintenance of multi-component systems with degradation state-rate interactions. *Reliability Engineering and System Safety*, *148*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.11.010>
- Rastegari, A., & Bengtsson, M. (2014). Implementation of Condition Based Maintenance in manufacturing industry - A pilot case study. *2014 International Conference on Prognostics and Health Management*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICPHM.2014.7036377>
- Ratnayake, R. M. C., & Markeset, T. (2010). Technical integrity management: measuring HSE awareness using AHP in selecting a maintenance strategy. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *16*(1), 44–63. <https://doi.org/10.1108/13552511011030327>
- Rausand, M. (1998). Reliability centered maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, *60*, 121–132. https://doi.org/10.1007/978-1-84882-472-0_16
- Rausand, M. (2014). *Reliability of safety-critical systems*. John Wiley & Sons, Inc.
- Reid, S. R. M., & Xerri, M. J. (2013). The ‘state of play’ in Engineering Asset Management: towards a conceptual frame. *4*(1), 72–83. <https://doi.org/10.1504/IJEME.2013.055987>
- Ren, L., Cheng, X., Wang, X., Cui, J., & Zhang, L. (2019). Multi-scale Dense Gate Recurrent Unit Networks for bearing remaining useful life prediction. *Future Generation Computer Systems*, *94*, 601–609. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.12.009>
- Rencher, A. C. (2002). *Methods of Multivariate Analysis* (Second). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1080/07408170500232784>
- Rezaeianjouybari, B., & Shang, Y. (2020). Deep learning for prognostics and health management: State of the art, challenges, and opportunities. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *163*, 107929. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107929>
- Rocha, A. V., Melo, D. F., Carvalho Maia, T. A., Ferreira, V. N., & Cardoso Filho, B. J. (2019). IoT-Based Degradation Management for Self-Healing Power Converters. *2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2802–2809. <https://doi.org/10.1109/APEC.2019.8722005>
- Ross, Westerfield, & Jordan. (2010). *Fundamentals of Corporate Finance* (Ninth). McGraw-Hill/Irwin.
- Ruijters, E., Guck, D., Drolenga, P., & Stoelinga, M. (2016). Fault maintenance trees: Reliability centered maintenance via statistical model checking. *2016 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 25-28 Jan. 2016, 1–6. <https://doi.org/10.1109/RAMS.2016.7447986>
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process* (Second). Springer Science+Business Media.
- Salo, F., Injadat, M., Nassif, A. B., Shami, A., & Essex, A. (2018). Data mining techniques in intrusion detection systems: A systematic literature review. *IEEE Access*, *6*, 56046–56058. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2872784>
- Sanford, B. Y. W. (2015). An overview of ISO 55000 – standardizing asset management. *Inspection Engineering Journal*, *21*(6), 1–5.
- Saranga, H. (2002). Relevant condition-parameter strategy for an effective condition-based maintenance. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *8*(1), 92–105. <https://doi.org/10.1108/13552510210420612>
- Scarf, P. A. (2007). A Framework for Condition Monitoring and Condition Based Maintenance. *Quality Technology & Quantitative Management*, *4*(2), 301–312.

- <https://doi.org/10.1080/16843703.2007.11673152>
- Schmidt, B., & Wang, L. (2018). Cloud-enhanced predictive maintenance. *Int J Adv Manuf Technol*, *99*, 5–13. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8983-8>
- Schreiber, M., Klöber-Koch, J., Richter, C., & Reinhart, G. (2018). Integrated Production and Maintenance Planning for Cyber-physical Production Systems. *Procedia CIRP*, *72*, 934–939. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.144>
- Schwab, B., & Lusztyg, P. (1969). A Comparative Analysis of the Net Present Value and the Benefit-Cost Ratio as Measures of the Economic Desirability of Investments. *The Journal of Finance*, *24*(3), 507–516.
- Semma, E. M., Mousrij, A., & Gziri, H. (2015). Elaboration of an implementation approach of a condition-based maintenance through vibration analysis. *MATEC Web of Conferences*, *20*, 1–9. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20152007003>
- Semma, E. M., Mousrij, A., & Gziri, H. (2018). Preliminary study of the vibration-based maintenance implementation: case study. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *24*(2), 134–151. <https://doi.org/10.1108/JQME-10-2016-0047>
- Sénéchal, O. (2016). Research directions for integrating the triple bottom line in maintenance dashboards. *Journal of Cleaner Production*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.132>
- Shah, R., Mcmann, O., & Borthwick, F. (2017). Challenges and prospects of applying asset management principles to highway maintenance: A case study of the UK. *Transportation Research Part A*, *97*, 231–243. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.01.011>
- Shao, H., Jiang, H., Wang, F., & Zhao, H. (2017). An enhancement deep feature fusion method for rotating machinery fault diagnosis. *Knowledge-Based Systems*, *119*, 200–220. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2016.12.012>
- Sharma, R. K., Kumar, D., & Kumar, P. (2006). Manufacturing excellence through TPM implementation: a practical analysis. *Industrial Management & Data Systems*, *106*(2), 256–280. <https://doi.org/10.1108/02635570610649899>
- Sharma, S. C. (2006). *Operation Research: Simulation And Replacement Theory* (First). Discovery Publishing House.
- Sherif, Y. S., & Kolarik, W. J. (1981). Life cycle costing: Concept and practice. *Omega*, *9*(3), 287–296. [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(81\)90035-9](https://doi.org/10.1016/0305-0483(81)90035-9)
- Shieh, J., Huber, J. E., Fleck, N. A., & Ashby, M. F. (2001). The selection of sensors. *Progress in Materials Science*, *46*(3–4), 461–504. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00011-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00011-6)
- Shin, J.-H., & Jun, H.-B. (2015). On condition based maintenance policy. *Journal of Computational Design and Engineering*, *2*(2), 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2014.12.006>
- Si, X. S., Wang, W., Hu, C. H., & Zhou, D. H. (2011). Remaining useful life estimation - A review on the statistical data driven approaches. *European Journal of Operational Research*, *213*(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.11.018>
- Sikorska, J. Z., Hodkiewicz, M., & Ma, L. (2011). Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *25*(5), 1803–1836. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2010.11.018>
- Simões, J. M., Gomes, C. F., & Yasin, M. M. (2011). A literature review of maintenance performance

- measurement: A conceptual framework and directions for future research. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 17(2), 116–137. <https://doi.org/10.1108/13552511111134565>
- Simon Haykin. (2017). Adaptive Systems for Signal Process. In S. Stergiopoulos (Ed.), *Advanced Signal Processing: Theory and Implementation for Sonar, Radar, and Non-Invasive Medical Diagnostic Systems* (Second, p. 750). CRC Press Taylor & Francis Group.
- Singh, J., Azamfar, M., Li, F., & Lee, J. (2020). A systematic review of machine learning algorithms for prognostics and health management of rolling element bearings: fundamentals, concepts and applications. *Measurement Science and Technology*, 32(1), 1–52. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab8df9>
- Singh, K., & Ahuja, I. S. (2015). An evaluation of transfusion of TQM-TPM implementation initiative in an Indian manufacturing industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 21(2), 134–153. <https://doi.org/10.1108/JQME-04-2013-0017>
- Singh, R., Gohil, A. M., Shah, D. B., & Desai, S. (2013). Total productive maintenance (TPM) implementation in a machine shop: A case study. *Procedia Engineering*, 51(NUiCONE 2012), 592–599. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.084>
- Smith, R., & Mobley, R. K. (2007). *Rules of thumb for maintenance and reliability engineers* (First). Butterworth-Heinemann Ltd.
- Souza, R. D. Q., & Álvares, A. (2008). FMEA and FTA analysis for application of the reliability-centered maintenance methodology: case study on hydraulic turbines. *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, 3, 803–812.
- Stapelberg, R. F. (2009). *Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design*. Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-175-6>
- Starr, A. G. (1997). A structured approach to the selection of condition based maintenance. *Fifth International Conference on FACTORY 2000 - The Technology Exploitation Process, 1997*(435), 131–138. <https://doi.org/10.1049/cp:19970134>
- Stenström, C., Norrbin, P., Parida, A., & Kumar, U. (2016). Preventive and corrective maintenance – cost comparison and cost–benefit analysis. *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(5), 603–617. <https://doi.org/10.1080/15732479.2015.1032983>
- Stenström, C., Parida, A., Kumar, U., & Galar, D. (2013). Performance indicators and terminology for value driven maintenance. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 19(3), 222–232. <https://doi.org/10.1108/JQME-05-2013-0024>
- Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2012). Using multivariate statistics. In *New York: Harper and Row*. <https://doi.org/10.1037/022267>
- Tai, A. H., & Chan, L. Y. (2010). Maintenance models for a continuously degrading system. *Computers and Industrial Engineering*, 58(4), 578–583. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.12.005>
- Teixeira, C., Lopes, I., & Figueiredo, M. (2018). Classification methodology for spare parts management combining maintenance and logistics perspectives. *Journal of Management Analytics*, 5(2), 116–135. <https://doi.org/10.1080/23270012.2018.1436989>
- Tholana, T. (2016). Extending the application of PAS 55/ ISO 55000 to mineral asset management. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 116(11), 1043–1050. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2016/v116n11a6>
- Thramboulidis, K., & Christoulakis, F. (2016). UML4IoT—A UML-based approach to exploit IoT in cyber-

- physical manufacturing systems. *Computers in Industry*, 82, 259–272. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.05.010>
- Tian, Z., & Liao, H. (2011). Condition based maintenance optimization for multi-component systems using proportional hazards model. *Reliability Engineering and System Safety*, 96(5), 581–589. <https://doi.org/10.1016/j.res.2010.12.023>
- Tian, Z., Lin, D., & Wu, B. (2012). Condition based maintenance optimization considering multiple objectives. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(2), 333–340. <https://doi.org/10.1007/s10845-009-0358-7>
- Tiddens, W. W., Tinga, T., Braaksma, A. J. J., & Brouwer, O. (2017). The business case for condition-based maintenance: A hybrid (Non-) financial approach. *Safety and Reliability - Theory and Applications - Proceedings of the 27th European Safety and Reliability Conference, ESREL 2017, June 2019*, 821–829. <https://doi.org/10.1201/9781315210469-107>
- Tiusanen, R., Jännes, J., Reunanen, M. and Liyanage, J. P. (2011). RAMSI management - from single analyses to systematic approach. *Proceedings of the 24th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (COMADEM2011)*, 1588 – 1596.
- Todinov, M. T. (2005). *Reliability and Risk Models: Setting Reliability Requirements* (First). John Wiley & Sons Ltd.
- Tran, V. T., & Yang, B. S. (2012). An intelligent condition-based maintenance platform for rotating machinery. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 2977–2988. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.08.159>
- Tsang, A. H. C. (1995). Condition-based maintenance: tools and decision making. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 1(3), 3–17. <https://doi.org/10.1108/13552519510096350>
- Tsang, A. H. C. (1998). A strategic approach to managing maintenance performance. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 4(2), 87–94. <https://doi.org/10.1108/13552519810213581>
- Tsang, A. H. C. (2002). Strategic dimensions of maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 8(1), 7–39. <https://doi.org/10.1108/13552510210420577>
- Tsang, A. H. C., Jardine, A. K. S., & Kolodny, H. (1999). Measuring maintenance performance: a holistic approach. *International Journal of Operations & Production Management*, 19(7), 691–715. <https://doi.org/10.1108/01443579910271674>
- Tsang, A. H. C., Yeung, W. K., Jardine, A. K. S., & Leung, B. P. K. (2006). Data management for CBM optimization. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 12(1), 37–51. <https://doi.org/10.1108/13552510610654529>
- Tsui, Kwok L, Chen, N., Zhou, Q., Hai, Y., & Wang, W. (2015). Prognostics and Health Management: A Review on Data Driven Approaches. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2015/793161>
- Tsui, Kwok Leung, Zhao, Y., & Wang, D. (2019). Big Data Opportunities: System Health Monitoring and Management. *IEEE Access*, 7, 68853–68867. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2917891>
- Tywoniaka, S., Rosqvist, T., Mardiasmo, D., & Kivits, R. (2008). Towards an integrated perspective on fleet asset management: engineering and governance considerations. *Proceedings of the 3rd World Congress on Engineering Asset Management and Intelligent Maintenance Systems Conference, October*, 1553–1567. <https://doi.org/10.1017/S0032247413000843>
- Unsworth, K., Adriasola, E., Johnston-Billings, A., Dmitrieva, A., & Hodkiewicz, M. (2011). Goal hierarchy:

- Improving asset data quality by improving motivation. *Reliability Engineering and System Safety*, 96(11), 1474–1481. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.06.003>
- van Staden, H. E., & Boute, R. N. (2021). The effect of multi-sensor data on condition-based maintenance policies. *European Journal of Operational Research*, 290(2), 585–600. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.08.035>
- Vanier, D. J. (2000). Asset management 101: a primer. *APWA International Public Works Congress, NRCC/CPWA Seminar Series "Innovations in Urban Infrastructure,"* 1–15.
- Veldman, J., Wortmann, H., & Klingsberg, W. (2011). Typology of condition based maintenance. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 17(2), 183–202. <https://doi.org/10.1108/13552510910961110>
- Verma, A. K., Ajit, S., & Karanki, D. R. (2016). *Reliability and Safety Engineering* (Second). Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6269-8>
- Vlok, P. J., Coetzee, J. L., Banjevic, D., Jardine, a K. S., & Makis, V. (2002). Optimal component replacement decisions using vibration monitoring and the proportional-hazards model. *Journal of the Operational Research Society*, 53(2), 193–202. <https://doi.org/10.1057/sj/jors/2601261>
- Voisin, A., Levrat, E., Cochetoux, P., & lung, B. (2010). Generic prognosis model for proactive maintenance decision support: Application to pre-industrial e-maintenance test bed. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21(2), 177–193. <https://doi.org/10.1007/s10845-008-0196-z>
- Volkova, I., & Kornienko, E. (2014). The approach to the asset management strategy choice in an electric grid company. *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, 190, 61–71. <https://doi.org/10.2495/EQ140081>
- Waeyenbergh, G., & Pintelon, L. (2002). A framework for maintenance concept development. *International Journal of Production Economics*, 77(3), 299–313. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(01\)00156-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(01)00156-6)
- Waeyenbergh, G., & Pintelon, L. (2004). Maintenance concept development: A case study. *International Journal of Production Economics*, 89(3), 395–405. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2003.09.008>
- Waeyenbergh, G., & Pintelon, L. (2009). CIBOCOF: A framework for industrial maintenance concept development. *International Journal of Production Economics*, 121(2), 633–640. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.10.012>
- Wakiru, J. M., Pintelon, L., Muchiri, P. N., & Chemweno, P. K. (2019). A review on lubricant condition monitoring information analysis for maintenance decision support. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 118, 108–132. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.08.039>
- Wang, F., & Lee, W. (2001). Learning curve analysis in total productive maintenance. *Omega*, 29, 491–499.
- Wang, H., Li, S., Song, L., & Cui, L. (2019). A novel convolutional neural network based fault recognition method via image fusion of multi-vibration-signals. *Computers in Industry*, 105, 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.12.013>
- Wang, L., Chu, J., & Wu, J. (2007). Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process. *International Journal of Production Economics*, 107(1), 151–163. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.08.005>
- Wessels, W. R., & Sautter, F. C. (2009). Reliability analysis required to determine CBM condition indicators. *Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium, January*, 454–459.

- <https://doi.org/10.1109/RAMS.2009.4914719>
- Wiboonrat, M. (2018). Developing diagnostics and prognostics of data center systems implementing with condition-based maintenance. *Proceedings: IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1*, 4901–4906. <https://doi.org/10.1109/IECON.2018.8591203>
- Wienker, M., Henderson, K., & Volkerts, J. (2016). The Computerized Maintenance Management System an Essential Tool for World Class Maintenance. *Procedia Engineering, 138*, 413–420. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.02.100>
- Wijnia, Y., & Croon, J. De. (2014). The Asset Management Process Reference Model for Infrastructures. *9th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2014)*, 1–11.
- Wireman, T. (2004). *Total productive maintenance* (Second). Industrial Press.
- Wittwer, E., Bittner, J., & Switzer, A. (2002). The fourth national transportation asset management workshop. *International Journal of Transport Management, 1*(2), 87–99. [https://doi.org/10.1016/S1471-4051\(02\)00004-6](https://doi.org/10.1016/S1471-4051(02)00004-6)
- Woodhouse, J. (2007). Asset Management: Joining up the jigsaw puzzle – PAS 55 standards for the integrated management of assets. *ME Plant and Maintenance, Sept/Oct*, 12–16.
- Woodward, D. G. (1997). Life Cycle Costing - Theory Information Acquisition and Application. *International Journal of Project Management, 15*(6), 335–344. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(96\)00089-0](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(96)00089-0)
- Ylipää, T., Skoogh, A., Bokrantz, J., & Gopalakrishnan, M. (2017). Identification of maintenance improvement potential using OEE assessment. *International Journal of Productivity and Performance Management, 66*(1), 126–143. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-01-2016-0028>
- Zhang, W., Yang, D., & Wang, H. (2019). *Data-Driven Methods for Predictive Maintenance of Industrial Equipment: A Survey. 13*(3), 2213–2227.
- Zhang, Y., & Dudzic, M. S. (2006). Online monitoring of steel casting processes using multivariate statistical technologies: From continuous to transitional operations. *Journal of Process Control, 16*(8), 819–829. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2006.03.005>
- Zhao, R., Yan, R., Chen, Z., Mao, K., Wang, P., & Gao, R. X. (2019). Deep learning and its applications to machine health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing, 115*, 213–237. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.05.050>
- Zhao, S., Wang, L., & Zheng, Y. (2014). Integrating production planning and maintenance: an iterative method. *Industrial Management & Data Systems, 114*(11), 162–182. <https://doi.org/10.1108/IMDS-07-2013-0314>
- Zheng, Y. (2019). Predicting Remaining Useful Life Based on Hilbert – Huang. *Journal of Electrical and Computer Engineering, 2019*, 1–11.
- Zhu, Q., Peng, H., & van Houtum, G. J. (2015). A condition-based maintenance policy for multi-component systems with a high maintenance setup cost. *OR Spectrum, 37*(4), 1007–1035. <https://doi.org/10.1007/s00291-015-0405-z>
- Zhu, W., Fouladirad, M., & Bérenguer, C. (2015). Condition-based maintenance policies for a combined wear and shock deterioration model with covariates. *Computers and Industrial Engineering, 85*, 268–283. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.04.005>
- Zhu, Z., Peng, G., Chen, Y., & Gao, H. (2019). A convolutional neural network based on a capsule network with strong generalization for bearing fault diagnosis. *Neurocomputing, 323*, 62–75. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.09.050>

APÊNDICE I – MODELOS DE GESTÃO DE ATIVOS

Em dezembro de 2015, o IAM publicou a versão 3 do documento *Asset Management – an anatomy*. A nova versão foi enriquecida com os comentários dos utilizadores das versões 1 e 2, que foram publicadas em 2011 e 2014, respetivamente.

Este documento fornece uma apreciação global sobre o tema da gestão de ativos e apresenta um modelo conceptual para a gestão de ativos. A relevância do modelo advém do facto de a norma ISO 55001 não fazer referência ao modo como a função de gestão de ativos pode ser implementada (IAM, 2015).

O modelo conceptual do IAM engloba um conjunto de seis grupos temáticos que abrangem as 39 disciplinas estabelecidas no documento *Asset Management Landscape* elaborado pelo *Global Forum on Maintenance & Asset Management* (GFMAM). As disciplinas servem de suporte ao modelo e permitem explicar detalhadamente as atividades de gestão de ativos (IAM, 2015). De acordo com o IAM (2015), o modelo foi concebido para mostrar:

1. A variedade de atividades existentes no âmbito da gestão de ativos;
2. As inter-relações entre atividades e a necessidade de integrá-las;
3. O contributo fundamental para alinhar a função de gestão de ativos com os objetivos do plano estratégico da organização e conseguir concretizá-los.

O modelo conceptual e as 39 disciplinas enquadradas no respetivo grupo temático são apresentadas na Figura 62.

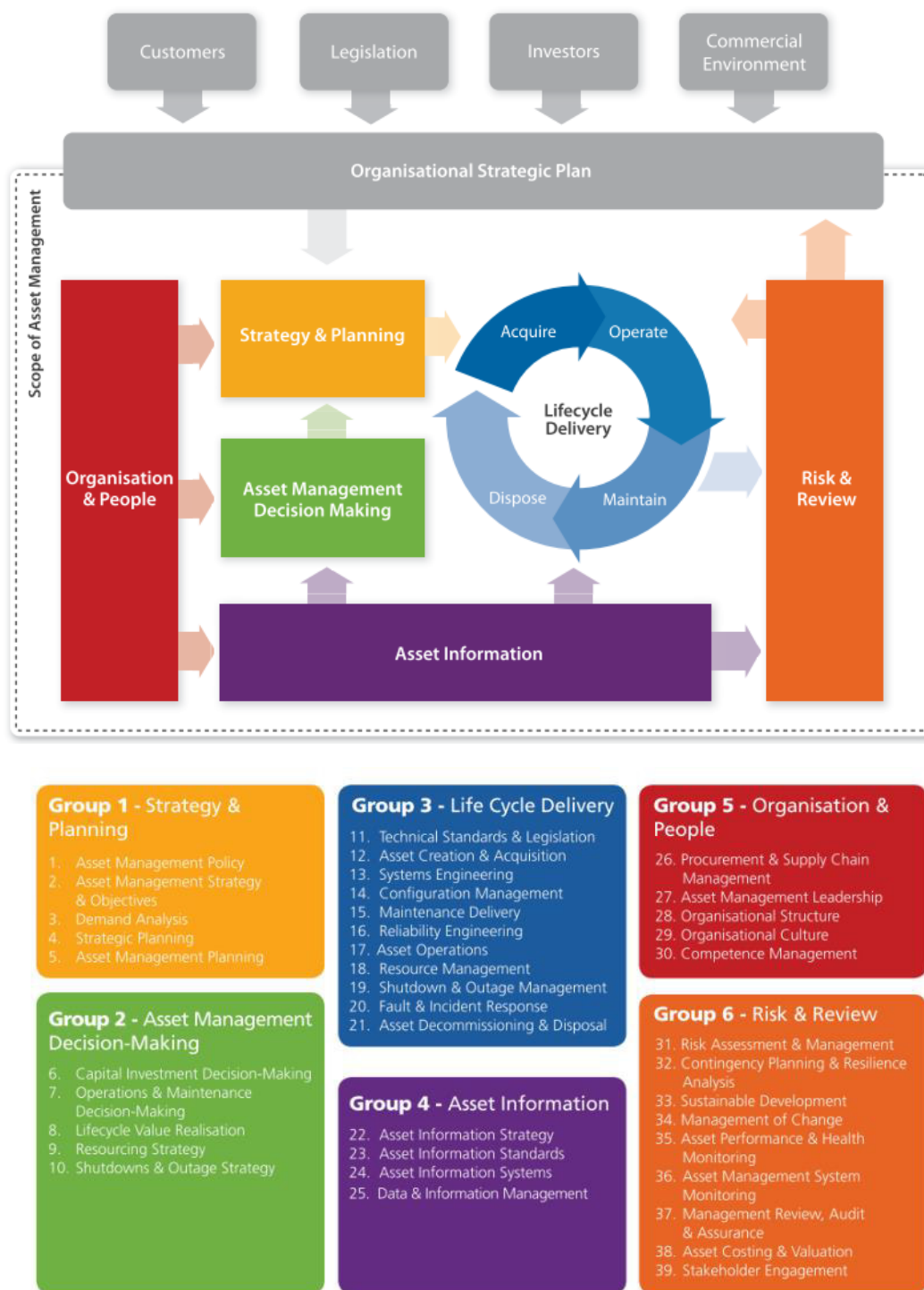


Figura 62 – Modelo conceptual de gestão de ativos do IAM e o alinhamento das 39 disciplinas de gestão de ativos com os grupos temáticos (IAM, 2015).

O IAM desenvolveu uma metodologia destinada a avaliar a capacidade ou maturidade das organizações no cumprimento dos requisitos estabelecidos na PAS 55:2008 ou no âmbito das 27 subcláusulas da norma ISO 55001. Esta metodologia é apresentada no documento *The Self-Assessment Methodology – Guidance*, publicado em junho de 2014. Trata-se de uma metodologia de autoavaliação que pode ser aplicada por empresas de qualquer setor de atividade, com o intuito de identificar pontos fortes e fracos,

deficiências e áreas de excelência. Além disso, serve de complemento e de apoio à certificação de sistemas de gestão de ativos e os resultados das avaliações podem ser utilizados pelas organizações em iniciativas de *benchmarking* (IAM, 2014).

A escala de maturidade da metodologia e as orientações associadas têm em consideração a maturidade do sistema de gestão de ativos (estabelecido em conformidade com a norma de referência) e da função de gestão de ativos (definida pelas 39 disciplinas). O *IAM Maturity Group* definiu uma escala com cinco níveis de maturidade que também contempla as características potenciais exibidas por uma organização que supera os requisitos da norma (Figura 63). As organizações identificam o seu nível de maturidade depois de considerarem os conteúdos relativos a todos os níveis anteriores. O nível de competência no cumprimento dos requisitos da norma ISO 55001 é aferido com base nas respostas a um conjunto de 39 questões que abrangem cada uma das 27 subcláusulas da norma. O conjunto de questões estabelecidas pela metodologia de autoavaliação foi concebido para classificar somente até ao nível de maturidade 3, cuja designação é *Competent*. Os níveis 4 e 5 são denominados *Optimising* e *Excellent*, respetivamente. À combinação dos dois níveis mais elevados é atribuída a classificação *Beyond* (IAM, 2014). Esta designação baseia-se no pressuposto de que a maturidade vai além do cumprimento dos requisitos da norma ISO 55001. A cultura organizacional constitui uma característica diferenciadora destes níveis e contempla o grau dos comportamentos relacionados com a aprendizagem e a melhoria contínua (IAM, 2015).



Figura 63 – Escala de maturidade referente à norma ISO 55001 (IAM, 2015).

Na conceção da metodologia de autoavaliação, foi atribuída a mesma importância a todas as questões. No entanto, a importância de cada questão poderá variar de organização para organização, visto que determinados elementos da norma poderão ter maior relevância do que outros. Depois de concluída a avaliação, a pontuação média pode ser representada em gráficos radar (Figura 64).

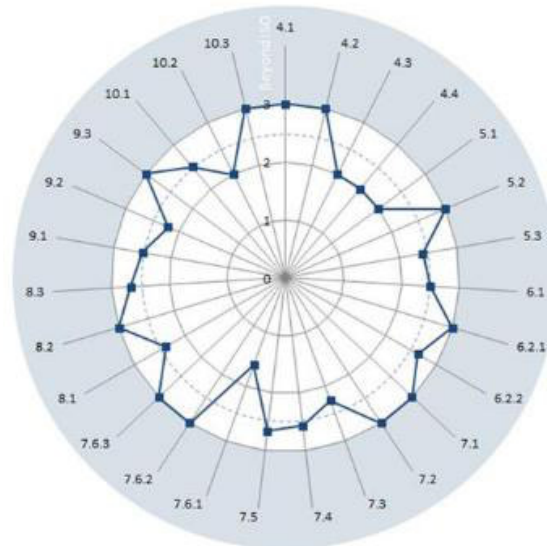


Figura 64 – Gráfico radar (IAM, 2015).

No âmbito de um estudo no setor da construção, Vanier (2000) definiram um plano para a implementação da gestão de ativos constituído por múltiplos níveis e baseado em seis questões. Cada nível descreve ferramentas e técnicas de gestão de ativos apropriadas e cada questão estabelece um enquadramento para a implementação do plano de gestão de ativos. As questões consideradas são:

- O que é que detém?
- Qual é o seu valor?
- Qual é a manutenção diferida?
- Qual é a sua condição?
- Qual é a vida restante do serviço?
- O que é reparado primeiro?

El-akruti & Dwight (2013) estabeleceram uma estrutura para um sistema de gestão de ativos centrada no planeamento e controlo de atividades relacionadas com os ativos e definiram um modelo funcional sistemático que é integrado no sistema de controlo empresarial. A estrutura desenvolvida inclui os níveis organizacionais (estratégico, tático e operacional) e as atividades, relações e mecanismos do sistema de gestão de ativos. A gestão das atividades relacionadas com os ativos é realizada por um processo constituído por um ciclo de atividades de planeamento e controlo nos diferentes níveis de gestão. O processo de planeamento e controlo é um processo iterativo. A utilização de mecanismos de *feed-forward* e de *feedback* permite que a função de gestão de ativos seja considerada no desenvolvimento e implementação da estratégia de negócio. A Figura 65 representa a integração da função de gestão de ativos com o sistema empresarial.

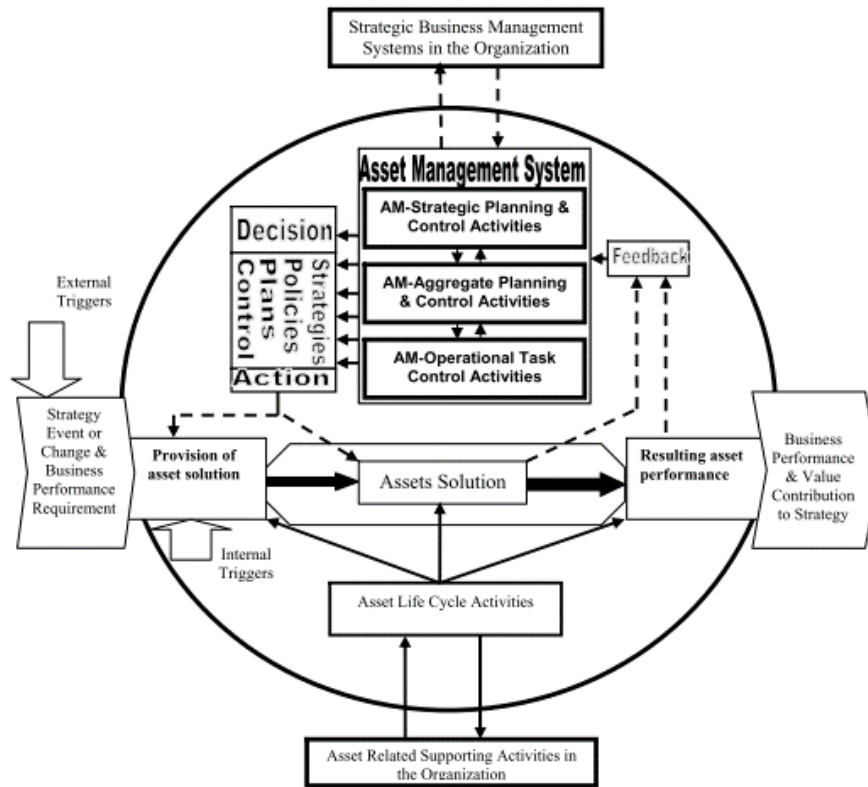


Figura 65 – Modelo funcional do sistema de gestão de ativos (El-akruti & Dwight, 2013).

Wijnia & Croon (2014) apresentam um modelo de referência para o sistema de gestão de ativos de infraestruturas. O modelo cumpre os requisitos da norma ISO 55001 e os requisitos estabelecidos no âmbito da gestão de infraestruturas. O modelo considera que a gestão de ativos é um processo de gestão, visto que controla todo o ciclo de vida das infraestruturas. O processo de gestão de ativos é formado por quatro subprocessos: gerir a base de ativos, gerir capacidades, gestão de informação e gestão de revisão. Os subprocessos são depois decompostos em processos de trabalho constituídos por diferentes atividades. Estas devem ser realizadas por um funcionário dotado das competências necessárias de acordo com o procedimento instituído. O processo de trabalho relativo à gestão de risco é enfatizado e apresentado com maior detalhe devido à importância que assume no contexto das infraestruturas. Neste processo, está incluída a atividade de estruturação do risco. Os autores salientam que os estudos existentes carecem de uma atividade específica para prevenir a sobreposição entre riscos. Na Figura 66, são apresentados os níveis do processo de gestão de ativos segundo estes autores.

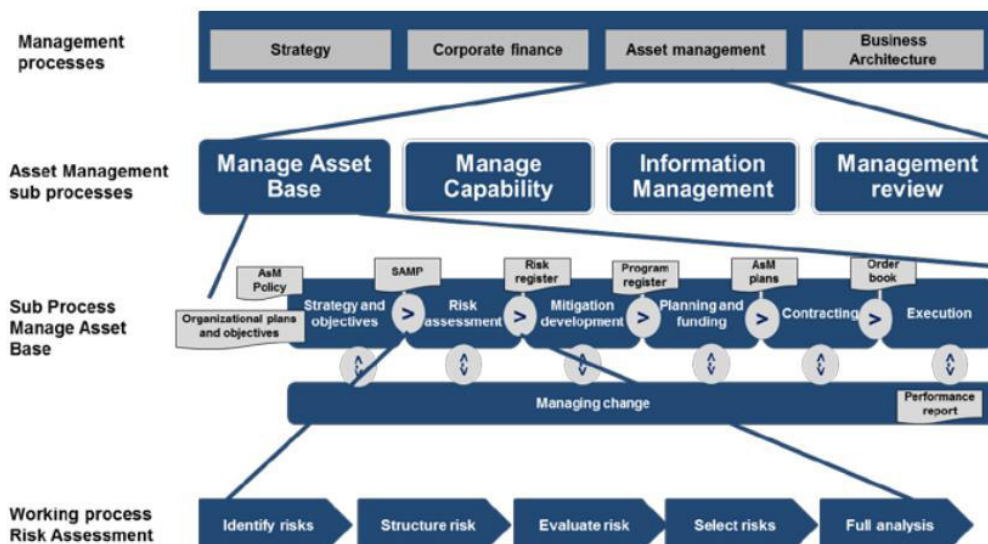


Figura 66 – Hierarquia do processo de gestão de ativos (Wijnia & Croon, 2014).

Komljenovic *et al.* (2016) definiram um modelo holístico de decisão baseado no risco, destinado à gestão de ativos (Figura 67). A atividade de gestão e avaliação do risco considerada no modelo integra riscos de eventos extremos e raros. Trata-se de um modelo genérico que pode ser implementado por empresas de diferentes tipos e dimensões. A sua aplicação é recomendada no âmbito de decisões estratégicas e de gestão de ativos que afetam o desempenho de médio e longo prazo, e a sustentabilidade da organização. O modelo é composto por sete submodelos: mercado, fatores de fiabilidade, disponibilidade e manutenção, operações e restrições operacionais, receita e custos, organizacional e negócio, outros fatores e submodelo relativo ao plano estratégico.



Figura 67 – Modelo de decisão baseado no risco para a gestão de ativos (Komljenovic *et al.*, 2016).

APÊNDICE II – CATEGORIAS E SUBCATEGORIAS DOS MODELOS DE PROGNÓSTICO

Tabela 75 – Descrição das principais categorias e subcategorias dos modelos de prognóstico (adaptado de Sikorska *et al.*, 2011).

Categorias	Subcategorias				
1. Modelos baseados no conhecimento	Avaliam a similaridade entre uma situação observada e uma base de dados de falhas previamente definidas e deduzem a expectativa de vida com base em eventos anteriores.	1.1. Sistemas especializados	Consiste numa base de conhecimento que contém experiência acumulada por especialistas num determinado tema e uma base de regras para aplicar esse conhecimento a problemas específicos conhecidos pelo sistema de <i>software</i> .		
		1.2. Sistemas difusos	Inclui uma base de conhecimento, base de regras difusas e algoritmos para aplicar a lógica subjacente, convertendo dados provenientes de várias fontes, após pré-processamento, em representações difusas que podem ser comparadas com conjuntos de regras difusas.		
2. Modelos de esperança de vida	Determinam a esperança de vida de componentes individuais do equipamento, relativamente ao risco esperado de deterioração, sob condições de operação conhecidas.	2.1. Modelos estocásticos	2.1.1. Funções agregadas de fiabilidade:	São utilizadas para determinar o tempo até à falha, com base na análise de dados de falha relativos a uma população de equipamentos ou modos de falha.	2.1.2.1. Função densidade de probabilidade da RUL: Aplica-se a modos de falha específicos. A distribuição considerada é atualizada sempre que uma nova observação relevante é realizada. As observações alteram-se à medida que o processo de degradação progride, desde a falha incipiente até à falha final.
			2.1.2. Métodos condicionais de probabilidade: Descrevem o estado atual sob a forma de uma função de fiabilidade condicional e utilizam o teorema de <i>Bayes</i> para atualizar as estimativas de probabilidade do comportamento futuro.		

Categorias

Subcategorias

2.1.2.3. Redes Bayesianas dinâmicas:

Os arcos direcionais da rede Bayesiana seguem o sentido do tempo. Permitem atualizar o estado do sistema ao longo do tempo e determinar a probabilidade de um evento ocorrer no momento seguinte (ex.: dados de séries temporais).

2.1.2.3.1. Modelos de Markov e modelos de semi-Markov:

Assumem que o sistema ou componente pode ser apenas um de um número finito de estados. As probabilidades de falhas futuras são estimadas considerando as probabilidades associadas a cada estado e à transição entre estados. Os estados futuros são independentes de todos os estados passados, exceto do mais recente. Para fins de prognóstico, cada estado pode representar apenas uma das opções: falha ou disponível. Outros pressupostos são: a probabilidade de transição de um estado para o outro não se altera com o tempo; o tempo de permanência num estado específico é exponencialmente distribuído com uma taxa constante; a soma de todas as probabilidades de transição entre estados deve ser igual a 1. Os modelos de semi-Markov permitem que o tempo de permanência possa considerar outras distribuições, por isso são mais adequados para determinar a RUL.

2.1.2.3.2. Modelos escondidos e modelos semiescondidos de Markov:

Consideram que nem todos os estados são diretamente observáveis e, por isso, as respectivas probabilidades de transição não são diretamente atribuídas. Para superar a falta de informação, o modelo deve ser treinado com dados que representam falhas conhecidas. Em contraste com os modelos escondidos, os modelos semiescondidos de Markov não assumem uma taxa de falhas constante, permitem que permanência num estado específico seja modelada utilizando qualquer distribuição, e permitem modelar fenômenos espaciais e temporais sem exigir conhecimento sobre os mecanismos físicos que governam a progressão dos modos de falha.

Categorias

Subcategorias

2.1.2.3.3. Estimativa Bayesiana com filtros *Kalman*.

É uma técnica digital de processamento recursiva utilizada para estimar o estado de um sistema dinâmico a partir de uma série de medições incompletas e com ruído, de modo a minimizar o desvio quadrático médio. Permite estimar estados desconhecidos com base em observações atuais e no estado mais recente. O processo é composto por um ciclo que envolve as seguintes etapas: prever o próximo estado (1), prever a covariância do erro (2), calcular o ganho (3), corrigir a estimativa com a medição (4), corrigir a covariância do erro (5). Assumem que o ruído do processo e das medições seguem uma distribuição normal, são independentes e aditivos. Em processos não lineares podem ser utilizadas variantes, tais como: *Extended Kalman Filters (EKF)*, *Gauss-Hermite Quadrature Kalman Filters (GHKF)*, *Unscented Kalman Filters (UKF)* e *Monte-Carlo Kalman Filters (MCKF)*.

2.1.2.3.4. Estimativa Bayesiana com filtros de partículas:

Envolve a aplicação de métodos de simulação de Monte Carlo. Não estão sujeitos aos pressupostos de linearidade e de distribuição normal do ruído. Os filtros de partículas estimam a função densidade de probabilidade posterior por extrapolação do estado precedente. Utilizam um conjunto de amostras aleatórias designadas de partículas, a partir de uma função densidade de probabilidade teórica e depois ajustam o conjunto associado de ponderações de partículas a cada iteração. Em cada ciclo, também são geradas amostras de ruído dinâmico. Quando o número de iterações é elevado, pode ser necessário realizar reamostragem para substituir partículas de baixa probabilidade.

Categorias	Subcategorias
	<p>2.2. Modelos estatísticos</p> <p>2.2.1. Avaliação de tendência:</p> <p>Baseia-se na análise da tendência ao longo do tempo de um único parâmetro monotônico correlacionado com a vida útil restante, originado a partir de dados provenientes de um ou mais sensores. A tendência é calculada utilizando métodos de regressão e podem ser estabelecidos limites correspondentes a diferentes níveis de degradação. Caso não existam dados para representar todos os níveis de degradação, a tendência deve ser extrapolada. Quando são utilizados apenas dados interpolados, podem ser determinados limites de confiança com base na variância da tendência subjacente.</p> <p>2.2.2. Modelos autorregressivos:</p> <p>Incluem o modelo ARMA e as variantes ARIMA e ARMAX. Assumem que o valor futuro é uma função linear de observações do passado e de erros aleatórios, e são utilizados para modelar e prever dados em série temporal. Os modelos ARMA e ARMAX devem ser aplicados a dados estacionários, enquanto os modelos ARIMA podem ser utilizados para descrever sistemas com perturbações de baixa frequência.</p> <p>2.2.3. Outros modelos de série temporal:</p> <p>São utilizados quando as tendências temporais dos parâmetros de prognóstico não são lineares, por isso constituem uma alternativa aos modelos ARMA. Incluem, por exemplo, a regressão <i>Dempster-Shafer</i>.</p> <p>2.2.4. Modelo de riscos proporcionais:</p> <p>Permite modelar o modo como variáveis explanatórias ou concomitantes (covariáveis) afetam a vida do equipamento, assumindo que as covariáveis têm uma relação multiplicativa com a taxa global de risco.</p>
3. Redes neurais artificiais	<p>Permitem estimar a RUL de um componente ou sistema, de modo direto ou indireto, através de uma representação matemática, originada a partir de dados observados, sem exigir a compreensão física do processo de falha.</p> <p>3.1. Previsão direta da RUL</p> <p>Envolve a aplicação de uma rede neural para prever os pontos subsequentes de uma série temporal de valores medidos que representam grandezas físicas ou de valores resultantes de uma rotina de pré-processamento (ex.: análise de componentes principais), até ser alcançado o valor correspondente à falha.</p>

Categorias

Subcategorias

	<p>3.2. Estimativa paramétrica para outros modelos</p>	<p>Envolve a utilização das redes neurais para estimar parâmetros de uma função conhecida originada habitualmente aplicando técnicas referentes à física de falha.</p>
<p>4. Modelos físicos</p>	<p>Permitem estimar a vida útil restante de um componente ou sistema, a partir de uma representação matemática do comportamento físico do processo de degradação de um modo de falha específico.</p>	

APÊNDICE III – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Metodologia de seleção da política de manutenção e de apoio à implementação da manutenção condicionada

1. Método para ranking dos equipamentos

Será proposto um método flexível, destinado a priorizar os equipamentos de uma empresa ou de uma linha de produção, com base na sua criticidade, considerando critérios identificados na literatura relacionada com a gestão da manutenção. Os critérios devem refletir a criticidade equipamento do ponto de vista operacional e financeiro. Também se pretende que o método possa ser facilmente adaptado, de forma a contemplar critérios alternativos ou complementares. Em particular, critérios alinhados com os objetivos das empresas que pretendam implementar a metodologia. Pretende-se ainda que seja fácil obter informação rigorosa para a aplicação do método em contexto real. Da aplicação do método proposto, resultará um ranking que definirá a ordem pela qual os equipamentos considerados serão analisados.

2. Método de classificação multicritério dos componentes do equipamento

A classificação dos componentes do equipamento será efetuada recorrendo a um método multicritério identificado na literatura (Teixeira, Lopes, & Figueiredo, 2018). O método destina-se a classificar os componentes, de acordo com a sua criticidade, considerando dois critérios principais: a função desempenhada pelo componente e o impacto da ocorrência da falha do componente no processo produtivo. Pretende-se que a aplicação do método de classificação permita distinguir os componentes críticos dos componentes não críticos de uma máquina.

3. Procedimento para definir a criticidade dos modos de falha

Será definido um procedimento para orientar a definição da criticidade dos modos de falha dos componentes críticos (especificação 2). Para cada componente crítico, pretende-se identificar os modos de falha, as respetivas causas e efeitos, e o comportamento da função de risco. A criticidade dos modos de falha deverá ser avaliada tendo em consideração o seu impacto no processo produtivo e no contexto de operação. Esta tarefa será efetuada utilizando um formulário baseado na ferramenta FMEA e recorrendo aos registos de falhas, à semelhança do que é realizado na metodologia RCM.

4. Seleção da política de manutenção

A seleção da política de manutenção a adotar para cada modo de falha (MF) crítico será realizada com base em árvores de decisão. Pretende-se definir árvores de decisão genéricas destinadas a apoiar a seleção da política de manutenção, considerando o impacto do modo de falha e o comportamento da função de risco. A aplicação das árvores de decisão será realizada recorrendo a informação obtida para os modos falha críticos através do formulário baseado na ferramenta FMEA. A análise da árvore de decisão deverá considerar os custos associados à política de manutenção (especificação 6). No caso das políticas de manutenção preventiva condicionada (MPC), também deverá ser tida em conta a análise da aplicabilidade e da eficácia (especificação 9).

5. Definição dos parâmetros da política de manutenção preventiva sistemática

Serão fornecidas orientações para a atribuição de uma política de manutenção preventiva sistemática (MPS) específica em função do impacto do modo de falha. No âmbito da metodologia proposta, entende-se por MPS a substituição preventiva de componentes do equipamento. Nesse sentido, deverão ser propostos modelos de otimização associados à política de substituição baseada na idade e à política de substituição em bloco, com vista a definir a periodicidade das ações de MPS. Para cada caso, será definido o critério de decisão mais adequado, nomeadamente o custo de manutenção ou a disponibilidade do equipamento.

6. Análise de custos de manutenção

Será desenvolvido um modelo destinado a analisar os custos associados à aplicação da manutenção corretiva (MC), MPS, MPC e ações de melhoria. A análise de custos deverá contemplar os custos diretos e indiretos de cada política. Os custos diretos serão analisados tendo em conta diferentes categorias de custos, nomeadamente a mão de obra e o consumo de peças sobressalentes. No caso da MPC, também deverão ser considerados custos relativos a dispositivos de medição, tecnologias de informação e comunicação, *software* e formação. A análise destes custos deverá ser efetuada após a definição dos parâmetros a monitorizar e da técnica de análise de dados a aplicar. Os custos indiretos serão analisados tendo em conta potenciais perdas de produção decorrentes da aplicação de cada política.

7. Procedimento para definir os modos de falha prioritários para a implementação da manutenção preventiva condicionada

No âmbito da análise da aplicabilidade da MPC, deverão ser consideradas três situações distintas: parâmetros que já são monitorizados, parâmetros associados a sensores instalados no equipamento que não estão a ser monitorizados e parâmetros associados a sensores a instalar. Nas duas últimas situações, será necessário definir os parâmetros que serão efetivamente monitorizados.

Para os modos de falha candidatos à implementação da MPC que não estão relacionados com os parâmetros já monitorizados, será considerada a monitorização de parâmetros relativos a sensores já instalados no equipamento cujos dados não são registados, ou a monitorização de outros parâmetros recorrendo a novos sensores. Nesse sentido, será desenvolvido um procedimento que forneça orientações para apoiar a definição de parâmetros a monitorizar no equipamento, considerando a informação sobre os modos de falha críticos para os quais se questiona a aplicabilidade da MPC (especificação 3), e para ordenar estes modos de falha do mais prioritário para o menos prioritário.

Em primeiro lugar, deverá ser realizado um levantamento dos sensores já instalados no equipamento e identificado o parâmetro que cada sensor permite medir. Posteriormente, será efetuado um estudo com vista a obter evidências que permitam verificar a adequação dos parâmetros identificados para aplicar a MPC aos modos de falha considerados. Para os sensores selecionados, deverão ser proporcionados meios que permitam assegurar o registo dos dados medidos.

8. Procedimento para definir os dispositivos de medição de dados

Será desenvolvido um procedimento destinado a orientar a definição dos novos dispositivos de medição de dados a utilizar em função do parâmetro que se pretende monitorizar no equipamento. A seleção dos dispositivos de medição de dados será realizada tendo em conta os critérios mais relevantes para cada aplicação da MPC. Só serão realizados testes se existir uma convicção elevada de que a análise dos valores dos parâmetros medidos permite detetar o modo de falha considerado. Para cada sensor a instalar no equipamento, deverão ser identificadas a localização e a posição mais adequadas. Sempre que se justifique, também deverá ser ponderada a utilização de dispositivos externos de medição.

9. Procedimento para analisar o impacto dos modos de falha em parâmetros do equipamento/processo

Será desenvolvido um procedimento que proporcione orientações destinadas a analisar o comportamento de parâmetros do equipamento ou do processo na presença do modo de falha para o qual se pretende testar a aplicabilidade da manutenção condicionada. O impacto do modo de falha será determinado com base em alterações súbitas, padrões ou tendências nos valores medidos no período que antecedeu a falha funcional à qual deu origem. Para esse efeito, serão cruzados dados do histórico de avarias e dados relativos aos parâmetros monitorizados.

**APÊNDICE IV – ETAPAS DA ANÁLISE DOS DADOS DE FALHA E
MODELOS MATEMÁTICOS ASSOCIADOS ÀS POLÍTICAS DE MPS**

IV.1. Etapas da análise dos dados de falha

A análise preliminar dos dados de falha, recomendada no âmbito da definição dos parâmetros da política de MPS (secção 4.6), envolve as duas etapas descritas em seguida.

IV.1.1. Estimativa dos parâmetros da distribuição de *Weibull*

Este passo visa determinar os valores dos parâmetros β e η da distribuição de *Weibull*, considerando que $\gamma=0$, a partir dos dados de falha relativos ao modo de falha considerado. Os parâmetros β e η são sempre positivos e permitem o ajuste a uma grande variedade de distribuições estatísticas.

Quando $\gamma=0$, a função distribuição de probabilidade de falha, $F(t)$, da distribuição de *Weibull* é representada pela seguinte expressão:

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (\text{A.1})$$

Onde t representa a variável tempo, β é o parâmetro de forma e η é o parâmetro de escala.

Caso se constate que o valor de β é superior a 1, assume-se que a respetiva função de risco é crescente e considera-se que a MPS é eficaz, visto que irá permitir reduzir o risco de falha. Por outro lado, se o valor de β não for superior a 1, assume-se que a função de risco é decrescente e considera-se que a aplicação da MPS não é eficaz, uma vez que não irá permitir reduzir o risco de falha. Neste caso, a classificação atribuída no procedimento P1 da metodologia deverá ser alterada, caso se verifique que a distribuição de *Weibull* se ajusta adequadamente ao conjunto de dados de falha.

Tendo em conta que as políticas propostas neste procedimento contemplam situações em que os componentes do equipamento são substituídos por componentes idênticos novos, assume-se o pressuposto “*as good-as-new*” ou manutenção perfeita. Neste caso, considera-se que os valores de tempo até à falha são Independentemente e Identicamente Distribuídos (IID). Ou seja, pode assumir-se que o processo que gera as falhas é estável. Por isso, é apropriado realizar uma análise de *Weibull* para modelar a distribuição dos valores de tempo até à falha.

Quando se pretender verificar se os valores de tempo até à falha são IID, deverá ser aplicado o teste de tendência de Laplace. Este teste é utilizado para detetar a existência de tendências num conjunto de dados relativos a tempos de eventos sucessivos. A aplicação do teste de tendência de Laplace é recomendada em situações em que o componente está sujeito a falhas prematuras resultantes de fatores

externos, tais como relações de dependência com outros componentes ou condições físico-químicas adversas do ambiente de operação.

IV.1.2. Avaliação o grau de ajuste da distribuição de *Weibull*

Com este passo, pretende-se inferir se a distribuição de *Weibull* se ajusta de forma adequada ao conjunto de dados de falha existentes.

Inicialmente, a qualidade de ajuste deverá ser analisada com base no valor do coeficiente de determinação (R^2) do modelo linear utilizado. O valor percentual de R^2 corresponde à percentagem de variância da variável dependente que é explicada pelo modelo. Assim, quanto maior for o valor de R^2 , mais elevada é a qualidade de ajuste ao conjunto de dados.

Em seguida, de forma a complementar a análise, deverá ser aplicado o teste de *Kolmogorov-Smirnov* (K-S). O teste K-S permite testar a hipótese de uma função cumulativa de distribuição, $F_0(t)$, ser igual a uma função cumulativa de distribuição hipotética, $F(t)$, (hipótese nula) com um nível de significância α . Sendo que α representa o risco de rejeitar erradamente a hipótese nula. O valor correspondente ao nível de significância definido é obtido a partir da tabela de valores críticos para a estatística K-S, em função da dimensão do conjunto de dados.

Neste caso, deverá ser definido um nível de significância $\alpha = 5\%$. Desta forma, poderão verificar-se duas situações:

1. O valor da estatística do teste K-S determinado é inferior ou igual ao valor correspondente a $\alpha = 5\%$. Sendo assim, considera-se que a distribuição de Weibull se ajusta aos dados de falha (a hipótese nula não é rejeitada).
2. O valor da estatística do teste K-S determinado é superior ao valor correspondente a $\alpha = 5\%$. Sendo assim, considera-se que a distribuição de Weibull não se ajusta aos dados de falha (a hipótese nula é rejeitada).

Caso se verifique a situação 2, deverá confirmar-se se será conveniente utilizar um conjunto maior de dados de falha na análise. Sempre que se constatare que os dados utilizados são insuficientes, a análise deverá ser refeita recorrendo a um conjunto maior de dados. Se tal não for possível de imediato ou se na análise subsequente se verificar novamente a situação 2, o intervalo de MPS deverá ser definido com base em recomendações do fornecedor e/ou na experiência.

IV.2. Modelos matemáticos associados às políticas de MPS

IV.2.1. Substituição baseada numa probabilidade de falha predefinida

Para os modos de falha das subcategorias A.4 e B.4, propõe-se a definição de um intervalo de manutenção que permita assegurar uma probabilidade de falha predefinida. A probabilidade de falha associada à política de MPS será estabelecida tendo em consideração os efeitos do modo de falha em questão. Para esse propósito, será considerada a distribuição de *Weibull* de 2 parâmetros.

Resolvendo a expressão (A.1) em ordem a t obtém-se uma expressão matemática que permite determinar a dimensão do intervalo de substituição preventiva correspondente.

$$t = \eta \ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \quad (\text{A.2})$$

O objetivo é definir um intervalo de manutenção preventiva que permita assegurar que a probabilidade de falha não seja superior a um valor predefinido p , ou seja $F(t) \leq p$. Sendo assim, de forma a garantir que o valor de p não é excedido, o intervalo entre substituições preventivas, t , pode ser definido com base na seguinte expressão (Kardon & Fredendall, 2002):

$$t \leq \eta \ln \left(\frac{1}{1 - p} \right) \quad (\text{A.3})$$

IV.2.2. Substituição baseada na idade

Esta política consiste em realizar uma substituição preventiva quando o item alcançou uma idade específica, t_p , e substituições quando se verificam falhas.

IV.2.2.1. Minimização do custo total por unidade de tempo

O objetivo é determinar a idade ótima de substituição de um item para minimizar o custo total de substituição esperado por unidade de tempo.

O custo total de substituição esperado por unidade de tempo, $C(t_p)$, é representado pela seguinte expressão matemática (Gold, 2013):

$$C(t_p) = \frac{C_p \times R(t_p) + C_f \times [1 - R(t_p)]}{t_p \times R(t_p) + M(t_p) \times [1 - R(t_p)]} \quad (\text{A.4})$$

Em que,

C_p é o custo total da substituição preventiva.

C_f é o custo total de uma substituição motivada pela falha.

$f(t)$ é a função densidade de probabilidade dos tempos de falha do item.

$R(t_p)$ é a fiabilidade até ao instante t_p .

$M(t_p)$ é a média da distribuição de probabilidade truncada em t_p e é representada pela expressão:

$$M(t_p) = \frac{1}{F(t_p)} \int_0^{t_p} tf(t)dt \quad (\text{A.5})$$

O valor da idade de substituição, t_p , é obtido resolvendo a expressão (A.4), recorrendo a um método numérico ou gráfico.

IV.2.2.2. Minimização da indisponibilidade por unidade de tempo

O objetivo é determinar a idade ótima, t_p , em que devem ocorrer substituições preventivas, de forma a minimizar a indisponibilidade total por unidade de tempo.

A indisponibilidade total por unidade de tempo, $D(t_p)$, é representada pela seguinte expressão matemática (Gold, 2013):

$$D(t_p) = \frac{T_p R(t_p) + T_f [1 - R(t_p)]}{(t_p + T_p)R(t_p) + [M(t_p) + T_f][1 - R(t_p)]} \quad (\text{A.6})$$

Em que,

T_f é a indisponibilidade média requerida para fazer uma substituição devido a falha.

T_p é a indisponibilidade média requerida para fazer uma substituição preventiva.

$f(t)$ é a função densidade de probabilidade dos tempos de falha do item.

$R(t_p)$ é a fiabilidade até ao instante t_p .

$M(t_p)$ é a média da distribuição de probabilidade truncada em t_p .

O valor da idade de substituição, t_p , é obtido resolvendo a expressão (A.6), com base num método numérico.

IV.2.3. Substituição em bloco

Esta política consiste em realizar substituições preventivas em intervalos constantes de dimensão t_p , independentemente da idade do item, e substituições devido a falha sempre que é requerido no intervalo $[0, t_p]$.

IV.2.3.1. Minimização do custo total por unidade de tempo

O objetivo é determinar o intervalo ótimo entre substituições preventivas para minimizar o custo total esperado de substituição por unidade de tempo.

Quando a política envolve a substituição de um item individualmente, o custo total de substituição esperado por unidade de tempo, $C(t_p)$, é representado pela seguinte expressão matemática (Gold, 2013):

$$C(t_p) = \frac{C_p + C_f H(t_p)}{t_p} \quad (\text{A.7})$$

O valor ótimo é obtido derivando a expressão (A.7) em ordem a t_p e igualando-a a zero. A expressão resultante é a seguinte:

$$\frac{C_p}{C_f} = t_p h(t_p) - H(t_p) \quad (\text{A.8})$$

Em que,

C_p é o custo total de uma substituição preventiva.

C_f é o custo total de uma substituição motivada pela falha.

$h(t_p)$ é a função de risco até ao instante t_p e é representada pela expressão:

$$h(t_p) = \frac{f(t_p)}{R(t_p)} \quad (\text{A.9})$$

$H(t_p)$ é o número esperado de falhas no intervalo $[0, t_p]$ e é representado pela expressão:

$$H(t_p) = \int_0^{t_p} h(t) dt \quad (\text{A.10})$$

No caso da distribuição de *Weibull*, $H(t_p)$ é obtido com base na expressão seguinte:

$$H(t_p) = \left(\frac{t_p}{\eta}\right)^\beta \quad (\text{A.11})$$

Nas situações em que a política envolve a substituição de grupos de itens similares, o custo total de substituição esperado por unidade de tempo, $C(t_p)$, é representado pela seguinte expressão matemática (Gold, 2013):

$$C(t_p) = \frac{NC_g + NH(t_p)C_f}{t_p} \quad (\text{A.12})$$

Em que,

C_g é o custo de substituição de um item sob condições de substituição em grupo.

C_f é o custo total de uma substituição motivada pela falha.

$f(t)$ é a função densidade de probabilidade dos tempos de falha dos itens.

N é o número total de itens no grupo.

A substituição em grupo deverá ser aplicada se for considerada mais vantajosa financeiramente do que a substituição individual.

IV.2.3.2. Minimização da indisponibilidade por unidade de tempo

O objetivo é determinar um intervalo ótimo de substituição, t_p , entre substituições preventivas para minimizar a indisponibilidade por unidade de tempo.

A indisponibilidade total por unidade de tempo, $D(t_p)$, é representada pela seguinte expressão matemática (Gold, 2013):

$$D(t_p) = \frac{H(t_p)T_f + T_p}{t_p + T_p} \quad (\text{A.13})$$

Em que,

T_f é a indisponibilidade média requerida para fazer uma substituição devido a falha.

T_p é a indisponibilidade média requerida para fazer uma substituição preventiva.

$H(t_p)$ é o número esperado de falhas no intervalo $[0, t_p]$.

APÊNDICE V – MÉTODO DE SELEÇÃO DE SENSORES

O método de seleção de sensores proposto por Jones *et al.* (2018) envolve a aplicação de três matrizes (Figura 68). Cada matriz diz respeito a um tipo específico de requisitos. Os tipos de requisitos são abordados pela ordem seguinte:

- **Requisitos de desempenho:** relacionam-se com o desempenho do sensor;
- **Requisitos físicos e ambientais:** relacionam-se com as características físicas do sensor e com o ambiente de operação, respetivamente;
- **Requisitos comerciais:** são requisitos que podem influenciar o custo de implementação do sensor.

A definição de limites para os critérios referentes aos tipos de requisitos 1 e 2 poderá basear-se na literatura ou na experiência. Pretende-se que o sensor selecionado cumpra de forma satisfatória todos os requisitos definidos.

1. Requisitos de desempenho		Descrição	Critérios			Total
			C1	C2	C3	
			Limites	Limites	Limites	
Sensor	S1		2	1	2	4
	S2		1	2	1	2
	S3		1	2	2	4
	S4		1	1	1	1
	S5		0	0	1	0
Total	5					4

(a)

2. Requisitos físicos e ambientais		Descrição	Critérios			Total
			C4	C5	C6	
			Limites	Limites	Limites	
Sensor	S1		1	1	2	2
	S2		2	2	2	8
	S3		1	0	2	0
	S4		2	1	1	2
Total	4					3

(b)

3. Requisitos comerciais		Descrição	Critérios		Total	Pontuação geral
			Prazo de entrega	Custo		
			Limite	0,1-1		
Sensor	S1		1	1	1	8
	S2		0	1/5	0	0
	S4		2	1/10	1/5	2/5
Total	3					2

(c)

Figura 68 – Exemplo das matrizes relativas aos requisitos de desempenho (a), requisitos físicos e ambientais (b) e requisitos comerciais (c).

A aplicação do método de seleção de sensores é realizada de acordo com o procedimento descrito em seguida.

Em primeiro lugar, é preenchida a matriz relativa aos requisitos de desempenho (Figura 68a). Nas colunas da matriz, são especificados os critérios de seleção e os respectivos limites. Ao passo que nas linhas é efetuada a descrição dos sensores identificados na consulta de mercado. Na descrição, deve constar a marca e a referência do sensor, e as especificações relacionadas com cada um dos critérios. A capacidade do sensor para cumprir os requisitos definidos é pontuada numa escala constituída pelos níveis apresentados em seguida.

- **Nível 0:** o sensor não cumpre ou cumpre sem folga o requisito (é representado pela cor vermelha).
- **Nível 1:** o sensor cumpre com uma folga reduzida o requisito (é representado pela cor laranja).
- **Nível 2:** o sensor cumpre com uma folga elevada o requisito (é representado pela cor verde).

Nos casos em que não é possível definir limites para os critérios, a pontuação é atribuída tendo em conta uma análise qualitativa. Quanto mais adequado for o sensor relativamente ao critério em análise, mais elevada será a pontuação atribuída (entre 0 e 2). Depois de serem preenchidas todas as combinações Sensor vs. Critério, é determinada a pontuação total do sensor na matriz. Este valor é obtido multiplicando os valores registados na mesma linha. Os sensores com uma pontuação total igual “0” são excluídos da análise. Por isso, não são considerados nas duas matrizes subsequentes.

O preenchimento da matriz relativa aos requisitos físicos e ambientais (Figura 68b) é realizado de forma similar ao preenchimento da primeira matriz. Na matriz relativa aos requisitos comerciais (Figura 68c), são incluídos somente os critérios “prazo de entrega” e “custo”. A utilização do critério “prazo de entrega” visa evitar tempos de espera demasiado longos na receção dos sensores, que possam colocar

em risco a aplicação da MPC dentro do prazo definido. Com o critério “custo”, pretende-se contribuir para o cumprimento das restrições orçamentais existentes. Porém, sempre que se justifique, podem ser considerados outros critérios. O critério “custo” representa o custo unitário de cada sensor e é pontuado de forma distinta dos restantes. Além do custo de aquisição, o custo pode incluir o custo de instalação. A pontuação a atribuir a este critério corresponde ao inverso do valor do custo normalizado numa escala de 1 a 10. Desta forma, quando é considerado um número significativo de sensores é mais fácil estabelecer comparações. O valor do custo normalizado, C_{nor} , é determinado com base na seguinte expressão:

$$C_{nor} = a + \frac{(C - C_{min}) \times (b - a)}{C_{max} - C_{min}} \quad (A.14)$$

Em que,

a é o valor mínimo da escala (=1).

b é o valor máximo da escala (=10).

C é o valor do custo unitário que se pretende normalizar.

C_{min} é o valor mínimo do custo unitário no conjunto de sensores.

C_{max} é o valor máximo do custo unitário no conjunto de sensores.

A terceira matriz exhibe a pontuação resultante da aplicação das três matrizes (pontuação geral). Este valor é determinado multiplicando os valores totais obtidos em cada matriz para o mesmo sensor. Considera-se que o sensor que apresenta a pontuação geral mais elevada é o mais adequado. O cálculo da pontuação geral do sensor Sn , PG_{Sn} , é exemplificado na expressão seguinte:

$$PG_{Sn} = T_{matriz\ 1,Sn} \times T_{matriz\ 2,Sn} \times T_{matriz\ 3,Sn} \quad (A.15)$$

Em que,

$T_{matriz\ 1,Sn}$ é a pontuação total do sensor Sn na primeira matriz.

$T_{matriz\ 2,Sn}$ é a pontuação total do sensor Sn na segunda matriz.

$T_{matriz\ 3,Sn}$ é a pontuação total do sensor Sn na terceira matriz.

No exemplo da Figura 68a, são contemplados três critérios de seleção e cinco sensores. Os sensores S1 e S3 foram aqueles que obtiveram a pontuação total mais elevada. Por sua vez, o sensor S5 obteve uma pontuação total igual a “0” nos critérios C1 e C2. Assim, na segunda matriz são considerados somente os sensores S1, S2, S3 e S4. A matriz da Figura 68b também contempla três critérios de seleção. Nesta matriz, o sensor S3 obteve uma pontuação total igual a “0”, por este motivo não é considerado na matriz seguinte. Na matriz da Figura 68c, verifica-se que o sensor S1 é aquele que apresenta a pontuação geral mais elevada. Por isso, este é o sensor selecionado. O sensor S2 foi excluído, porque não cumpre o limite definido para o prazo de entrega. Enquanto o sensor S4 constitui uma alternativa viável ao sensor S1.

APÊNDICE VI – LISTA DE CRITÉRIOS PARA APOIAR A SELEÇÃO DE SENSORES

Tabela 76 – Critérios para apoiar a seleção de sensores.

Tipos de requisitos	Critérios	Autor
1. Requisitos de desempenho	Fiabilidade	Shieh <i>et al.</i> (2001), Jones <i>et al.</i> (2018) e Baranwal <i>et al.</i> (2020)
	Escala de medição	Shieh <i>et al.</i> (2001), Cheng <i>et al.</i> (2010) e Baranwal <i>et al.</i> (2020)
	Precisão	
	Resolução	
	Tempo de resposta	
	Ruído no sinal	Cheng <i>et al.</i> (2010) e Baranwal <i>et al.</i> (2020)
	Frequência sensorial	Baranwal <i>et al.</i> (2020)
	Desvio	Shieh <i>et al.</i> (2001) e Baranwal <i>et al.</i> (2020)
	Amplitude dinâmica	Cheng <i>et al.</i> (2010)
	Sensibilidade	
	Repetibilidade	
	Resposta em frequência	
	Tempo de estabilização	
	Frequência de leitura	
2. Requisitos físicos e ambientais		
2.1. Físicos	Dimensão	Shieh <i>et al.</i> (2001), Jones <i>et al.</i> (2018) e Baranwal <i>et al.</i> (2020)
	Peso	
	Forma	Jones <i>et al.</i> (2018)
	Embalagem	
	Montagem	
2.2. Ambientais	Temperatura	Shieh <i>et al.</i> (2001), Jones <i>et al.</i> (2018) e Baranwal <i>et al.</i> (2020)
	Humidade	Jones <i>et al.</i> (2018)
	Pressão	
	Choque	
	Tensão	
	Nível acústico	
	Vibrações	
	Ruído elétrico	
	Presença de contaminantes	
3. Requisitos comerciais	Custo	Shieh <i>et al.</i> (2001), Jones <i>et al.</i> (2018) e Baranwal <i>et al.</i> (2020)
	Prazo de entrega	Jones <i>et al.</i> (2018)

**APÊNDICE VII – POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO ATUAIS E POLÍTICAS
DE MANUTENÇÃO PROPOSTAS**

VII.1. Máquina de impressão de pasta

VII.1.1. Políticas de manutenção atuais

As políticas de manutenção associadas aos componentes e subconjuntos do equipamento (Tabela 45) são de quatro tipos: MC, MPC, MPS e limpeza periódica.

A MC é a política de manutenção que se aplica ao maior número dos tipos de componentes considerados nesta análise. Contudo, salienta-se que esta política está a ser aplicada a 12 dos 17 tipos de componentes que têm associados modos de falha da Categoria B. Esta circunstância pode motivar intervenções tardias no equipamento, para solucionar a falha, e equívocos no diagnóstico. As ações de MC são de dois tipos: imediatas ou diferidas. Caso o equipamento possa continuar a trabalhar após ocorrência do modo de falha ou se este for detetado na sua fase de desenvolvimento, geralmente, opta-se por diferir a ação de manutenção, para evitar a paragem durante o período de produção.

As políticas de MPC existentes envolvem, na maioria dos casos, a inspeção visual dos componentes com uma periodicidade predefinida (MPC subjetiva). O técnico avalia o estado do componente e, tendo em conta a sua perceção e a sua experiência, decide se o componente deve ser substituído ou se deve permanecer no equipamento. No caso das correias de transporte, também é realizada a medição da resistividade da superfície com uma frequência anual. Esta medição visa verificar o estado do revestimento das correias. O revestimento destina-se a reduzir a eletricidade estática, de forma a impedir a ocorrência de descargas eletrostáticas ou *Electrostatic Discharges* (ESD). A tensão gerada pelas descargas electroestáticas pode danificar os dispositivos eletrónicos do PCB. Também se constatou que o “Proportional Pressure Regulator;542234”, do Sistema de Transporte e da Unidade de Raspador, é calibrado anualmente. Das 84 combinações “subconjunto – tipo de componente” incluídas na Tabela 45, 32 (38%) têm associada pelo menos uma política de MPC. Destas 32 combinações, 15 são relativas a 2 subconjuntos móveis e 17 são referentes a 4 subconjuntos fixos.

A MPS é aplicada somente ao “Pack baterias RBC48;689-9058” do Sistema de Controlo Elétrico. Este componente é substituído com uma frequência trianual. No que diz respeito à limpeza periódica, aplica-se sobretudo aos componentes do iPAG, e aos componentes “barra de vacuo Ekra 5000;405 400 45 14”, “Barra vácuo 400mm Ekra;4054005614” e “Barra vácuo 300mm Ekra;4054005520” do Sistema de Limpeza.

Tendo em conta que as políticas de manutenção consideradas no âmbito da metodologia não contemplam ações de limpeza, recomenda-se que estas ações continuem a ser realizadas com a

periodicidade definida. Em geral, a periodicidade das ações de manutenção preventiva (MPC, MPS e limpeza) é definida a partir de recomendações do fornecedor e, posteriormente, ajustada com base na experiência.

VII.1.2. Políticas de manutenção propostas

As políticas de manutenção propostas com base na informação associada ao modo de falha, são de cinco tipos: MC, MPS, TI, TD e ação de melhoria.

A atribuição da política de manutenção aos modos de falha com função de risco crescente, das subcategorias A.1., A.2, A.3 e B.4, foi efetuada com o auxílio da matriz apresentada na Tabela 43. Assim, para 45 dos 53 modos de falha com função de risco crescente, pertencentes à Categoria A (subcategorias A.1., A.2 e A.3), propôs-se a aplicação de uma TI. Destes 45 modos de falha, 10 são relativos a tipos de componentes que não tinham originalmente associadas políticas de MPC. Neste âmbito, definiu-se o seguinte:

- Para os 35 modos de falha dos tipos de componentes que têm associadas políticas de MPC, continuarão a ser aplicadas as políticas existentes, visto que foram consideradas adequadas;
- Para o modo de falha “Descarregado” do “Pack baterias RBC48;689-9058”, a TI envolve a utilização de um dispositivo de medição externo;
- Para os 9 modos de falha restantes, a TI contempla a realização de uma inspeção visual, que pode ser conciliada com as operações de limpeza periódica do equipamento, uma vez que a frequência de ocorrência destes modos de falha é bastante reduzida.

No caso do “Pack baterias RBC48;689-9058”, todas as substituições foram realizadas no âmbito de ações de manutenção preventiva, tendo em consideração o tempo de vida útil mínimo especificado pelo fabricante. Por isso, existe a convicção de que a aplicação de uma TI contribuirá para estender significativamente o tempo de vida útil do componente. Assim, a aplicação desta política, irá permitir reduzir os custos relacionados com a substituição do componente e o impacto ambiental negativo associado.

O dispositivo de medição (Ancel BA101) foi selecionado depois de ser identificado o parâmetro a monitorizar (“tensão elétrica”), recorrendo ao procedimento P2. Este dispositivo teve um custo de aquisição de 68,00 €.

A MC foi recomendada para os 8 modos de falha da subcategoria A.3, com função de risco crescente. Em geral, a ocorrência destes modos de falha origina um erro que bloqueia de imediato o funcionamento

da máquina, contribuindo para mitigar os custos de falha. Destes modos de falha, 5 são referentes a tipos de componente que não têm associadas substituições no período considerado. Salienta-se ainda que se optou por atribuir a MC (em vez da MPS) ao modo de falha “O-ring deformado” do “Cylinder Ekra (5601040262);CDUJB10-25D”, em virtude de não ter sido identificada nenhuma ocorrência no registo de falhas do equipamento. Este tipo de componente tem associadas 5 substituições motivadas pela ocorrência de modos de falha com função de risco não crescente e, quando a falha se verifica, o tempo de paragem do equipamento é Elevado.

Para o modo de falha da subcategoria B.4, recomendou-se a aplicação de uma TI. Este modo de falha é relativo ao “Gas spring AG3600350N/5;5062000167” e tem função de risco crescente. Neste caso, também se propõe que continue a ser utilizada a política que se encontrava definida ao nível do componente (inspeção visual e teste manual), uma vez que foi considerada adequada e a complexidade é Baixa.

Para 40 dos 41 modos de falha com função de risco não crescente, pertencentes à Categoria A (subcategorias A.2 e A.3), propôs-se a aplicação da MC. A ocorrência destes modos de falha origina um erro que bloqueia o funcionamento da máquina, com exceção do modo de falha “Lente danificada” do “Scanner Datalogic D9531-HP;5399000453”. O número de substituições dos tipos de componentes aos quais 39 destes modos de falha estão associados varia entre 0 e 8. A exceção é o “Nozzle 06mm to iPAG Jet;5900001047”. Contudo, este tipo de componente tem associados dois modos de falha: “Empenado”, com função de risco não crescente, e “Entupido”, com função de risco crescente. Embora os registos de falhas do equipamento não sejam conclusivos, considera-se que “Entupido” é o modo de falha dominante. Salienta-se ainda que o subconjunto móvel do qual faz parte este tipo de componente é inspecionado periodicamente.

No caso do modo de falha “*Touch* danificado” do “monitor;ProLite T2253MTS-B5 (B1)” (subcategoria A.2), recomendou-se a definição de uma ação de melhoria, uma vez que tem associadas 14 substituições. Este componente é o monitor utilizado para controlar o funcionamento do equipamento. O modo de falha ocorre sobretudo devido à acumulação de detergente, utilizado nas operações de limpeza, junto ao bordo do monitor.

A ação de melhoria será implementada de forma gradual, visto que envolve a substituição do componente depois de falhar por um componente de outro modelo. O custo do componente “monitor;ProLite T2253MTS-B5 (B1)” é de 220 € e o custo do componente do novo modelo é de 275 €. Esta alteração representa um acréscimo de 25% no custo de aquisição do componente. Contudo, o componente do

novo modelo dispõe de características técnicas que permitem eliminar a principal causa do modo de falha associado ao “monitor;ProLite T2253MTS-B5 (B1)”. Por isso, a sua esperança de vida será bastante superior. Assumindo o pressuposto de que o componente do novo modelo tem uma duração 2 vezes superior, a estimativa do ganho anual médio resultante da aplicação da ação de melhoria é de 497,87€ (39,6%).

Para os 19 modos de falha pertencentes às subcategorias B.1., B.2 e B.3, propôs-se a aplicação de uma TD. A política atual associada aos tipos de componentes onde se verificam 14 destes modos de falha é a MC. Por isso, crê-se que, na maioria dos casos, as falhas verificadas foram detetadas tardiamente, originando perdas significativas de qualidade e/ou de desempenho. O número de substituições dos tipos de componentes aos quais 18 dos 19 modos de falha considerados estão associados varia entre 0 e 17. A exceção é o componente “válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417”, que foi substituído 28 vezes.

Para os modos de falha relativos aos componentes “válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417” e “válvula VUVG-B10-M52-RZT-F;573416”, propôs-se a verificação da viabilidade técnica e financeira de uma TD utilizando sensores, visto que têm associado um sintoma mensurável. No que diz respeito aos restantes 18 modos de falha, considera-se que a inspeção visual do componente é a opção mais vantajosa do ponto de vista financeiro. Tendo em conta que a ocorrência destes modos de falha é pouco frequente, as TD poderão ser facilmente conciliadas com as operações de limpeza do equipamento. Para 5 dos 19 modos de falha, continuará a ser aplicada a política que se encontrava definida ao nível do componente (inspeção visual).

No que diz respeito aos 2 modos de falha da subcategoria A.0, recomendou-se a aplicação da MC. Esta política é a mesma que se encontrava definida ao nível do componente. Por fim, para os 3 tipos de componentes com criticidade baixa e para o “Clamping Flange;4036000803”, também se propôs a aplicação da MC. Nestes casos, não foram definidos modos de falha.

VII.2. Máquina de soldadura

VII.2.1. Políticas de manutenção atuais

As políticas de manutenção associadas aos tipos de componentes identificados na Tabela 62 são de quatro tipos: MC, MPC, MPS e limpeza periódica.

A MC é aplicada aos componentes “Heating element 1186410” e “Water pump MH1203-1/E3-3/80 50Hz;1093504”. Estes tipos de componentes têm associados sensores destinados a auxiliar a deteção

de falhas parciais ou totais e, de acordo com a informação disponibilizada pelos respectivos fabricantes, o seu tempo de vida útil é longo.

As políticas de MPC são realizadas com uma periodicidade predefinida e contemplam a inspeção visual dos componentes. As inspeções podem resultar em dois tipos de ações: a limpeza ou a substituição do componente. No caso das correntes de transporte, a necessidade de substituição é avaliada de uma forma mais rigorosa nas ações de manutenção anuais, visto que são retiradas do equipamento. Porém, muitas vezes, a remoção de sujidade é essencial para avaliar corretamente o nível de desgaste do componente. A MPC é aplicada a 9 dos 14 tipos de componentes considerados na análise. O número de substituições associado a cada um destes tipos de componentes é inferior ao número médio de substituições dos 14 tipos de componentes analisados (240,68). No entanto, tendo em conta que as ações de MPC se baseiam numa análise subjetiva, os componentes abrangidos por estas ações podem estar a ser utilizados quando o seu desempenho já não é adequado ou ser substituídos prematuramente.

A MPS é aplicada aos componentes “1034229 Sealing Outer Tube”, “FLUOR FILTER ;4207.0101 (1019435)” e “1019449;panel filter mediumF9,536x193x44”. A substituição periódica dos filtros tem como objetivo evitar problemas resultantes da perda de eficácia na retenção de resíduos, que podem motivar paragens longas do equipamento e, conseqüentemente, perdas de produção significativas. A duração das paragens é, habitualmente, agravada pela dificuldade de diagnóstico. Assim, tendo em conta que estes componentes têm um custo reduzido, opta-se por uma substituição frequente do componente. Nas máquinas Rehm VXP, é utilizada 1 unidade do “1019449;panel filter mediumF9,536x193x44” e, nas máquinas Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT, são utilizadas 2 unidades.

A análise visual dos filtros retirados do equipamento nas ações de MPS permitiu constatar o seguinte:

- O filtro das máquinas Rehm VXP aparenta estar mais sujo do que ambos os filtros das máquinas Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT;
- O primeiro filtro das máquinas Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT está sempre mais sujo do que o segundo.

Embora o nível de sujidade não seja uniforme, os filtros são todos substituídos com a mesma periodicidade.

VII.2.2. Políticas de manutenção propostas

As políticas de manutenção propostas (Tabela 62) são descritas em seguida.

Para os modos de falha da Categoria A (subcategoria A.3), a política foi associada recorrendo à matriz de seleção da política (Tabela 43).

No caso dos 2 modos de falha relativos aos componentes “Heating element 1186410” e “Water pump MH1203-1/E3-3/80 50Hz;1093504”, propõe-se a aplicação da MC. Estes tipos de componentes não têm associadas substituições no período considerado e o seu “ C_{ps} ” é Elevado e Médio, respetivamente. Por isso, embora o “Tempo de paragem” associado à ocorrência da falha seja Elevado, considera-se que a MC é mais vantajosa do que a MPS. Por isso, recomenda-se que esta análise seja realizada novamente quando existir um histórico de funcionamento mais longo.

Para o modo de falha “Obstruído” referente aos componentes “FLUOR FILTER ;4207.0101 (1019435)” e “1019449;panel filter mediumF9,536x193x44”, propõe-se a aplicação da MPS. A MPS foi recomendada, porque a “Frequência” de substituição é Elevada, o “ C_{ps} ” é Baixo e o “Tempo de paragem” é Médio.

Com base na análise dos registos de consumos constatou-se que o “FLUOR FILTER ;4207.0101 (1019435)” tem uma frequência média de substituição de 7,12/ano, e o “1019449;panel filter mediumF9,536x193x44” de 18,20/ano, nas máquinas Rehm VXP, e de 17,03/ano, por posição, nas máquinas Rehm VXP + e Rehm VXP + DT. Assim, devido aos consumos elevados, também se recomenda que a periodicidade de substituição seja definida em função da quantidade de pasta utilizada no processo produtivo de cada linha de produção, uma vez que esta é diretamente proporcional à quantidade de resíduos que ficam retidos nos filtros. A aplicação desta política visa assegurar que todos os filtros têm uma utilização idêntica e contribuir para reduzir o número de substituições preventivas, sem aumentar o número de substituições corretivas.

Para os restantes 11 modos de falha da Categoria A, propôs-se a aplicação de uma TI. As estimativas realizadas, com base nos dados do histórico de consumos, permitiram constatar que os tipos de componentes aos quais estes modos de falha estão associados têm uma “Frequência” de substituição Baixa. Além disso, a “Complexidade da TI” é considerada Baixa, com exceção do modo de falha “Bloqueado” relativo ao “EC Gas Fan 24VDC/2,5A ,54W;1094107”, que tem associada uma complexidade Média. Assim, para estes modos de falha, o tipo de política em vigor ao nível do componente foi considerado adequado.

No que diz respeito aos 4 modos de falha da Categoria B (subcategorias B.1 e B.2), recomendou-se a aplicação de uma TD. Tendo em conta que os tipos de componentes aos quais estes modos de falha se

encontram associados, são sujeitos a inspeções visuais periódicas, a política existente também foi considerada apropriada.

O “1034229 Sealing Outer Tube” foi abordado como um consumível. Assim, pelos motivos descritos na subsecção 5.5.2, recomenda-se que este tipo de componente continue a ser substituído no âmbito das ações de MPS realizadas anualmente.

**APÊNDICE VIII – CONSUMOS POR MÁQUINA DOS COMPONENTES
QUE TÊM ASSOCIADOS MODOS DE FALHA CANDIDATOS À
APLICAÇÃO DA MPC**

Tabela 77 – Consumo unitário e consumo médio anual por máquina (máquinas Ekra Serio 5000).

Ekra Serio 5000																			
Legenda																			
Consumos com valor superior à média do componente																			
Linha	Data	Dias	Meses	Anos	Pack baterias RBC48;689-9058	Un./Ano	Suction hose;2299005870	Un./Ano	Proportional Pressure Regulator;542234	Un./Ano	válvula VUVG-B10-M52-MZT-F;573417	Un./Ano	válvula VUVG-B10-M52-RZT-F;573416	Un./Ano	belt 12 x 690mm ;50012322	Un./Ano	Round belt D=3mm L=679 mm;5011270288	Un./Ano	
SMD05	29/07/2016	1616	53,1	4,4	1	0,23	0	0	0	0	0	0	1	0,23	1	0,23	0	0	
SMD08	29/07/2016	1616	53,1	4,4	1	0,23	0	0	0	0	1	0,23	0	0	8	1,81	0	0	
SMD11	03/08/2016	1611	53,0	4,4	1	0,23	0	0	0	0	1	0,23	0	0	0	0	0	0	
SMD17	02/01/2017	1459	48,0	4,0	1	0,25	0	0	0	0	1	0,25	0	0	4	1,00	0	0	
SMD18	26/01/2017	1435	47,2	3,9	1	0,25	0	0	0	0	1	0,25	0	0	4	1,02	0	0	
SMD30	19/04/2017	1352	44,4	3,7	1	0,27	0	0	0	0	1	0,27	0	0	6	1,62	0	0	
SMD15	12/05/2017	1329	43,7	3,6	1	0,27	0	0	1	0,27	1	0,27	0	0	6	1,65	0	0	
SMD32	12/07/2017	1268	41,7	3,5	1	0,29	0	0	0	0	1	0,29	0	0	0	0	0	0	
SMD13	01/01/2018	1095	36,0	3,0	1	0,33	3	1	0	0	2	0,67	0	0	4	1,33	0	0	
SMD33	01/01/2018	1095	36,0	3,0	1	0,33	0	0	0	0	1	0,33	0	0	3	1,00	0	0	
SMD27	27/04/2018	979	32,2	2,7	0	0	0	0	0	0	1	0,37	0	0	0	0	1	0,37	
SMD27	27/04/2018	979	32,2	2,7	0	0	0	0	0	0	1	0,37	0	0	0	0	4	1,49	
SMD16	26/06/2018	919	30,2	2,5	0	0	0	0	0	0	1	0,40	0	0	0	0	0	0	
SMD16	26/06/2018	919	30,2	2,5	0	0	0	0	0	0	1	0,40	0	0	0	0	0	0	
SMD19	30/07/2018	885	29,1	2,4	0	0	0	0	0	0	1	0,41	0	0	4	1,65	0	0	
SMD34	08/11/2018	784	25,8	2,1	0	0	0	0	0	0	1	0,47	0	0	0	0	1	0,47	
SMD34	08/11/2018	784	25,8	2,1	0	0	0	0	0	0	1	0,47	0	0	0	0	1	0,47	
SMD35	21/11/2018	771	25,3	2,1	0	0	0	0	0	0	1	0,47	0	0	0	0	0	0	
SMD35	21/11/2018	771	25,3	2,1	0	0	0	0	0	0	1	0,47	0	0	0	0	0	0	
SMD36	10/12/2018	752	24,7	2,1	0	0	0	0	0	0	1	0,49	0	0	0	0	0	0	
SMD36	10/12/2018	752	24,7	2,1	0	0	0	0	0	0	1	0,49	0	0	0	0	0	0	
SMD37	10/01/2019	721	23,7	2,0	0	0	0	0	0	0	1	0,51	0	0	0	0	0	0	
SMD37	10/01/2019	721	23,7	2,0	0	0	0	0	0	0	1	0,51	0	0	0	0	0	0	
SMD38	29/01/2019	702	23,1	1,9	0	0	0	0	0	0	1	0,52	0	0	0	0	0	0	
SMD38	29/01/2019	702	23,1	1,9	0	0	0	0	0	0	1	0,52	0	0	0	0	0	0	
SMD22	30/01/2019	701	23,0	1,9	0	0	0	0	0	0	1	0,52	0	0	0	0	0	0	
SMD22	30/01/2019	701	23,0	1,9	0	0	0	0	0	0	1	0,52	0	0	0	0	0	0	
Total		27419	901,4	75,1	10	2,68	3	1,00	1	0,27	27	10,68	1	0,23	40	11,30	7	2,80	
Média		1016	33,4	2,8		0,10		0,04		0,01		0,40		0,01		0,42		0,10	

Tabela 77 – Consumo unitário e consumo médio anual por máquina (máquinas Ekra Serio 5000) – Continuação.

Ekra Serio 5000													
Legenda													
Consumos com valor superior à média do componente													
Linha	Data	Dias	Meses	Anos	Cylinder Ekra (5601040262); CDUJB10-25D	Un./ Ano	Round belt D=3mm L=2246mm;501 1270287	Un./ Ano	Synchronizing disc AT3 Z 18;4090000137	Un./ Ano	Gas spring AG3600350N/5; 5062000167	Un./ Ano	Un./ Ano
SMD05	29/07/2016	1616	53,1	4,4	1	0,23	0	0	0	0	0	0	0
SMD08	29/07/2016	1616	53,1	4,4	2	0,45	0	0	0	0	0	0	0
SMD11	03/08/2016	1611	53,0	4,4	1	0,23	0	0	0	0	0	0	0
SMD17	02/01/2017	1459	48,0	4,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SMD18	26/01/2017	1435	47,2	3,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SMD30	19/04/2017	1352	44,4	3,7	1	0,27	0	0	0	0	0	0	0
SMD15	12/05/2017	1329	43,7	3,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SMD32	12/07/2017	1268	41,7	3,5	0	0	0	0	0	0	2	0,58	0
SMD13	01/01/2018	1095	36,0	3,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SMD33	01/01/2018	1095	36,0	3,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SMD27	27/04/2018	979	32,2	2,7	0	0	0	0	1	0,37	0	0	0
SMD27	27/04/2018	979	32,2	2,7	0	0	2	0,75	0	0	0	0	0
SMD16	26/06/2018	919	30,2	2,5	0	0	1	0,40	0	0	0	0	0
SMD16	26/06/2018	919	30,2	2,5	0	0	1	0,40	1	0,40	0	0	0
SMD19	30/07/2018	885	29,1	2,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SMD34	08/11/2018	784	25,8	2,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SMD34	08/11/2018	784	25,8	2,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SMD35	21/11/2018	771	25,3	2,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SMD35	21/11/2018	771	25,3	2,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SMD36	10/12/2018	752	24,7	2,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SMD36	10/12/2018	752	24,7	2,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SMD37	10/01/2019	721	23,7	2,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SMD37	10/01/2019	721	23,7	2,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SMD38	29/01/2019	702	23,1	1,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SMD38	29/01/2019	702	23,1	1,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SMD22	30/01/2019	701	23,0	1,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SMD22	30/01/2019	701	23,0	1,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total		27419	901,4	75,1	5	1,17	4	1,54	2	0,77	2	0,58	0
Média		1016	33,4	2,8		0,04		0,06		0,03		0,02	

Tabela 78 – Consumo unitário e consumo médio anual por máquina (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT).

Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT																	
Legenda																	
Correção devido a um erro na atribuição do consumo ao componente no SAP																	
Consumos com valor superior à média do componente																	
Existe pelo menos um consumo de valor superior à quantidade utilizada na máquina																	
Subtipo	Linha	Data	Dias	Meses	Anos	1034229 Sealing Outer Tube	Un./ Ano	FLUOR FILTER ;4207.0101 (1019435)	Un./ Ano	1019449;panel filter mediumF9,536x 193x44	Un./ Ano	EC Gas Fan 24VDC/2,5A ,54W;1094107	Un./ Ano	1019551;Rectu s Cap Coupling; 4217.0029	Un./ Ano	Rectus Locking Nipple;4217.003 0;1019552	Un./ Ano
Rehm VXP	SMD25	09/03/2011	3663	120,4	10,0	6	0,6	29	2,9	188	18,7	0	0	6	0,6	6	0,6
Rehm VXP	SMD09	14/03/2011	3658	120,3	10,0	7	0,7	29	2,9	188	18,8	0	0	1	0,1	0	0
Rehm VXP	SMD21	23/07/2011	3527	116,0	9,7	7	0,7	30	3,1	187	19,4	0	0	1	0,1	2	0,2
Rehm VXP	SMD05	07/07/2016	1716	56,4	4,7	3	0,6	42	8,9	83	17,7	0	0	0	0	0	0
Rehm VXP	SMD08	08/08/2016	1684	55,4	4,6	3	0,7	43	9,3	88	19,1	0	0	1	0,2	16	3,5
Rehm VXP	SMD11	01/08/2016	1691	55,6	4,6	3	0,6	43	9,3	84	18,1	1	0,2	23	5,0	3	0,6
Rehm VXP	SMD17	12/12/2016	1558	51,2	4,3	3	0,7	40	9,4	76	17,8	0	0	0	0	0	0
Rehm VXP	SMD18	02/01/2017	1537	50,5	4,2	3	0,7	37	8,8	75	17,8	0	0	16	3,8	14	3,3
Rehm VXP	SMD02	24/01/2017	1515	49,8	4,2	4	1,0	32	7,7	65	15,7	0	0	0	0	0	0
Rehm VXP	SMD30	18/04/2017	1431	47,0	3,9	3	0,8	34	8,7	68	17,3	0	0	10	2,6	0	0
Rehm VXP	SMD32	28/06/2017	1360	44,7	3,7	2	0,5	29	7,8	62	16,6	0	0	4	1,1	0	0
Rehm VXP +	SMD13	26/01/2018	1148	37,7	3,1	2	0,6	29	9,2	105	33,4	0	0	17	5,4	2	0,6
Rehm VXP +	SMD33	29/01/2018	1145	37,6	3,1	2	0,6	33	10,5	111	35,4	1	0,3	0	0	0	0
Rehm VXP + DT	SMD27	19/02/2018	1124	37,0	3,1	2	0,6	38	12,3	109	35,4	0	0	0	0	0	0
Rehm VXP + DT	SMD16	16/03/2018	1099	36,1	3,0	2	0,7	26	8,6	101	33,5	0	0	0	0	0	0
Rehm VXP +	SMD19	30/07/2018	963	31,7	2,6	1	0,4	23	8,7	90	34,1	1	0,4	0	0	0	0
Rehm VXP +	SMD12	06/09/2018	925	30,4	2,5	2	0,8	24	9,5	93	36,7	1	0,4	0	0	0	0
Rehm VXP + DT	SMD34	19/11/2018	851	28,0	2,3	1	0,4	17	7,3	69	29,6	0	0	0	0	2	0,9
Rehm VXP + DT	SMD35	28/11/2018	842	27,7	2,3	1	0,4	22	9,5	81	35,1	0	0	0	0	10	4,3
Rehm VXP + DT	SMD36	06/12/2018	834	27,4	2,3	1	0,4	20	8,8	78	34,1	0	0	0	0	0	0
Rehm VXP + DT	SMD37	14/01/2019	795	26,1	2,2	1	0,5	19	8,7	78	35,8	0	0	0	0	0	0
Rehm VXP + DT	SMD38	29/01/2019	780	25,6	2,1	1	0,5	17	8,0	64	29,9	1	0,5	0	0	0	0
Rehm VXP + DT	SMD22	21/02/2019	757	24,9	2,1	1	0,5	19	9,2	72	34,7	0	0	0	0	0	0
Total			34603	1137,6	94,8	61	100	675	189,1	2215	604,8	5	1,8	79	100	55	14,1
Média			1504	49,5	4,1	2,7	0,6	29	8,2	96	26	0	0,1	3	0,8	2	0,6

Tabela 78 – Consumo unitário e consumo médio anual por máquina (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT) – Continuação.

Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT																		
Subtipo	Linha	Data	Dias	Meses	Anos	KF-center ring DN 50;4400.0047;1020024		KF-center ring DN 40; 4400.0044;1020022		1016083;Lash chain 05B, one side		Roller chain 05B1;1132349		Strip brush STL4006 38mm;1130568		Roller chain special 4mm;1110437		
						Un./Ano	Un./Ano	Un./Ano	Un./Ano	Un./Ano	Un./Ano	Un./Ano	Un./Ano					
Rehm VXP	SMD25	09/03/2011	3663	120,4	10,0	5	0,5	0	0	2,0	0,2	0	0	3	0,3	0	0	
Rehm VXP	SMD09	14/03/2011	3658	120,3	10,0	0	0	0	0	2,0	0,2	0	0	0	0	0	0	
Rehm VXP	SMD21	23/07/2011	3527	116,0	9,7	5	0,5	1	0,1	1,2	0,1	0	0	6	0,6	0	0	
Rehm VXP	SMD05	07/07/2016	1716	56,4	4,7	0	0	0	0	0	0	0	0	5	1,1	0	0	
Rehm VXP	SMD08	08/08/2016	1684	55,4	4,6	0	0	0	0	2,0	0,4	0	0	6	1,3	0	0	
Rehm VXP	SMD11	01/08/2016	1691	55,6	4,6	0	0	0	0	4,9	1,1	0	0	0	0	0	0	
Rehm VXP	SMD17	12/12/2016	1558	51,2	4,3	0	0	0	0	1,0	0,2	0	0	4	0,9	0	0	
Rehm VXP	SMD18	02/01/2017	1537	50,5	4,2	0	0	0	0	1,0	0,2	0	0	4	0,9	0	0	
Rehm VXP	SMD02	24/01/2017	1515	49,8	4,2	0	0	0	0	1,0	0,2	0	0	4	1,0	0	0	
Rehm VXP	SMD30	18/04/2017	1431	47,0	3,9	0	0	0	0	1,0	0,3	0	0	3	0,8	0	0	
Rehm VXP	SMD32	28/06/2017	1360	44,7	3,7	0	0	0	0	1,0	0,3	0	0	0	0	0	0	
Rehm VXP +	SMD13	26/01/2018	1148	37,7	3,1	0	0	0	0	0	0	1	0,3	0	0	0	0	
Rehm VXP +	SMD33	29/01/2018	1145	37,6	3,1	5	1,6	7	2,2	0	0	1	0,3	4	1,3	2,0	0,6	
Rehm VXP + DT	SMD27	19/02/2018	1124	37,0	3,1	10	3,2	17	5,5	0	0	0	0	8	2,6	2,0	0,6	
Rehm VXP + DT	SMD16	16/03/2018	1099	36,1	3,0	4	1,3	5	1,7	0	0	3	1,0	0	0	4,2	1,4	
Rehm VXP +	SMD19	30/07/2018	963	31,7	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Rehm VXP +	SMD12	06/09/2018	925	30,4	2,5	17	6,7	9	3,6	0	0	1	0,4	0	0	0	0	
Rehm VXP + DT	SMD34	19/11/2018	851	28,0	2,3	8	3,4	0	0	0	0	1	0,4	3	1,3	2,0	0,9	
Rehm VXP + DT	SMD35	28/11/2018	842	27,7	2,3	5	2,2	4	1,7	0	0	0	0	0	0	4,0	1,7	
Rehm VXP + DT	SMD36	06/12/2018	834	27,4	2,3	0	0	0	0	0	0	2	0,9	4	1,8	6,0	2,6	
Rehm VXP + DT	SMD37	14/01/2019	795	26,1	2,2	17	7,8	17	7,8	0	0	0	0	12	5,5	4,1	1,9	
Rehm VXP + DT	SMD38	29/01/2019	780	25,6	2,1	6	2,8	2	0,9	0	0	2	0,9	0	0	6,1	2,8	
Rehm VXP + DT	SMD22	21/02/2019	757	24,9	2,1	4	1,9	3	1,4	0	0	2	0,1	0	0	2,1	1,0	
Total			34603	1137,6	94,8	86	32,0	65	25,0	17,1	3,2	13	4,4	66	19,3	32,4	13,6	
Média			1504	49,5	4,1	4	1,4	3	1,1	0,1	0,1	0,2	0,2	3	0,8		0,6	

Legenda

Correção devido a um erro na atribuição do consumo ao componente no SAP

Consumos com valor superior à média do componente

Existe pelo menos um consumo de valor superior à quantidade utilizada na máquina



Tabela 78 – Consumo unitário e consumo médio anual por máquina (máquinas Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT) – Continuação.

Rehm VXP, Rehm VXP+ e Rehm VXP+ DT

Legenda

Correção devido a um erro na atribuição do consumo ao componente no SAP



Consumos com valor superior à média do componente



Existe pelo menos um consumo de valor superior à quantidade utilizada na máquina



Subtipo	Linha	Data	Dias	Meses	Anos	1018800;roller chain 450-5mm 1pc=27m	Un./Ano
Rehm VXP	SMD25	09/03/2011	3663	120,4	10,0	6	2,8
Rehm VXP	SMD09	14/03/2011	3658	120,3	10,0	4	1,9
Rehm VXP	SMD21	23/07/2011	3527	116,0	9,7	4	1,8
Rehm VXP	SMD05	07/07/2016	1716	56,4	4,7	2	0,6
Rehm VXP	SMD08	08/08/2016	1684	55,4	4,6	2	0,6
Rehm VXP	SMD11	01/08/2016	1691	55,6	4,6	2	0,6
Rehm VXP	SMD17	12/12/2016	1558	51,2	4,3	2	0,7
Rehm VXP	SMD18	02/01/2017	1537	50,5	4,2	0	0,0
Rehm VXP	SMD02	24/01/2017	1515	49,8	4,2	0	0,0
Rehm VXP	SMD30	18/04/2017	1431	47,0	3,9	2	0,8
Rehm VXP	SMD32	28/06/2017	1360	44,7	3,7	2	0,9
Rehm VXP +	SMD13	26/01/2018	1148	37,7	3,1	0	0
Rehm VXP +	SMD33	29/01/2018	1145	37,6	3,1	0	0
Rehm VXP + DT	SMD27	19/02/2018	1124	37,0	3,1	0	0
Rehm VXP + DT	SMD16	16/03/2018	1099	36,1	3,0	0	0
Rehm VXP +	SMD19	30/07/2018	963	31,7	2,6	0	0
Rehm VXP +	SMD12	06/09/2018	925	30,4	2,5	0	0
Rehm VXP + DT	SMD34	19/11/2018	851	28,0	2,3	0	0
Rehm VXP + DT	SMD35	28/11/2018	842	27,7	2,3	0	0
Rehm VXP + DT	SMD36	06/12/2018	834	27,4	2,3	0	0
Rehm VXP + DT	SMD37	14/01/2019	795	26,1	2,2	0	0
Rehm VXP + DT	SMD38	29/01/2019	780	25,6	2,1	0	0
Rehm VXP + DT	SMD22	21/02/2019	757	24,9	2,1	0	0
Total			34603	1137,6	94,8	26	10,8
Média			1504	49,5	4,1		0,5

APÊNDICE IX – REGISTO DE FALHAS DO CMMS

Requisitos

Os registos relativos às avarias dos equipamentos das linhas de produção realizados no CMMS deverão cumprir os seguintes requisitos:

1. Priorização da ação de manutenção
2. Atribuição de responsabilidades pela realização da ação de manutenção
3. Transmissão de informação aos técnicos
4. Organização dos dados para análise

Análises a realizar com base nos registos:

- Analisar o impacto e a frequência de cada modo de falha;
- Associar alterações ou padrões de comportamento nos valores dos parâmetros medidos pelos sensores a modos de falha específicos aplicando técnicas de processamento e de análise de dados, nomeadamente algoritmos de *machine learning*;
- Analisar a criticidade dos subconjuntos do equipamento;
- Analisar a Fiabilidade dos componentes;
- Efetuar estimativas da procura de peças sobressalentes.

➤ **Registos a realizar pelo operador (Criar avaria)**

Quando se verificar uma avaria, o operador deverá preencher os campos da seguinte forma:

1. Linha

Objetivo:

Transmissão de informação aos técnicos (Requisito n.º 3) e organização dos dados para análise (Requisito n.º 4).

Procedimento:

Seleção da referência da linha de produção a partir da lista que já se encontra predefinida.

2. Tipo de máquina

Objetivo:

Transmissão de informação aos técnicos (Requisito n.º 3) e organização dos dados para análise (Requisito n.º 4).

Procedimento:

Seleção da designação do tipo de máquina a partir da lista que já se encontra predefinida.

3. MáquinaObjetivo:

Transmissão de informação aos técnicos (Requisito n.º 3) e organização dos dados para análise (Requisito n.º 4).

Procedimento:

Seleção do código da máquina onde se verificou a avaria a partir da lista que já se encontra predefinida.

4. Estado da linhaObjetivo:

Priorização da ação de manutenção (Requisito n.º 1) e organização dos dados para análise (Requisito n.º 4).

Procedimento:

Seleção da opção que melhor representa o estado da linha após a ocorrência da avaria a partir de uma lista predefinida.

Opções a considerar:

- **Funciona a 100%:** a máquina funciona normalmente, mas necessita de uma avaliação ou ajuste.
- **Perda de desempenho:** verifica-se uma redução da capacidade produtiva da máquina, devido a perdas de velocidade ou pequenas paragens.
- **Problemas de qualidade:** a avaria origina produto defeituoso.
- **Parada:** a máquina não funciona.

Cada uma das opções da lista predefinida representa um nível específico de impacto da avaria em termos de produtividade. As opções encontram-se ordenadas por ordem crescente de impacto. Quando maior for o nível impacto da avaria, maior deverá ser a prioridade dada à ação de manutenção. Caso uma avaria tenha como consequência a “Perda de desempenho” e “Problemas de qualidade”, deve ser

selecionada a opção “Problemas de qualidade”, visto que o nível de impacto associado a esta opção é superior.

5. Efeitos da avaria

Objetivo:

Transmissão de informação aos técnicos (Requisito n.º 3) e organização dos dados para análise (Requisito n.º 4).

Possibilitar a realização de um diagnóstico preliminar da avaria por parte do técnico, de forma a identificar previamente ferramentas ou peças a utilizar na sua reparação, e proporcionar informação complementar sobre o efeito da avaria para análise futura.

Procedimento:

Seleção da opção que melhor descreve o modo como a avaria se manifesta (efeitos perceptíveis da falha), a partir de uma lista predefinida.

Alteração:

A lista predefinida de efeitos da avaria será colocada no campo “Título”.

6. Classe

Objetivo:

Atribuição de responsabilidades pela realização da ação de manutenção (Requisito n.º 2).

Procedimento:

Seleção da opção correspondente ao âmbito da avaria, de modo a direcionar a chamada para os engenheiros/técnicos mais qualificados para a sua resolução.

Opções:

- Elétrico
- Mecânico
- *Software*
- Programação
- *Setup*
- Manutenção

7. Descrição da avaria

Objetivo:

Transmissão de informação aos técnicos (Requisito n.º 3) e organização dos dados para análise (Requisito n.º 4).

Obtenção de informação complementar sobre a reparação para análise. O seu preenchimento deverá se efetuado apenas em situações excecionais.

Procedimento:

Elaboração de uma descrição curta sobre a avaria que complemente a informação introduzida nos campos anteriores.

➤ **Registos a realizar pelo engenheiro/técnico de manutenção (Fechar avaria)**

Após concluir a reparação da avaria, o engenheiro/técnico deverá preencher os seguintes campos:

8. Subconjunto

Objetivo:

Organização dos dados para análise (Requisito n.º 4).

Determinação da taxa de falhas e de indicadores, tais como o MTBF ou o MTTR ao nível do subconjunto, com vista a analisar a sua criticidade.

Procedimento:

Seleção da designação do subconjunto afetado pela falha a partir de uma lista predefinida. Sempre que a máquina disponha de mais do que um subconjunto do mesmo tipo, a designação do subconjunto deverá incluir um código específico ou informação que permita identificar a sua localização na máquina.

Alteração:

A lista predefinida de subconjuntos do equipamento será colocada no campo “Tipo de Problema”.

A informação relativa ao tipo de problema deixará de ser preenchida. Considera-se que a informação fornecida neste campo é redundante e que os restantes campos já permitem obter a informação necessária para as análises que se pretende realizar. Além disso, a não utilização deste campo também contribuirá para facilitar o preenchimento dos registos por parte do técnico.

9. Componente

Objetivo:

Organização dos dados para análise (Requisito n.º 4).

Determinação do risco de falha e do indicador MTTF, com vista a analisar a Fiabilidade dos componentes.

Para que o MTTF possa ser determinado de forma automática, será necessário definir um código que identifique a posição do componente no equipamento; registar as substituições corretivas e preventivas na mesma base de dados, indicando sempre o código de localização do componente; e aplicar um algoritmo de cálculo que permita realizar o cruzamento dos registos de substituição corretiva e preventiva.

Procedimento:

Seleção da designação do componente afetado pela falha, a partir de uma lista predefinida. Sempre que o subconjunto disponha de mais do que um componente do mesmo tipo, a designação do componente deverá ter associado um código específico ou informação que permita identificar a sua localização no subconjunto.

Alteração:

A lista predefinida de componentes do equipamento será colocada no campo “Localização”.

10. Localização

Objetivo:

Organização dos dados para análise (Requisito n.º 4).

Procedimento:

Seleção de um código que identifique a localização do componente selecionado previamente.

Alteração:

A lista predefinida de códigos de localização dos componentes será colocada no campo “Componente”.

11. Modo de falha

Objetivo:

Organização dos dados para análise (Requisito n.º 4).

Análise da frequência dos modos de falha.

Procedimento:

A identificação do modo de falha deverá ser efetuada a partir de uma lista predefinida de modos de falha habituais ou potenciais associados a cada componente. O modo de falha é o modo como a incapacidade de um item para realizar a função requerida se manifesta. Também pode ser definido pela perda de função ou pela transição de estado que ocorreu. Caso se verifique que não existe na lista predefinida uma designação adequada para o modo de falha verificado, a designação deve ser sugerida pelo técnico no campo n.º 13 (descrição da reparação) e adicionada à lista depois de ser validada pelo chefe de equipa.

Alteração:

A lista predefinida de modos de falha será colocada no campo “Motivo”.

12. AçãoObjetivo:

Organização dos dados para análise (Requisito n.º 4).

Análise da eficácia das ações de manutenção realizadas.

Procedimento:

A identificação da ação de manutenção realizada deverá ser efetuada a partir de uma lista predefinida de ações associadas a cada modo de falha. Caso se verifique que não existe na lista uma descrição adequada para a ação realizada, a descrição deve ser realizada no campo n.º 13 (descrição da reparação) e adicionada à lista depois de ser validada pelo chefe de equipa.

13. Descrição da reparaçãoObjetivo:

Obtenção de informação complementar sobre a reparação para análise.

Procedimento:

Elaboração de uma descrição curta sobre a reparação que complemente a informação introduzida nos campos anteriores. Deverão ser utilizados termos ou expressões padrão, de forma a facilitar a sua interpretação e a assegurar que o mesmo tipo de reparação apresenta uma descrição idêntica.