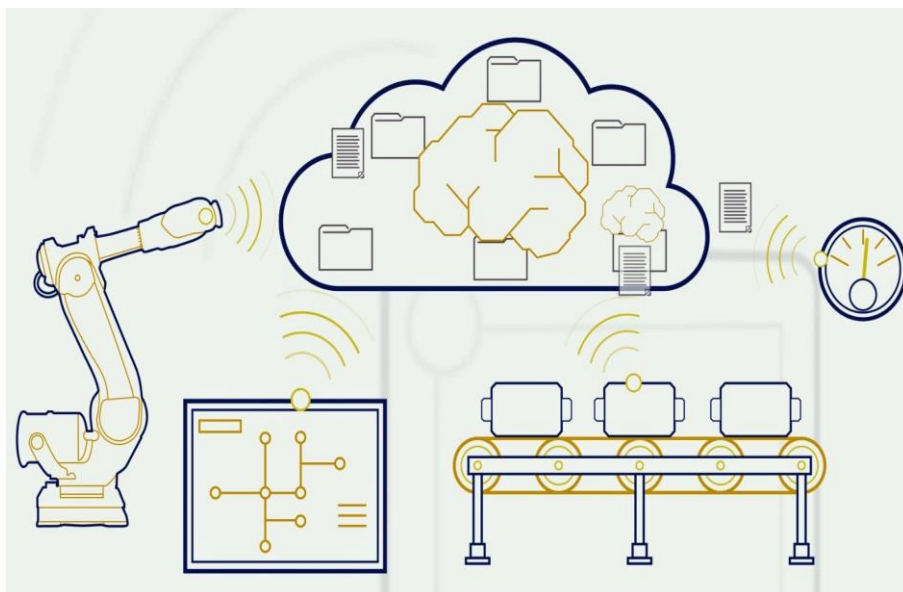




INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Mecânica



Desafios para a Manutenção na perspetiva da Indústria 4.0

JOÃO VERÍSSIMO SOBREIRA

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor José Augusto da Silva Sobral

Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes

Júri:

Presidente: Doutor Silvério João Crespo Marques

Vogais:

Doutor Luís António de Andrade Ferreira

Doutor José Augusto da Silva Sobral

Julho de 2018



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Mecânica

Desafios para a Manutenção na perspetiva da Indústria 4.0

JOÃO VERÍSSIMO SOBREIRA
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor José Augusto da Silva Sobral
Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes

Júri:

Presidente: Doutor Silvério João Crespo Marques
Vogais:
Doutor Luís António de Andrade Ferreira
Doutor José Augusto da Silva Sobral

Julho de 2018

Agradecimentos

Antes de mais, agradeço ao Doutor José Augusto da Silva Sobral ao Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes por terem orientado da melhor forma possível o meu trabalho, estando sempre presentes e recetivos as minhas exposições ou dificuldades.

Aos meus pais e irmã por todo o afeto, apoio e carinho transmitido ao longo da minha vida, por todo o esforço e confiança que depositaram em mim, acreditando sempre.

A todas as pessoas que não referi e que de alguma maneira me ajudaram na concretização deste projeto o meu sincero obrigado.

Resumo

A introdução de novas tecnologias no sector industrial tem provocado inúmeras alterações na sua forma de funcionamento. Atualmente, as empresas necessitam de ser competitivas à escala global, pelo que a massificação e cada vez maior disponibilidade da internet, o fácil acesso e tratamento de grandes quantidades de informação tornam evidente a necessidade dos sistemas produtivos industriais se adaptarem e caminharem na direção desta nova era global. A presente dissertação pretende estudar as novas dinâmicas que a Indústria 4.0 inclui e trás os processos produtivos, e o seu impacto nas organizações.

O trabalho inicia-se com a exposição e análise do panorama atual da atividade industrial a nível da União Europeia e de Portugal, exibindo várias medidas políticas que pretendem potenciar a atividade industrial melhorando a sua competitividade.

O estudo desenvolvido apresenta propostas para novos modelos de negócio e ferramentas de manutenção, como o controlo de condição de equipamentos em tempo real, recolha e análise de indicadores de desempenho de equipamentos, manutenção remota, o recurso à realidade aumentada para atividades de manutenção e novas abordagens aos sistemas de gestão de manutenção.

Por último, é apresentado um caso prático concretizando possíveis cenários da evolução no que respeita a um equipamento específico muito utilizado em termos industriais (bombas centrífugas *End Suction*) na perspetiva da Indústria 4.0, referindo questões relacionadas com a sua gestão e manutenção.

Com o presente trabalho conclui-se que as novas tecnologias resultantes da quarta revolução industrial terão inevitavelmente um impacto nos fabricantes de equipamentos, promovendo a integração de sistemas sensoriais e digitais nos equipamentos, como plataformas de monitorização e apoio ao seu controlo de condição.

Palavras-chave

Industrial Internet of Things; Indústria 4.0; Manutenção;

Abstract

The use of new technologies in the industry business have brought several changes to this sector. Nowadays, companies need to present themselves competitive at a global scale, whereby the internet boom, the increase of internet availability and easy access to processed information are revealing the need for industrial production systems to adapt to this new global age. The present dissertation aims to study the new dynamics that Industry 4.0 will bring to the manufacturing processes and their impact on the organizations.

This work starts by giving an overview and analysis of the existing industrial activity in the European Union and Portugal, showcasing several political measures intended to boost the industry business by improving its competitiveness.

In this study, several proposals for new business models and maintenance tools will be proposed, such as live control on equipment condition, data collection and analysis of equipment performance indicators, remote maintenance, the use of augmented reality for maintenance purposes, and new approaches to maintenance management systems.

To conclude, a practical case was presented, for the different evolution scenarios one specific equipment (End Suction centrifugal pump) is presented in the 4.0 industrial environment, concerning the equipment day-to-day servicing and management.

With the present work, it's possible to state that new technologies of the forth industrial revolution will have an impact on manufacturers, promoting the integration of sensorial and digital systems in equipment, such as monitoring platforms and condition control of equipment.

Keywords

Industrial Internet of Things; Industry 4.0; Maintenance;

Lista de Acrónimos e Siglas

CMMS – *Computerized Maintenance Management System* (Sistema de Gestão de Manutenção Computadorizado)

CoF – Consequências da Falha

CPPS - *Cyber-physical production systems* (Sistemas produtivos ciber-físicos)

CRM – *Customer Relationship Management* (Gestão de Relacionamento com o Cliente)

E2E – *Exchange-to-Exchange*

ERP – *Enterprise Resource Planning* (Sistema Integrado de Gestão Empresarial)

I&D – *Innovation and Development* (Inovação e Desenvolvimento)

IIoT – *Industrial Internet of Thing* (Internet Industrial das Coisas)

IoT – *Internet of Things* (Internet das Coisas)

KET's - *Key Enabling Technologies*

KPIs – *Key Performance Indicators* (Indicadores de Desempenho)

MES – *Manufacturing Execution Systems* (Sistema de Gestão de Produção)

OEE – *Overall Equipment Efficiency* (Eficiência Global do Equipamento)

PIB – Produto Interno Bruto

PoF – Probabilidade de Falha

RBIM - *Risk Based Inspection and Maintenance* (Inspeção e Manutenção Baseada no Risco)

TPM – *Total Productive Maintenance* (Manutenção Produtiva Total)

Índice

Agradecimentos	I
Resumo	III
Palavras-chave	III
Abstract.....	V
Keywords.....	V
Lista de Acrónimos e Siglas	VII
Lista de Figuras	XIII
Lista de Tabelas	XVII
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Motivação	2
1.3. Objetivo da Dissertação	2
1.4. Estrutura da Dissertação	3
2. Indústria 4.0 e Manutenção – Estado da Arte	5
2.1. Quadro atual e perspetivas sociopolíticas na Indústria	5
2.1.1. Panorama Industrial Europeu	5
2.1.2. Panorama Industrial em Portugal	6
2.1.3. Iniciativas de Recuperação Industrial na União Europeia.....	8
2.1.4. Iniciativa Portugal i4.0	9
2.2. Internet of Things.....	11
2.3. Industrial Internet of Things	14
2.4. Big Data	16
2.4.1. Definição de Big Data	16
2.4.2. Data Analysis.....	18
2.5. Cloud Computing.....	19
2.6. Indústria 4.0	21

2.6.1.	Conceção do Termo Indústria 4.0.....	21
2.6.2.	Enquadramento da Indústria 4.0.....	22
2.6.3.	Aplicabilidade da Indústria 4.0.....	25
2.6.4.	Vantagens, Potencialidades e Expectativas para a Indústria 4.0	30
2.7.	Panorama da Manutenção na Indústria	35
2.7.1.	Evolução da Manutenção.....	35
2.7.2.	Função da Manutenção	37
2.8.	Tipos de Manutenção	37
2.8.1.	Manutenção Corretiva	38
2.8.2.	Manutenção Preventiva	38
2.8.3.	Manutenção Preditiva	39
2.8.3.1.	Análise de Vibrações.....	40
2.8.3.2.	Análise de Partículas/Lubrificação.....	41
2.8.3.3.	Análise por Ultrassons	43
2.8.3.4.	Análise Termográfica	43
2.9.	Modelos de Manutenção	45
2.9.1.	Manutenção e Inspeção Baseada no Risco	45
2.9.1.1.	Inspeção.....	45
2.9.1.2.	Definição de Risco	46
2.9.1.3.	Análise de Risco.....	47
2.9.1.4.	Análise Qualitativa	47
2.9.1.5.	Análise Quantitativa	48
2.9.1.6.	Matriz de Risco	49
2.9.1.7.	Programação de Inspeções	50
2.9.1.8.	Atividades de Redução de Custos	51
2.9.2.	TPM - <i>Total Productive Maintenance</i>	51
2.9.2.1.	Definição do TPM.....	52

2.9.2.2.	Eliminação de Perdas	54
2.9.2.3.	Oito Pilares do TPM.....	56
2.9.3.	Indicadores de eficiência TPM.....	59
2.9.3.1.	Overall Equipment Effectiveness - OEE.....	59
2.9.3.2.	Key Performance Indicators.....	61
3.	Estratégias para a Manutenção na Indústria 4.0.....	65
3.1.	Novos Modelos e Ferramentas na Manutenção	65
3.1.1.	<i>Magic Triangle</i>	66
3.1.2.	<i>Softwares</i> de Gestão de Manutenção	67
3.1.3.	<i>Machine Learning</i>	68
3.1.4.	Manutenção Remota.....	71
3.1.5.	Fabrico Aditivo e Impressão Tridimensional	72
3.1.6.	Realidade Aumentada para apoio à Manutenção e Formação.....	73
3.2.	Recolha e Análise de Indicadores de Desempenho Automaticamente.....	74
3.2.1.	Implementação/Aplicação do <i>OEE</i> em Sistemas Produtivos.....	74
3.2.2.	Obtenção do Indicador OEE Automaticamente	75
3.2.3.	Gestão de Indicadores de Performance de Equipamentos.....	75
3.2.4.	Incorporação de Sistemas Ciber-físicos nos sistemas Produtivos.....	76
3.3.	Monitorização e Controlo de Condição de Equipamentos	78
3.3.1.	Desenvolvimento e Construção de Equipamentos	78
3.3.2.	Controlo de Condição.....	81
3.3.3.	Aquisição e Tratamento de Dados.....	83
3.3.4.	Processamento e Análise de Dados	85
3.3.5.	Decisão e Auxílio à Gestão das Tarefas de Manutenção.....	88
4.	Caso de Estudo – Bomba Centrífuga	93
4.1.	Bombas centrífugas: Caso de estudo	93
4.2.	Constituição de Bombas Centrífugas.....	94

4.3.	Curva Característica da bomba e ponto de funcionamento	97
4.4.	Plano de Manutenção e Inspeção	97
4.5.	Possíveis causas de avarias em bombas centrífugas	98
4.6.	Técnicas de monitorização do estado de bombas centrífugas	102
4.6.1.	Norma ISO 10816.....	102
4.6.1.1.	Magnitude de Vibração.....	103
4.6.1.2.	Mudança na Magnitude de Vibração	103
4.7.	Monitorização e controlo de Condição na Indústria 4.0	104
4.7.1.	Sensores de Monitorização de Processo	106
4.7.1.1.	Monitorização do Caudal	106
4.7.1.2.	Monitorização da Pressão.....	106
4.7.2.	Sensores de Monitorização de Condição.....	107
4.7.2.1.	Monitorização do Motor Elétrico	107
4.7.2.2.	Monitorização do Acoplamento	110
4.7.2.3.	Monitorização da Bomba Hidráulica	111
4.7.3.	Aquisição, Processamento e Análise de Dados	112
4.7.4.	Sistemas de Comunicação e Gestão	114
5.	Conclusões e Trabalhos Futuros	117
	Referências Bibliográficas.....	119

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Peso da Indústria Europeia no Valor Anual Bruto e Emprego [2].....	5
Figura 2.2 – Emprego direto e indireto no setor industrial Europeu [2]	6
Figura 2.3 - VAB por setor em Portugal [3].....	7
Figura 2.4 - Índice de produtividade por hora trabalhada [3].....	8
Figura 2.5 – Percentagem da Indústria no total do PIB europeu e a meta para 2020 [2] .	9
Figura 2.6 - Entidades promotoras da Iniciativa Portugal i4.0 [5]	10
Figura 2.7 - População Mundial vs número de dispositivos conectados mundialmente [8]	12
Figura 2.8 -Visualização funcional de um sistema IoT [9]	13
Figura 2.9 - Declínio do preço dos sensores nos últimos 25 anos (em US\$) [9]	14
Figura 2.10 - Aumento da velocidade de processamento computacional nos últimos anos [9]	15
Figura 2.11 - A não sobreposição da IIoT à IoT [12].....	15
Figura 2.12 -Esquema Funcional de um sistema IIoT [14]	16
Figura 2.13 – Ilustração de um sistema Big Data [17]	17
Figura 2.14 - Desafios para a Big Data [18].....	17
Figura 2.15 – Custo de armazenamento (US\$ por gigabyte) [9].....	18
Figura 2.16 - Modelo de negócio da Computação Cloud.....	20
Figura 2.17 – Ilustração da Evolução Industrial [23]	22
Figura 2.18 - Grande variedade de novas tecnologias na procura da criação de valor às empresas [3]	26
Figura 2.19 – Quatro principais Características da Indústria 4.0	27
Figura 2.20 – Integração Vertical e rede de sistemas industriais [29].....	27
Figura 2.21 – Integração horizontal pela rede de valor [29]	28
Figura 2.22 – Acompanhamento da Engenharia em toda a cadeia de valor [29]	28
Figura 2.23 – Novas tecnologias potenciadoras de sistemas produtivos avançados [2]	28
Figura 2.24 - Desenvolvimento e novas tendências por área	29
Figura 2.25 – Esquema dos novos processos, produtos e modelos de Negócio espoletados pela Indústria 4.0 [5].....	30
Figura 2.26 - Evolução dos sistemas administrativos e de gestão, adaptado [33].....	36
Figura 2.27 - Eficácia e Eficiência dos diferentes modelos de manutenção	36
Figura 2.28 - Desenvolvimento da Eficiência da Manutenção [36]	37

Figura 2.29 – Tipos de Manutenção [36]	38
Figura 2.30 - Sinal de vibração típico por tipo de defeito mecânico [40]	41
Figura 2.31 - Distribuição da dimensão de partículas versus estado do equipamento [32]	42
Figura 2.32 - Análise termográfica da entrada de um veio numa Caixa Redutora [44] .	44
Figura 2.33 - Gestão de Risco utilizando a metodologia RBI [45]	47
Figura 2.34 - Diferentes abordagens no RBI [45]	48
Figura 2.35 - Exemplo de uma matriz de risco utilizando a probabilidade de falha e categorias de consequências para evidenciar os diferentes níveis de risco	49
Figura 2.36 - Processo de planeamento no RBI [45].....	50
Figura 2.37 - Os oito pilares da filosofia TPM [36]	56
Figura 2.38 - Fatores de Cálculo do OEE [36]	60
Figura 2.39 - Organização dos indicadores de desempenho - EN 15431 [50]	63
Figura 3.1 - O Magic Triangle ilustra um novo modelo de negócio de manutenção [51]	66
Figura 3.2 - Modelos de Machine Learning [52].....	69
Figura 3.3 - Estrutura de um sistema Fuzzy Logic [56]	70
Figura 3.4 - Estrutura de uma rede neural [57].....	70
Figura 3.5 - Estrutura de um sistema de Manutenção Remota [59]	72
Figura 3.6 - Realidade Aumentada aplicada a ensaios não destrutivos em condutas [58]	74
Figura 3.7 – Sistemas RFID aplicados em sistemas produtivos [64]	77
Figura 3.8 - Evolução e Convergência entre o "mundo Virtual e físico" nos equipamentos [66]	80
Figura 3.9 - Visualização de uma fábrica baseada na Indústria 4.0 [58].....	81
Figura 3.10 - Gráfico de suporte à identificação de componentes críticos [67].....	83
Figura 3.11 - Processamento de Informação na Industria 4.0	84
Figura 3.12 – Esquema de aquisição e processamento de dados	85
Figura 3.13 - Quatro ferramentas de visualização para Controlo de Condição [70].....	91
Figura 4.1 - Oportunidades de otimização de energia em sistemas industriais [71]	93
Figura 4.2- Exemplo de custos do ciclo de vida para um sistema de bombeamento [71]	94
Figura 4.3 - Forma típica do corpo uma bomba centrífuga [72]	95
Figura 4.4 - Grupo Eletrobomba montado em estrado [73]	95

Figura 4.5 - Bomba Centrífuga Normalizada EN733 [73]	96
Figura 4.6 - Ponto de funcionamento de uma bomba.....	97
Figura 4.7 - Avarias causadas por desalinhamentos [75]	98
Figura 4.8 - Locais de medição de vibrações e as suas direções [79]	103
Figura 4.9 - Adaptado. Esquema ilustrativo de uma central de bombagem com monitorização em tempo real [80].....	105
Figura 4.10 - Eletrobomba End Suction com diferentes sistemas de monitorização de processo [81]	106
Figura 4.11 - Motor Elétrico [82]	107
Figura 4.12 - ABB Ability Smart Sensor instalado num Motor Elétrico [83].....	109
Figura 4.13 – Esquema de operação de sistema de monitorização de motores elétricos [83]	109
Figura 4.14 - Tipos de desalinhamento a) linear, b) angular, c) combinado [84]	110
Figura 4.15 - Modelo simplificado de uma bomba centrífuga [86].....	112
Figura 4.16 - Ilustração de manutenção remota descentralizada e monitorização de manutenção localizada com recurso a aplicações web [87]	115
Figura 4.17 - Representação de dois gráficos de radar, Eletrobomba A em funcionamento normal e Eletrobomba B a operar deficientemente;	116

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Seis eixos de atuação prioritário da Iniciativa Portugal i4.0 [5]	11
Tabela 2.2 – Tecnologias que possibilitam a Internet of Things [9]	12
Tabela 2.3 - Evolução Industrial [5]	22
Tabela 2.4 – Oportunidades na Indústria 4.0 nas cadeias de valor horizontal e vertical [3]	33
Tabela 2.5 – Ganhos de receita, custos e de eficiência com a Indústria 4.0 [3]	34
Tabela 2.6 – Técnicas de Manutenção Preditiva por Equipamentos [39]	40
Tabela 3.1 - Características dos algoritmos mais utilizados [67]	86
Tabela 4.1 - Componentes integrantes de uma bomba centrífuga normalizada EN733 [73]	96
Tabela 4.2 - Tabela suporte para deteção de avarias em bombas End Suction [74]	99
Tabela 4.3 - Técnicas de Monitorização de Equipamentos de Bombagem por Defeito tipo; 1) Prática de Monitorização adequada à deteção do defeito; 2) Prática de Monitorização parcialmente adequada à deteção do defeito 3) Prática de Monitorização não adequada à deteção [76], [77]	102
Tabela 4.4 - Valores de severidade de vibração [78]	103
Tabela 4.5 - Equipamentos utilizados para monitorização de uma Eletrobomba End Suction	105
Tabela 4.6 - Avarias por componente de Motor Elétrico de Indução [82]	108
Tabela 4.7 - Parâmetros analisado pelo ABB Ability Smart Sensor	110
Tabela 4.8 – Exemplo de potenciais algoritmos a utilizar na monitorização de uma eletrobomba	113

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Na última década foi notório o grande desenvolvimento e disseminação de novas tecnologias despoletadas pela omnipresença da internet nos países desenvolvidos. A transformação industrial, proporcionada pela *Industrial Internet of Things*, está a decorrer a uma rapidez imensa. Sendo uma nova mudança transversal não só a todas as áreas indústrias como também a todo o mundo comercial e social.

A expressar a dimensão dos desenvolvimentos que a indústria atualmente atravessa Mary Barra a diretora executiva da GM, um dos maiores grupos automóvel mundial, disse "*I believe the auto industry will change more in the next five to 10 years than it has in the last 50*" [1].

Esta é uma oportunidade das economias de diferentes países se afirmarem na indústria de vanguarda, entenderem os riscos, oportunidades e todas as potencialidades competitivas que a indústria 4.0 oferece.

A essência da indústria 4.0 está na introdução de sistemas ciber-físicos em sistemas industriais. Estes sistemas consistem em objetos, sensores e atuadores que serão capazes de comunicar continuamente e trocar informação através da *Industrial Internet of Things* e com isso criar redes de partilha de dados em máquinas, materiais e produtos ao longo de toda a cadeia de valor.

A inclusão das novas tecnologias nos modelos de negócio industriais servirá para a criação de um novo paradigma industrial. A *Industrial Internet of Things* e *Cyber-physical Systems* podem permitir a otimização das estruturas empresarias e seus processos, possibilitando a partilha de informação em tempo real com os centros de decisão das empresas.

Fatores externos como mudanças no mercado, aumento da concorrência e desenvolvimentos sócio-tecnológicos são tidos como variáveis a que as empresas têm de estar prontas para responder e a se adaptarem. É imperativo que as empresas tenham capacidade para lidar com as diferentes dinâmicas dos mercados, conseguindo sempre manter a sua competitividade.

1.2. Motivação

Ao longo dos anos a indústria tem mostrado ser uma área altamente dinâmica em que as empresas carecem de se manterem tecnologicamente atualizadas de forma a responder às exigências do mercado e para se manterem competitivas.

Dessa forma a indústria está constantemente em desenvolvimento e a absorver os novos conceitos e novas tecnologias. Essas alterações pressupõem modificações nas organizações e também nos modelos de negócio.

A quarta revolução industrial assume a criação de valor pela aquisição, processamento e partilha de dados em grande escala. Assim surge em 2013 o termo, indústria 4.0, que foi tomada como política estratégica pela União Europeia, apresentando um conjunto de medidas para aumentar a competitividade da indústria, descrevendo a mudança de paradigma de uma indústria centralizada para uma economia descentralizada na produção e na gestão.

Numa pesquisa global revela que o tema “Indústria 4.0” ainda está a ser formulado e nos próximos anos irá despertar um grande número de alterações na indústria. Foi neste contexto que o autor deste trabalho aceitou o desafio de efetuar um estudo sobre este tema, tendo como objetivo apresentar um entendimento amplo do tema, quais as perspectivas para a manutenção e também apresentar recomendações e propostas para a manutenção na Indústria 4.0.

1.3. Objetivo da Dissertação

Este trabalho tem como objetivo a elaboração de um estudo sobre a evolução da manutenção industrial e projetar as expectativas para a manutenção na Indústria 4.0, contribuindo para o desenvolvimento de instrumentos que permitam auxiliar a Manutenção integrando as inovações e novos conceitos que despoletaram a *Industrial Internet of Things* (IIoT).

No entanto, tratando-se de um objetivo ambicioso e tendo em conta a complexidade inerente ao tópico sob investigação e as restrições temporais associadas a uma dissertação

de Mestrado, a sua concretização nesta dissertação é focalizada na prossecução dos seguintes objetivos mais específicos:

- Caracterizar e descrever o panorama industrial atual;
- Caracterizar e descrever a Indústria 4.0;
- Identificar o enquadramento e integração da manutenção na Indústria 4.0;
- Perspetivas para a manutenção na Indústria 4.0;
- Análise de um caso prático de manutenção de um equipamento aplicando os conceitos da indústria 4.0.

1.4. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos, onde são abordadas as seguintes temáticas:

No Capítulo 1, a Introdução, é abordada a motivação, dos objetivos propostos e a estrutura para a elaboração deste trabalho.

O Capítulo 2, o Estado da Arte, faz uma breve descrição sobre o panorama industrial a nível europeu e nacional, e o enquadramento das iniciativas governamentais para alavancagem industrial. Além disso, também descreve a Indústria 4.0 e as novas tecnologias potenciadoras da mesma. No último subcapítulo é abordado o panorama da Manutenção Industrial, evolução, objetivo e tipos de manutenção.

O Capítulo 3, Estratégias para a Manutenção 4.0, está dividido em três subcapítulos, novos modelos de manutenção, recolha e análise de indicadores de desempenho automaticamente e monitorização e controlo de condição em equipamentos. No primeiro subcapítulo são apresentados novos modelos de manutenção ou alterações que se irão verificar nos existentes, e qual o impacto que irão ter nas fábricas. No segundo, são analisadas as potencialidades dos indicadores de auxílio à gestão industrial utilizados, relacionando os mesmos com as inovações despoletadas na Indústria 4.0 e com o panorama da manutenção atual. Por último, é feita uma exibição da potencialidade de integração nos equipamentos indústrias sistemas de controlo de condição para que com recurso às tecnologias presentes na *Industrial Internet of Things* seja feita uma monitorização do estado real dos equipamentos em tempo real.

No Capítulo 4 é explorado um caso de estudo onde é proposto a incorporação sensorial em pontos chave para a monitorização em tempo real de uma eletrobomba centrífuga do tipo “*End Suction*” apresentado as potencialidades e melhorias que a manutenção preditiva criará, e o respetivo incremento do tempo de vida do equipamento.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões da dissertação. E ainda é feita uma reflexão dos objetivos propostos no Capítulo 1, retirando as respetivas conclusões do trabalho elaborado. São ainda incluídas propostas de tarefas futuras que permitiriam uma melhoria e aprofundamento do trabalho desenvolvido.

2. Indústria 4.0 e Manutenção – Estado da Arte

2.1. Quadro atual e perspectivas sociopolíticas na Indústria

2.1.1. Panorama Industrial Europeu

Em 2012 as empresas industriais na união europeia geravam um volume de negócio de 1.760€ mil milhões de euros e cerca de 32 milhões de empregos diretos e aproximadamente o dobro dos empregos indiretamente, sendo as pequenas e médias empresas as que maior riqueza geravam [2]. A manutenção de uma indústria europeia robusta é essencial para a sustentabilidade da economia europeia. Para isso é necessário um constante desenvolvimento de novos equipamentos, ferramentas, materiais e tecnologias inovadoras que promovam infraestruturas modernas e o desenvolvimento sustentado de novos produtos com processos industriais mais competitivos [2].

Como resultado de sucessivas crises económicas e diferentes tendências geopolíticas, a atividade industrial na União Europeia sofre de uma erosão estrutural e corre o risco de perder a sua competitividade e capacidade produtiva. Em 2000 o contributo da indústria para o Valor Anual Bruto Europeu era de 18,50%, em 2012 esse contributo era de apenas 15%, a diferença de 3,5% resultou em cerca de 3,8 milhões de postos de trabalho sacrificados em 12 anos [2].

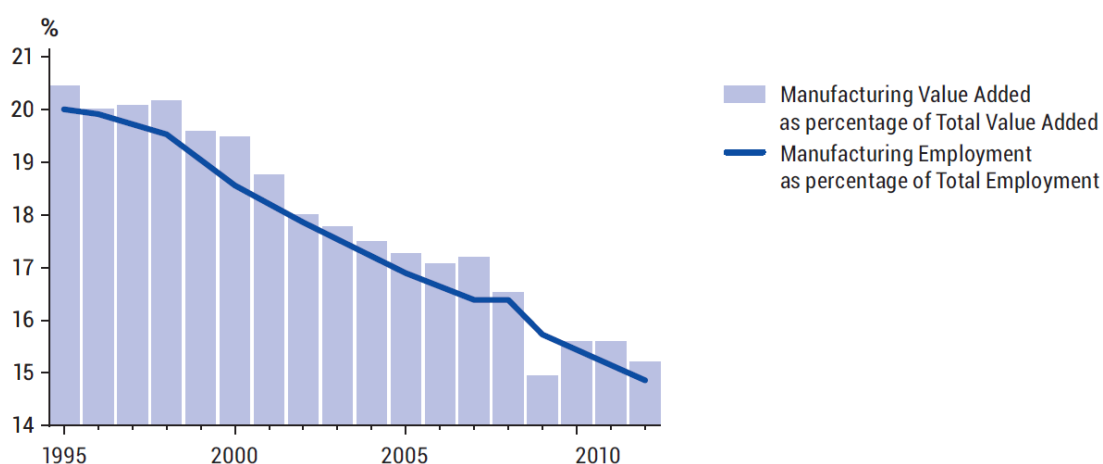


Figura 2.1 – Peso da Indústria Europeia no Valor Anual Bruto e Emprego [2]

A indústria é também um dos principais motores a todo o mercado terciário de produtos de consumo e serviços. Na Europa a indústria é responsável pelo um total de 80% de

todas as exportações, e ainda um muito significativo número de empregos diretos e indiretos [2].

Em 2014, após a crise mundial em 2008, a Europa ainda enfrentava uma crise de desemprego, com uma taxa de desemprego de 11,5% e ainda um total de 21,6% de desemprego jovem. Sendo o ressurgimento da indústria imperativo para a criação de emprego [2].

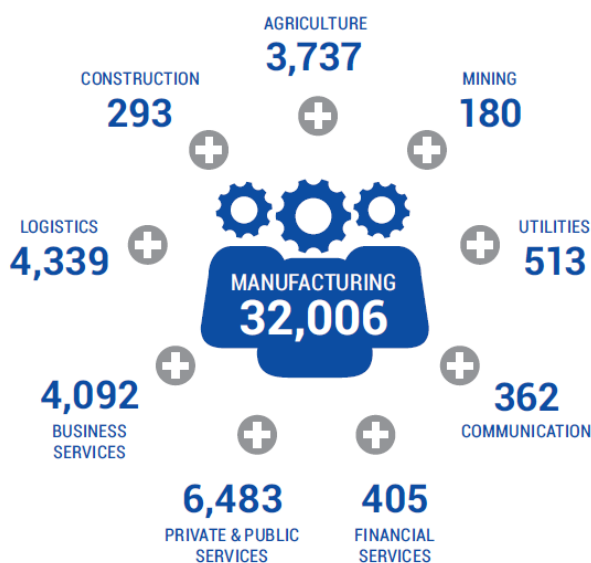


Figura 2.2 – Emprego direto e indireto no setor industrial Europeu [2]

O mapa global da indústria tem vindo a ser redesenhado com a perda de posicionamento da Europa e a ascensão das economias asiáticas, onde se incluem países como a China, Japão, Coreia do Sul e a Índia. Nos Estados Unidos da América a atividade industrial tem vindo a ser apoiada governamentalmente para voltar a ganhar competitividade, contribuindo assim para o aumento do emprego e da produtividade do país.

2.1.2. Panorama Industrial em Portugal

A indústria é reputada como um motor de desenvolvimento preponderante para a economia portuguesa nos próximos anos.

Atualmente a indústria portuguesa representa aproximadamente 22% do valor acrescentado bruto de Portugal, e emprega cerca de 25% dos trabalhadores ativos, números representativos da enorme importância da indústria portuguesa para a estabilidade socioeconómica de Portugal [3].

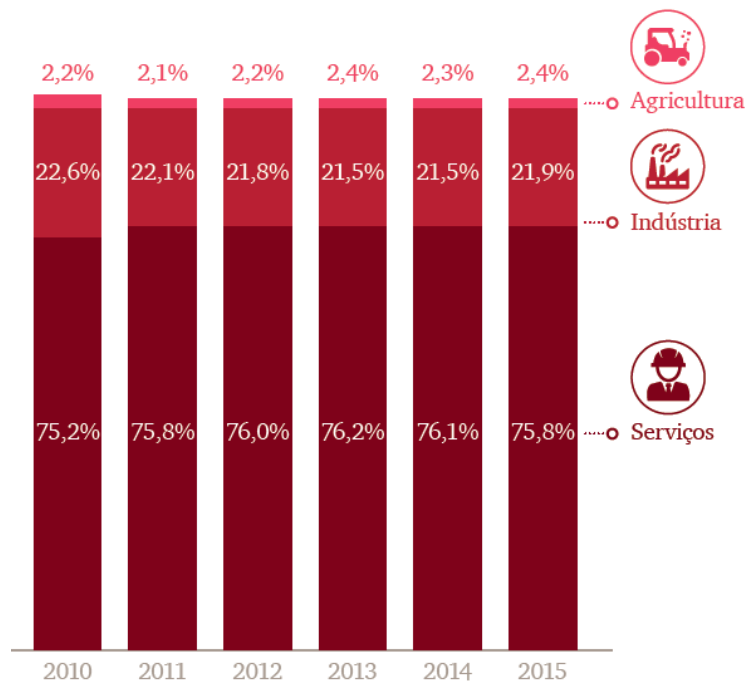


Figura 2.3 - VAB por setor em Portugal [3]

O sector industrial nacional encontra-se numa fase de mudança importante, sendo essencial a modernização e internacionalização do sector, procurando ser um sector mais dinâmico, moderno e inovador, de forma a obter um crescimento sustentável e equilibrado [3].

No relatório *Global Competitiveness Report* do fórum Económico Mundial, Portugal continua a apresentar um indicador de competitividade abaixo do desejável. Fundamentalmente devido à ainda reduzida produtividade, aos elevados custos de contexto, aos processos de licenciamento, à baixa intensidade tecnológica, aos elevados custos com energia e logística e à estrutura de capitais, ou seja, a capacidade de financiamento.

No mesmo relatório são apresentados como áreas prioritárias a desenvolver para aumentar a competitividade nacional o ambiente macroeconómico e a inovação. Apresentando numa zona de conforto as infraestruturas existentes, a maturidade tecnológica, a saúde e educação primárias. Numa zona média, de ação condicionada, estão presentes a educação superior e eficiência no mercado de trabalho [3].

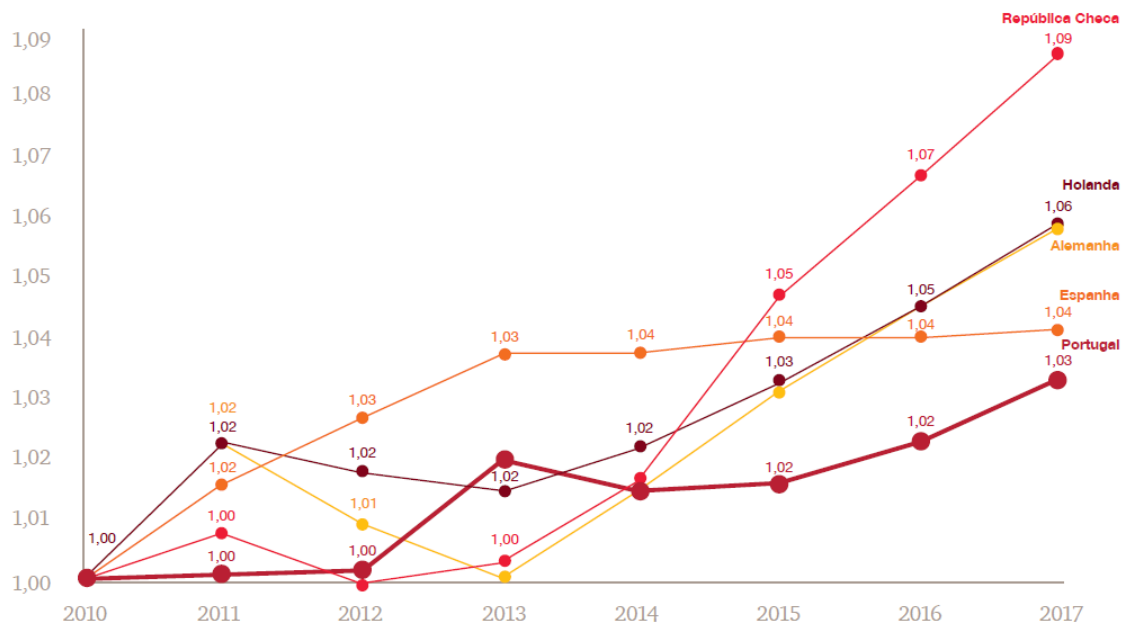


Figura 2.4 - Índice de produtividade por hora trabalhada [3]

2.1.3. Iniciativas de Recuperação Industrial na União Europeia

Ao longo dos anos têm sido desenvolvidas várias tecnologias, porém nem sempre existiu uma ponte de ligação entre as tecnologias mais recentes e a sua potencial utilização como ferramenta nos processos industriais. Em 2009 a comissão europeia emitiu um relatório intitulado “*Preparing for our future: Developing a Common Strategy for Key Enabling Technologies in the EU*”. O desenvolvimento do relatório teve como objetivo identificar *Key Enabling Technologies*, ou seja, tecnologias chave que capacitem a indústria europeia de novas valências, tornando-a mais sólida e convergindo ao encontro dos desafios impostos pela sociedade.

Foram identificadas seis *KET's*, *Key Enabling Technologies: Advanced Manufacturing, Advanced Materials, Industrial Biotechnologies, micro e nanoelectronics, Nanotechnologies e Photonics*.

No comunicado são ainda propostas várias medidas para melhorar o quadro atual da indústria europeia, que com recurso aos *KET's* oferecem uma estratégia consistente a nível europeu em prol do seu desenvolvimento.

Os *KET's* são considerados como a força motriz para a renovação de processos, produtos e serviços em diversas aplicações ou indústrias como, a automóvel, aeronáutica,

engenharia, espacial, química, têxtil, construção, agricultura e saúde, onde a indústria europeia se posiciona satisfatoriamente competitivamente [2].

Numa outra perspetiva é esperado que os KET's modernizem os processos de fabrico, e que consigam trazer reduções no custo de produção, na utilização de matérias primas e no consumo energético. Com isto conseguem-se fábricas mais sustentáveis ambientalmente, reduzindo a poluição e o desperdício gerado.

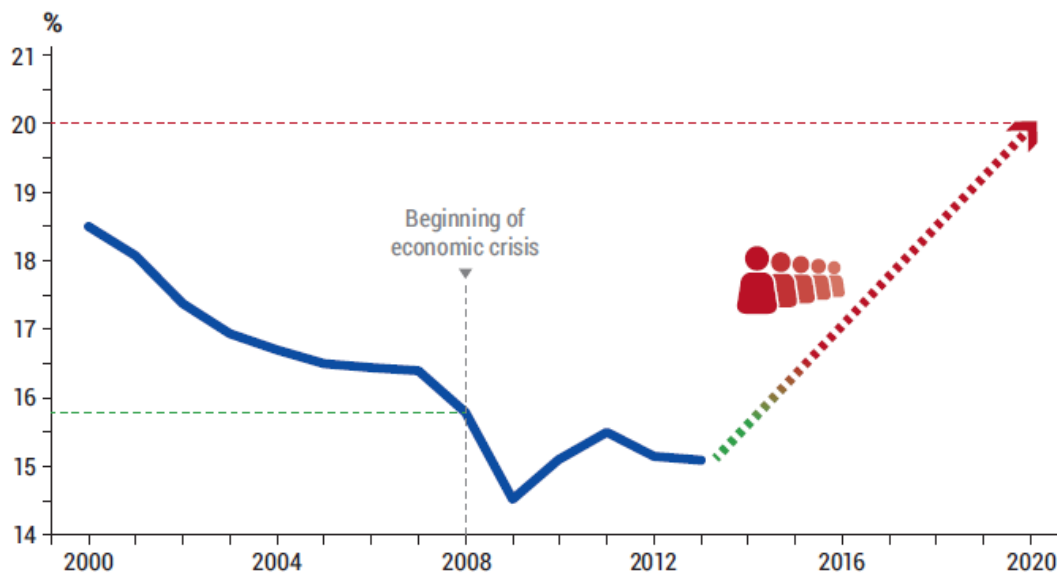


Figura 2.5 – Percentagem da Indústria no total do PIB europeu e a meta para 2020 [2]

Consequentemente a comissão europeia estabeleceu políticas de estímulo à indústria para crescer, colocando um objetivo de em 2020 a indústria europeia contribuir para 20% do seu PIB. Para que esta meta seja alcançada o Observatório Europeu estima que o sector industrial terá de produzir mais 841 mil milhões de euros de valor acrescentado em 2020, o que corresponde a mais de 15 milhões de novos empregos no sector industrial em 2020 [2].

2.1.4. Iniciativa Portugal i4.0

A 30 de Janeiro de 2017 o governo Português apresentou um conjunto medidas que pretendem valorizar, promover e ajudar o investimento da indústria portuguesa na indústria 4.0, o nome atribuído ao plano de medidas é “Iniciativa i4.0”.

A Iniciativa i4.0 é constituída por três objetivos centrais [4]:

- Acelerar a adoção das tecnologias e conceitos da Indústria 4.0 no tecido empresarial português;
- Promover empresas tecnológicas portuguesas a nível internacional;
- Tornar Portugal um polo atrativo para o investimento no contexto Indústria 4.0;

As iniciativas resultam de um trabalho desenvolvido pelo Ministério da Economia Português, empresas de consultadoria empresarial, empresas do ramo industrial e tendo, diversas entidades não empresariais, assim como um comité estratégico, onde se incluíram algumas entidades internacionais com experiência comprovada na Indústria 4.0 [5].



Figura 2.6 - Entidades promotoras da Iniciativa Portugal i4.0 [5]

De acordo com o *Digital Economy & Society Index 2016* da Comissão Europeia, Portugal apresenta-se acima da média da União Europeia ao nível da competitividade digital. Ainda assim é necessário melhorar as competências nesta área, pois cerca de 50% da população portuguesa não tem competências digitais básicas e 28% da população nunca utilizou a internet [3].

A uma escala global um estudo da UBS coloca Portugal como a 23ª economia mais preparada para adotar a indústria 4.0, numa análise com um conjunto de 45 países [5].

O modelo apresenta uma estratégia de atuação que prioriza seis eixos de atuação, que focam desde o desenvolvimento do capital humano nacional à adaptação legal e normativa de suporte ao processo de digitalização da economia.

Tabela 2.1 - Seis eixos de atuação prioritário da Iniciativa Portugal i4.0 [5]

Capacitação de Recursos Humanos	Adequar os conteúdos formativos do sistema de ensino nacional às novas tecnologias e promover medidas de requalificação e formação de profissionais
Ecosistema de Cooperação	Promover a cooperação para o desenvolvimento e subsequente implementação de soluções e tecnologias inovadoras no quadro da 4ª revolução industrial
Startup i4.0	Reconhecer o papel das <i>startups</i> na inovação tecnológica e desenvolver um conjunto de medidas direcionadas à Indústria 4.0 em linha com a Estratégia Nacional para o Empreendedorismo da Startup Portugal
Financiamento /Apoio ao Investimento	Desenvolver um conjunto de mecanismos de financiamento destinados a projetos de âmbito Indústria 4.0 de forma a acelerar os investimentos e incentivar a adoção por parte do tecido empresarial português
Internacionalização	Promover a tecnologia portuguesa para o mercado externo, incentivando assim a internacionalização das empresas e a atração de investimento no país
Adaptação Legal e Normativa	Garantir adaptabilidade legal e normalização técnica face aos desafios da nova revolução industrial, criando um ambiente propício ao desenvolvimento e investimento tecnológico

2.2. Internet of Things

O conceito de *Internet of Things* foi mencionado pela primeira vez por Kevin Ashton refletindo o seu trabalho de aplicar indetificadores de radiofrequência (RFID) a cadeia de fornecimento [6]. Mais tarde o termo torna-se conhecido quando aplicado a um novo sistema de comunicação onde a internet está conectada com o mundo físico através de uma rede wireless (WSNs). Porém, alguns cientistas atribuem a ideia genérica da Internet das Coisas a Nikolas Tesla no século XIX quando este disse: “*When wireless is perfectly applied the whole earth will be converted into a huge brain, which in fact it is, [...] and the instruments through which we shall be able to do this will be amazingly simple compared with our present telephone*” [7].

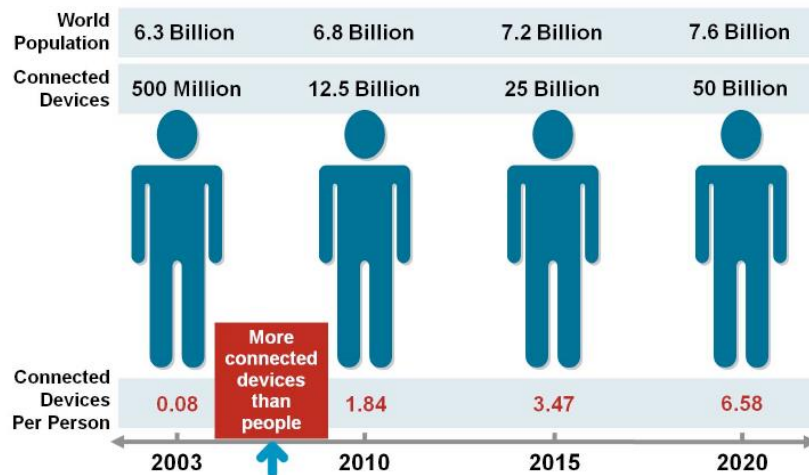


Figura 2.7 - População Mundial vs número de dispositivos conectados mundialmente [8]

Não existe um consenso na definição da Internet das Coisas na comunidade científica. Mas todas as definições que são atribuídas à IoT convergem num ponto, a utilização de tecnologia generalizou-se e tornou-se omnipresente no dia-a-dia das pessoas através de diferentes objetos que incorporam sistemas tecnológicos de partilha de informação, interagindo entre eles com ou sem intervenção humana.

A Internet das Coisas como atualmente é conhecida só é possível devido ao desenvolvimento tecnológico verificado nas últimas décadas. A tabela 2.2 apresenta as tecnologias que possibilitam a IoT.

Tabela 2.2 – Tecnologias que possibilitam a Internet of Things [9]

Tecnologia	Definição	Exemplo
Sensores	Dispositivo que gera um sinal elétrico a partir de uma condição física ou evento	O preço de sensores baixou significativamente. Os sensores tornaram-se mais pequenos, baratos e robustos, o suficiente para produzir informações de tudo, desde a monitorização dos batimentos cardíacos de um feto aos motores de um avião a 10.000 metros
Redes (Networks)	Mecanismo para comunicação com os sinais eletrónicos	As tecnologias de redes sem fios podem passar de uma velocidade máxima de 300 megabits por segundo (Mbps) a 1 gigabits

		por segundo (Gbps) com cobertura quase omnipresente.
Normas e Regulação	Regras e diretivas aceites entre as diversas empresas intervenientes	Num futuro próximo, poderemos assistir a entidades industriais e / ou organismos de normalização a trabalhar em normas técnicas e regulamentares da IoT.
Inteligência Aumentada	Ferramentas analíticas que permitem descrever, prever e explorar relações entre diversos cenários ou situações	As bases de dados com capacidade de armazenamento de Petabytes (1.000 terabytes) permite a recolha e análise de um elevado número de dados. O software Inteligência Aumentada pode substituir a análise e julgamento humano em algumas situações
Interação Máquina-Máquina	Tecnologias e técnicas que melhoram o cumprimento das medidas prescritas	As interfaces máquina-máquina removem a intervenção humana, tornando os sistemas mais confiáveis e infalíveis, e os processos otimizados.

Com a introdução da Internet das Coisas, é possível a criação e transmissão de informação em tempo real, informação que é armazenada e analisada e que possibilita uma ação. Um sistema funcional de um sistema IoT é demonstrado na figura 2.8. O esquema apresentado funciona em *loop*, ou seja, está a gerar, comunicar, agregar e a analisar dados continuamente.

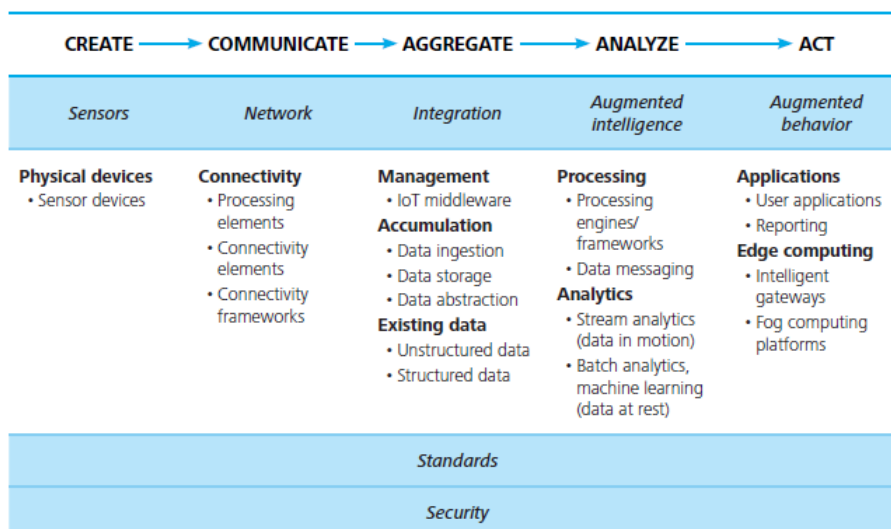


Figura 2.8 - Visualização funcional de um sistema IoT [9]

2.3. Industrial Internet of Things

A era da *Internet of Things* começou com a integração de sistemas de comunicação na computação. Essa integração foi amplamente bem aceita, quer nos ambientes empresariais como domésticos. Começou com a utilização de sensores simples e de baixo custo, com aplicações como equipamentos de identificação por radio frequência para a marcação e rastreamento de artigos em armazéns [10].

Com os sucessivos desenvolvimentos da tecnologia e os respectivos preços a baixarem, as tecnologias tornaram-se disponíveis para a integração em componentes de grande consumo de massas. Esta mudança de paradigma levou a que atualmente tenhamos a IoT numa inúmera variedade de equipamentos, nos mais diversos lugares, desde aplicações domésticas, sistemas de iluminação, sistemas de automação, relógios, carros, autocarros, etc. [10].

A nível industrial a IIoT pretende integrar sistemas que permitem uma intercomunicação entre o mundo digital e o físico. O ser humano pode interagir com os meios de produção apropriados durante o processo de fabrico ao mesmo tempo que monitoriza e controla os requisitos especificados para a satisfação das necessidades do cliente.

A cooperação entre sistemas físicos e digitais através de softwares integrados em redes de dados da infraestrutura são instrumentos poderosos, flexíveis, adaptáveis ao meio em que estão inseridos, eficazes e eficientes no seu desempenho [11].

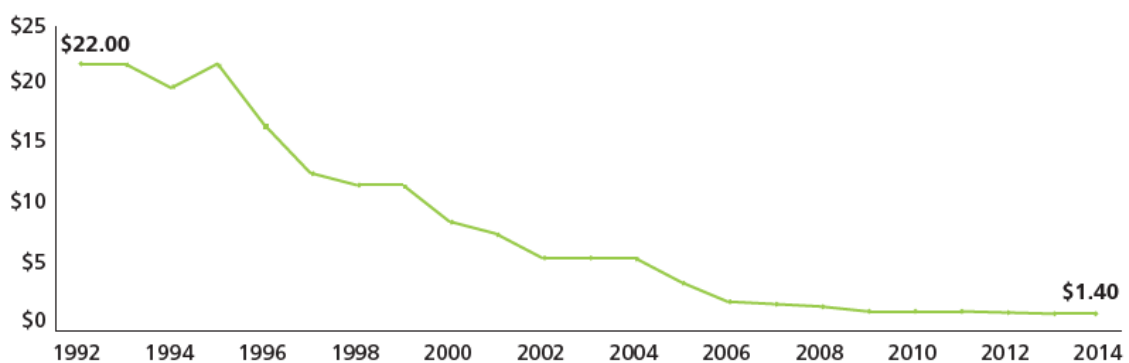


Figura 2.9 - Declínio do preço dos sensores nos últimos 25 anos (em US\$) [9]

A IIoT segue o mesmo conceito da internet das coisas, mas com objetivos e objetos normalmente diferentes. Alguns exemplos onde a IIoT é utilizada, podem ser

equipamentos como sensores, atuadores, robôs, impressoras 3D, fresadoras e máquinas CNC. A IIoT é resultado da integração em sistemas e equipamentos industriais, a computação avançada, sensores e sistemas de informação que permanecem em constante partilha e comunicação de dados [10].

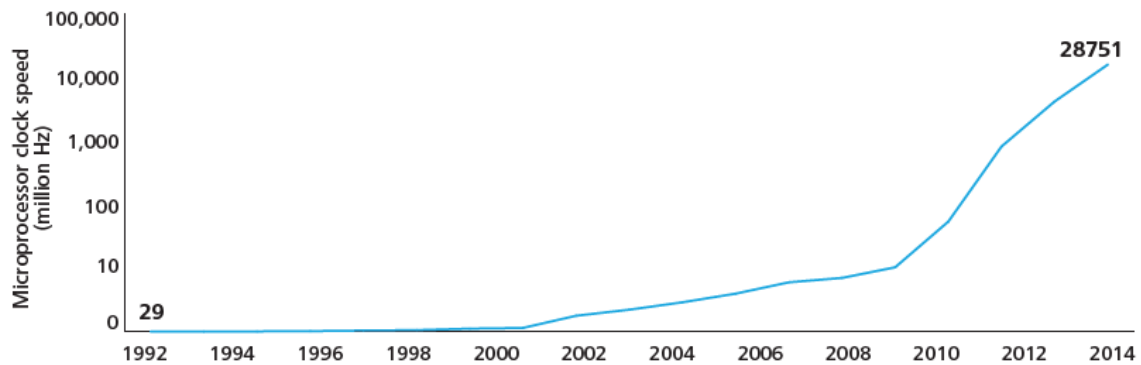


Figura 2.10 - Aumento da velocidade de processamento computacional nos últimos anos [9]

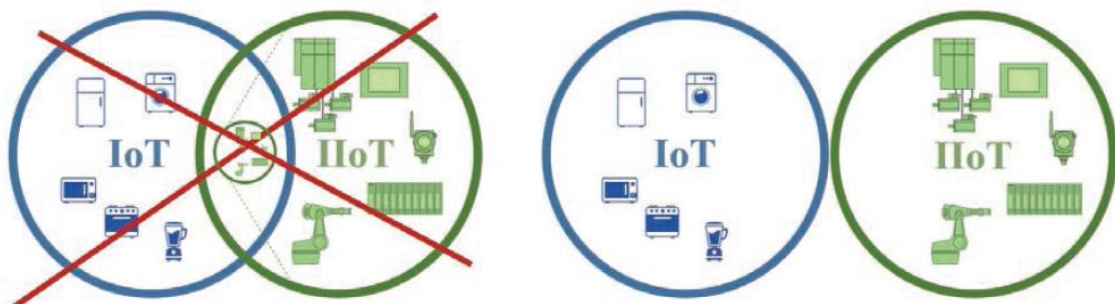


Figura 2.11 - A não sobreposição da IIoT à IoT [12]

A *industrial internet of things* deriva da *Internet of Things*, porém não se sobrepõem. A IoT é aplicada a equipamentos de uso corrente por parte de uma população genérica no seu dia-a-dia, são torradeiras, frigoríficos, máquinas de lavar roupa, etc. Na *Industrial Internet of Things* os equipamentos são diferentes, são PLC's, cartas de I/O, servomotores, sistemas de visão, etc [13].

A figura 2.12 apresenta um esquema genérico de uma indústria onde é utilizado o conceito da IIOT. Exibindo como base os ativos físicos da fábrica e os processos produtivos que são necessários para o fabrico de determinado produto. De seguida é apresentada a rede de intercomunicação da fábrica, que comunica entre si e fornece dados relativos dos ativos à *Cloud*. A *Cloud* é o terceiro nível, todos os dados recebidos são processados e tratados. Por último, é apresentada a partilha das informações relativas à fábrica aos responsáveis da mesma.

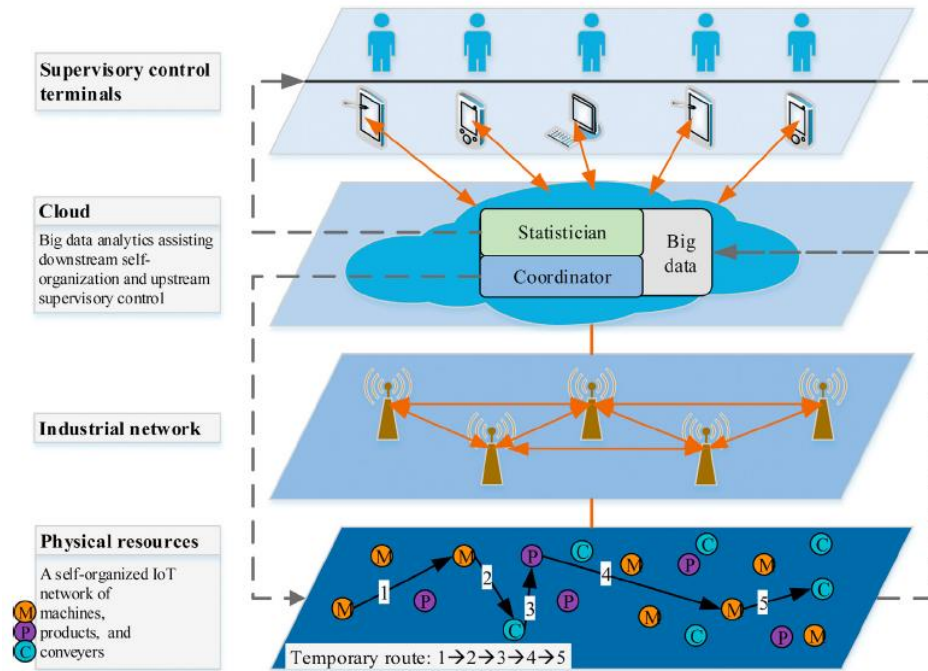


Figura 2.12 -Esquema Funcional de um sistema IIoT [14]

2.4. Big Data

2.4.1. Definição de Big Data

A Internet das Coisas (IoT) traz a capacidade de reunir, qualificar, sincronizar e organizar os diferentes dados de diferentes fontes dentro de uma fábrica ou empresa em tempo real e com elevadas capacidades de processamento.

O termo *Big Data* tem sido utilizado para descrever o crescimento exponencial de dados nas últimas duas décadas. A primeira definição de *Big Data* surge em 2015 com a empresa Gartner a descrever a *Big Data* como sendo uma tecnologia para processar um elevado volume de dados e com uma elevada velocidade de processamento, e com aplicabilidade em diversas áreas [15].

Estas novas plataformas materializam a capacidade de implementar grandes dados analíticos preditivos para a transformação de dados em informações para conhecimento através de uma estrutura CPS (sistemas ciber-físicos). Por exemplo, informações importantes sobre o estado de degradação ou ineficiência de equipamentos ou processos de produção podem levar a decisões de manutenção esclarecidas e eficazes, podendo evitar custos com falhas e/ou *downtime* não planeados [16].

A Figura 2.13 fornece uma visão esquemática de como uma grande quantidade de dados analíticos podem criar valor dentro de diferentes sectores industriais.

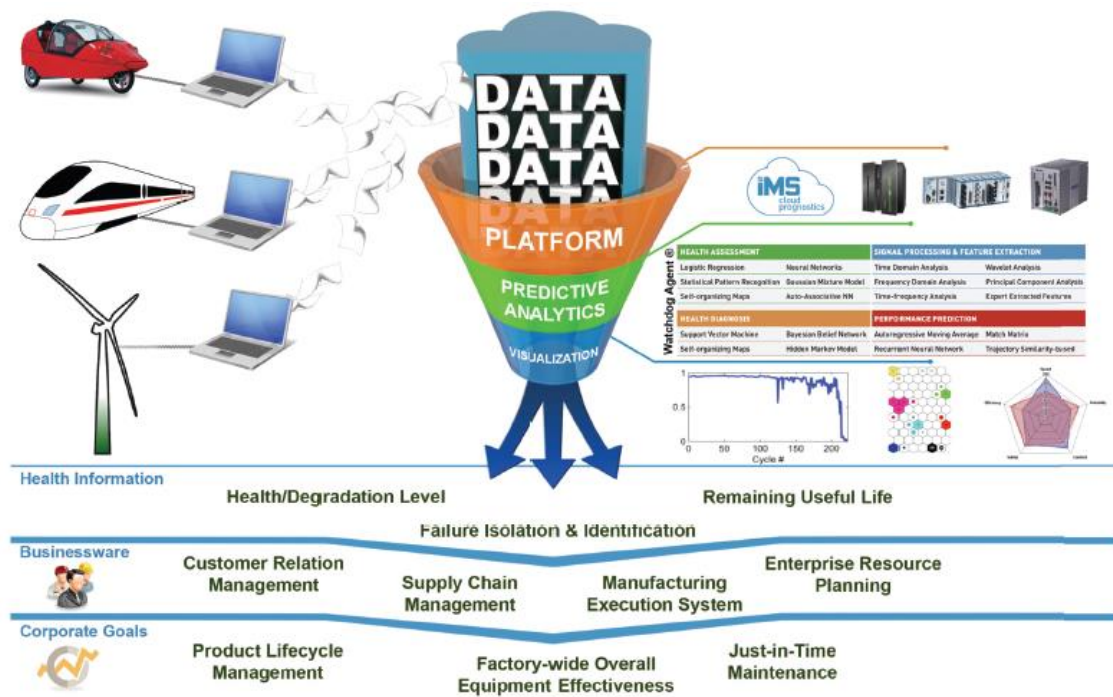


Figura 2.13 – Ilustração de um sistema Big Data [17]

A *Big Data* pode ser dividida em três grandes grupos considerados com nucleares para o seu correto funcionamento: dados, processamento e gestão [16]. E em todos esses grupos existem desafios e desenvolvimentos a efetuar para tornar esta tecnologia presente em todas as empresas e instituições.



Figura 2.14 - Desafios para a Big Data [18]

No que diz respeito aos dados, não é possível fazer uma exposição sem referir os “5Vs do *Big Data*”, Volume, Variedade, Velocidade, Valor e Veracidade [18].

- Volume: é a grande quantidade de dados gerados por pessoas e máquinas. Estes dados necessitam de armazenamento e de serem analisados, a figura 2.15 exhibe o decréscimo no custo de armazenamento, que a massificação de novas tecnologias e formas de armazenar dados tem espoletado [18].

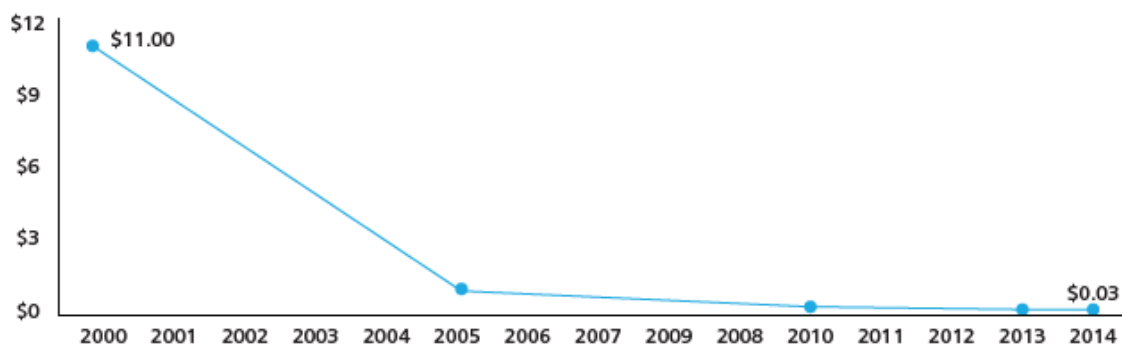


Figura 2.15 – Custo de armazenamento (US\$ por gigabyte) [9]

- Velocidade: é a celeridade com que dados são produzidos e partilhados, uma variável crucial para a análise de informação em tempo real;
- Variedade: são as diferentes formas e tipos de dados produzidos e partilhados que é necessário trabalhar e também as diferentes fontes de dados;
- Veracidade: é a verificação da integridade dos dados necessária para que exista segurança, e que todos os dados utilizados são fidedignos, ou seja, sem a incerteza e imprecisão de dados, ou valores perdidos e distorção de dados;
- Valor: refere-se à descoberta de conhecimento que está relacionada com a qualidade da análise do conjunto de dados.

2.4.2. Data Analysis

Transformar toda a informação recolhida em conhecimento sintetizado que possa ser utilizado para a condução e apoio à gestão das empresas é um dos grandes desafios da indústria 4.0. Esta atividade requer sistemas e algoritmos bastante evoluídos que sejam capazes de processar informação em tempo real.

Podem ser definidos dois princípios essenciais para a análise de informação que vão para além da capacidade de processamento.

- Os 5 V's presentes na *Big Data*, é necessário assegurar a qualidade e preservação dos dados durante todo o processo de recolha e construção de resultados, sendo possível fazer verificações da integridade dos dados recolhidos [19].

- O sucesso na recolha e processamento de dados não terá qualquer valor se a apresentação dos dados não for a acertada. A forma como o resultado final é construído, apresentado e comunicado aos utilizadores tem impacto na exploração de todas as mais valias que estes sistemas poderão produzir [19].

A argumentação com base na visualização de dados permite aos usuários que as suas decisões sejam tomadas com recursos visuais. A exposição de dados de uma forma visual é mais eficaz, rápida e vantajosa do que a consulta dos dados em bruto.

2.5. Cloud Computing

A computação *Cloud* emergiu na última década como uma nova forma para hospedar e oferecer serviços via Internet. Estas plataformas são bastante atrativas para as empresas da indústria de tecnologias de informação pois elimina o aprovisionamento e a necessidade de investimento inicial, oferecendo às empresas os serviços e o armazenamento que as mesmas necessitam. Permitindo aumentar e diminuir recursos de acordo com as necessidades da empresa [20].

O termo *Cloud* já tinha sido utilizado em vários contextos ligados à tecnologia, como por exemplo para descrever a vasta rede de multibancos. Mas em 2006 quando Eric Shmidt, CEO da multinacional tecnológica Google, descreveu o modelo de negócio que oferecia serviços transversais à internet é que o termo se tornou popular e teve uma aceitação generalizada [21].

As plataformas *Cloud* são tecnologias mais experimentadas comparando com a IoT, são locais virtuais com capacidade ilimitada em termos de processamento e armazenamento de informação e dados.

O National Institute of Standard and Technologies (NIST), definiu a computação Cloud da seguinte forma, “*Cloud computing is a model for enabling ubiquitous, convenient, on-demand network access to a shared pool of configurable computing resources (e.g., networks, servers, storage, applications, and services) that can be rapidly provisioned and released with minimal management effort or service provider interaction*” [21].

A computação *Cloud* e a *Internet of Thing* são duas tecnologias complementares uma da outra, que funcionando de forma conjunta formam o presumível futuro da internet e a forma como as pessoas a irão utilizar [21].

A organização do modelo de negócio na computação *Cloud* está dividida em dois sectores [20]:

- Fornecedores de Infraestruturas: fazem toda a gestão das plataformas *Cloud* e alugam as mesmas de acordo com os preços determinados pelo mercado.
- Fornecedores de Serviço: alugam os recursos de um ou mais fornecedores de infraestruturas para os clientes finais.

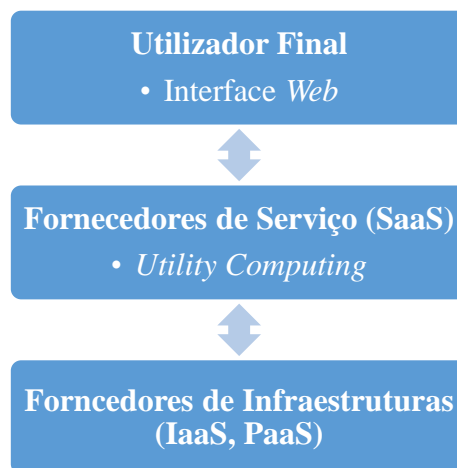


Figura 2.16 - Modelo de negócio da Computação Cloud

O aparecimento da computação *Cloud* conduziu a alterações no mercado das tecnologias de informação, com grandes empresas tecnológicas como a Google, Amazon e Microsoft a apostarem para garantir serviços *Cloud* mais eficientes, mais poderosos, rentáveis, e que façam com que estas plataformas sejam atrativas economicamente para as empresas.

Estão definidos cinco elementos que distinguem a computação *Cloud* e a tornam atrativa para o mercado e empresas [20].

- Baixo investimento inicial, a computação *Cloud* usa um modelo de negócio apelidado de “*use-as-you-go*”, isto é, os preços são determinados de acordo com os recursos utilizados. O serviço não necessita de um investimento inicial em infraestruturas para ser utilizado, são alugados os recursos que o utilizador pagante necessita.

- Baixo custo operacional, os recursos numa plataforma *Cloud* podem ser rapidamente alocados e desalocados conforme a procura dos mesmo assim o exigir. Dessa forma quando as necessidades operacionais são baixas, é possível diminuir custos.
- Fator de escala, é possível as empresas fornecedoras de serviço aumentarem ou diminuïrem os seus recursos de forma a responder a um rápido crescimento ou decréscimo da procura de serviço.
- Fácil acesso, os serviços colocados à disposição na *Cloud* são criados com numa Web. Dessa forma, os serviços são facilmente acessíveis através de uma larga variedade dispositivos com ligação à internet. Nesses dispositivos podemos incluir computadores, telefones, *PDA's*, *tablets*, etc.
- Redução de Riscos para o normal funcionamento das empresas e despesas de manutenção. O serviço outsourcing *Cloud* prestado por empresas fornecedoras de serviço faz com que o cliente final possa deslocar os serviços *Cloud* entre empresas fornecedoras de serviços, e o mesmo acontece entre empresas fornecedoras de serviço e empresas fornecedoras de infraestruturas.

2.6. Indústria 4.0

2.6.1. Conceção do Termo Indústria 4.0

Em seguimento da visão da comissão Europeia do que seria uma industrial mais desenvolvida e preparada para um futuro competitivo e sustentável, na feira industrial de Hannover, na Alemanha, em 2011 foi introduzido o conceito de indústria 4.0, sendo esta a data assinalada como o início da quarta revolução industrial [2].

Desde da primeira Revolução Industrial no século XVIII com a introdução nos processos industriais a água e do vapor de água, foram resultando revoluções posteriores que trouxeram inúmeros desenvolvimentos na indústria. Ao longo dos anos os processos produtivos têm-se tornado cada vez mais complexos, automatizados e sustentáveis, o que significa que as pessoas podem operar as máquinas de uma forma mais simples, com uma maior eficiência e persistentemente [22].

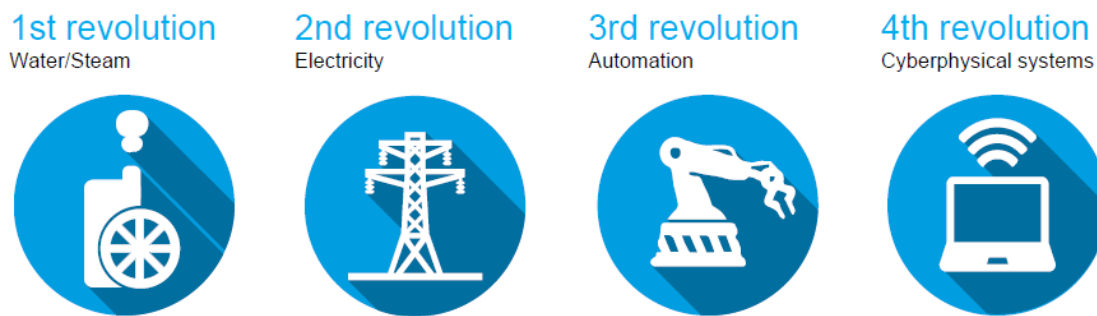


Figura 2.17 – Ilustração da Evolução Industrial [23]

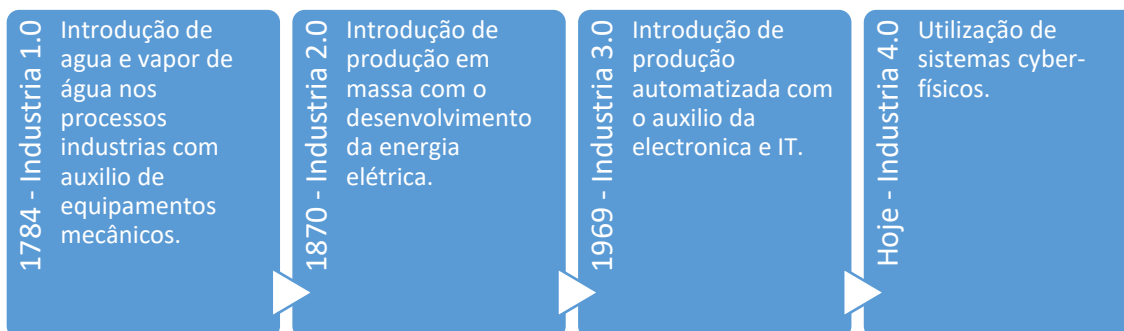


Tabela 2.3 - Evolução Industrial [5]

Desde que o conceito de indústria 4.0 foi apresentado várias organizações ligadas à investigação e empresas desenvolveram trabalho sobre o mesmo, porém ainda não existe uma definição integralmente aceite na comunidade científica e empresarial. Assim sendo, são apresentados diversos conceitos formulados para definir a indústria 4.0:

- “The current understanding of Industry 4.0 cannot claim the principles. In addition, the manufacturing industry is desperate for a hierarchical procedure of technology application, which will guide people to fullfil Industry 4.0” [22].
- “INDUSTRIE 4.0 connects embedded system production technologies and smart production processes to pave the way to a new technological age” [24].
- “the upcoming industrial revolution will be triggered by the Internet, which allows communication between humans as well as machines in Cyber-Physical-Systems (CPS) throughout large networks” [25].
- A Indústria 4.0 foca-se na total digitalização dos ativos físicos e na sua integração em ecossistemas digitais [3].

2.6.2. Enquadramento da Indústria 4.0

A Indústria 4.0, também denominada de a quarta revolução industrial, é algo que já começou a ser implementado e que irá conduzir uma total transformação digital de

diversas atividades industriais. Tradicionalmente a indústria é entendida como um conjunto de processos que transformam matérias-primas em produtos físicos através de processos que envolvem pessoas e outros recursos. Espera-se que este novo paradigma industrial quebre barreiras existentes em processos industriais atuais e que disponibilize novas tecnologias inteligentes, cooperativas e interconectadas aos processos de fabrico, capazes de monitorizar o desempenho dos sistemas em tempo real para controlo de custos, com reduções de tempos de inatividade e aumentando a resiliência dos processos a falhas [26].

Desde da criação do termo indústria 4.0, este têm sido um tópico bastante popular e discutido no ramo. Em simultâneo diferentes países industriais foram criando reformas e políticas para que a quarta revolução industrial fosse seguida, acompanhada e potenciada pelas indústrias presentes nesses países. Na China, foi desenvolvido um plano chamado “*Made in China 2025*” com diretivas para a adaptação das novas tecnologias disponíveis na indústria [22].

O que é e o que faz a indústria 4.0? A indústria inteligente ou indústria 4.0 refere-se à evolução tecnológica ocorrida que vai desde sistemas integrados até sistemas ciberfísicos. De uma forma simplificada a indústria 4.0 representa uma expectável quarta revolução industrial onde serão implementadas as tecnologias disponibilizadas pela *Industrial Internet of Things*. Ou seja, a criação de uma rede de informação inteligente e descentralizada, permitindo a gestão de processos independente, com interações entre o “mundo” real e o virtual. Essa interligação e cooperatividade ininterrupta entre os dois “mundos” irá ser o principal fator diferenciador da indústria 4.0 [26].

Com o desenvolvimento da indústria 4.0, a comunicação entre a fábrica e o cliente final sofrerá alterações. Devido à internet das coisas os fabricantes terão condições para integrar a procura do produto às cadeias de fornecimento que lhe são associadas, dessa forma será possível um maior envolvimento do cliente final. O cerne da Indústria 4.0 é a tecnologia inteligente que conectada ao mundo digital cria um novo sistema de cadeia de valor. Em 2020 é esperado que os produtos inteligentes que incorporam tecnologia que comunica via internet serão o maior utilizador da internet, é estimado um total de 24 mil milhões de produtos. Mas não serão apenas os utilizadores finais a sentirem as diferenças com a indústria 4.0, a introdução da *Industrial Internet of Things* revolucionará a forma como operam e são dirigidas fábricas, edifícios, equipamentos, meios de transporte, ou

seja, um indefinido número de novas funções, processos e serviços serão desenvolvidos e enquadrados [26].

Existe um consenso entre os investigadores que revoluções industriais demoram um período de tempo longo para se desenvolverem. É expectável que uma revolução industrial traga alterações em quatro aspetos nucleares na indústria: a fábrica, o mercado, o produto e os clientes.

No futuro da indústria 4.0 espera-se que estes quatro pilares se definam das seguintes formas [22]:

- **A Fábrica.** Como um dos principais elementos da indústria 4.0, as novas fábricas do futuro irão integrar um novo paradigma onde para além de todos os recursos necessários à atividade produtiva, como sensores, atuadores, máquinas, robots, tapetes transportadores, vão estar conectadas e a trocar informação automaticamente e constantemente. Criando fábricas criteriosas, informadas e inteligentes, que conseguirão fazer gestão de produções, gerir e alimentar os sistemas da fábrica, e prever e manter os equipamentos. Também, muitos dos processos industriais, como o desenvolvimento de novos produtos, planeamento de produção e a engenharia de produto serão acompanhados numa metodologia *end-to-end*, o que significará que os processos não serão apenas geridos por um sistema descentralizado mais também controlados independentemente. Este será o futuro expectável para as fábricas que são denominadas fábricas do futuro, FoF.
- **Mercado.** A indústria 4.0 exige uma comunicação completa, contínua e contante entre as várias empresas envolvidas no ciclo produtivo de um produto, desde fábricas, fornecedores, logística, recursos, clientes, etc. Todas as empresas terão de partilhar informação constantemente. Dependendo da procura do produto todos os sectores disponibilizarão informações em tempo real entre si, tornando possível uma gestão que garante que é extraído o máximo de proveito para todas as empresas com uma partilha de recursos limitada. Em soma, os custos associados à produção, logística, matérias-primas irão baixar, tornando os negócios mais rentáveis para todas as empresas e também mais sustentáveis para o planeta, pois também as emissões de CO₂ sofrerão um impacto positivo. Em resumo, todas as secções da indústria conseguirão alcançar um estado de auto-organização e emitir

respostas em tempo real para o mercado, sejam eles clientes internos ou externos à organização da empresa.

- **Produtos.** Resultante da indústria 4.0 serão os produtos produzidos, que introduziram diferenças no seu conteúdo. Estes produtos terão integrados sensores, componentes de identificação, processadores e outros tipos de tecnologia que transmitirá e processará informação para os clientes sobre os sistemas de fabrico. Com estes elementos, muitas funções poderão ser adicionadas aos produtos, por exemplo, atualizações constantes ao produto após a sua produção. Ainda poderão ser obtidas informações de todo o processo de fabrico do produto, otimizações disponíveis ao produto e manutenções necessárias.
- **Clientes.** Os clientes também terão um conjunto de vantagens trazidas pela indústria 4.0. A de maior relevo será um novo método de compra, que permitirá encomendar um produto que corresponda às necessidades efetivas do cliente, sendo essa encomenda de várias unidades ou de apenas uma. Será possível a alteração de encomenda e de algumas especificações do produto a todo o momento durante a produção do produto sem custos acrescidos. Tendo o utilizador informação sobre a produção da produção e ainda avisos e conselhos à sua utilização.

2.6.3. Aplicabilidade da Indústria 4.0

A mudança tecnológica da indústria convencional está a acontecer a uma escala global. Esta alteração de uma indústria tradicional para uma indústria 4.0 pode ser traduzida pela lei de Moore, isto é, assim que as tecnologias de informação vão ficando mais acessíveis, estáveis e capazes as mudanças vão acontecendo sucessivamente. Com uma adaptação das empresas e fábricas destas tecnologias aos seus processos produtivos, garantindo que as estruturas empresarias estão sempre atualizadas e balizadas tecnologicamente com o mercado e com os seus concorrentes [27].

A indústria 4.0 faz parte de uma mudança do meio industrial para um mundo altamente conectado e em constante partilha de informações. Dessa forma são introduzidos novos conceitos como a internet das coisas, internet dos serviços, internet da informação e internet das pessoas. A introdução destes conceitos e das novas tecnologias que lhes são

intrínsecas na indústria promovem a emergência do conceito, como redes de fornecimento energéticas inteligentes, sistemas de mobilidade, sistemas de logística inteligentes, uma monitorização constante dos negócios, comunicação rápida e eficaz de toda a estrutura laboral e a sua rede de fornecimento.

A indústria 4.0 é movida por um conjunto de novas tecnologias que trazem mudanças em vários ramos da atividade industrial e nos seus quadros de recursos humanos. De acordo com a definição a revolução industrial traz alterações tecnológicas e sociais [28].



Figura 2.18 - Grande variedade de novas tecnologias na procura da criação de valor às empresas [3]

Com o desenvolvimento de novas tecnologias é comum o aparecimento de máquinas e equipamentos que potencializam a substituição da mão-de-obra humana em tarefas por equipamentos. Este cenário é muitas vezes visto como uma ameaça para a sociedade e muitas instituições socioeconómicas e políticas demonstram uma posição que entra em discórdia com a evolução de novas tecnologias e as potencialidades económicas e técnicas que elas transferem para as empresas [28].

A indústria 4.0 pode ser dividida em quatro características principais.



Figura 2.19 – Quatro principais Características da Indústria 4.0

Vertical Networking: uma estrutura vertical é a completa digitalização dos processos produtivos, logísticos, de qualidade do produto, de manutenção e de apoio à gestão de produção. Toda a informação produzida sobre os processos operacionais estão integrados numa rede conectada e disponíveis em tempo real [27].

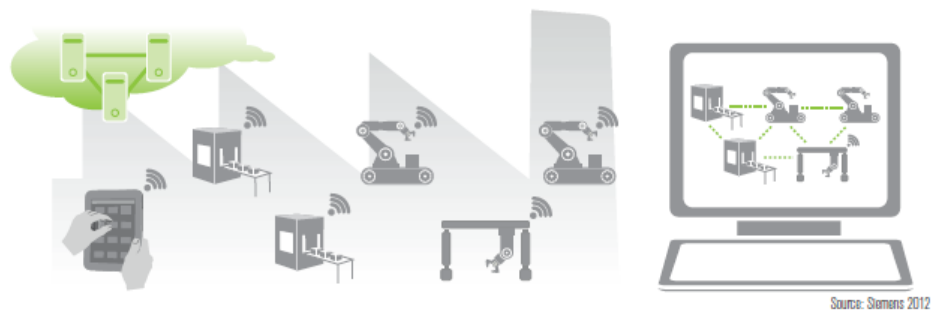


Figura 2.20 – Integração Vertical e rede de sistemas industriais [29]

Integração Horizontal: a integração horizontal estende-se para além das operações internas. É a definição atribuída a uma nova geração da cadeia de criação de valor do produto, onde são incluídos os parceiros de negócio, fornecedores e clientes. Um novo modelo de negócio e cooperação à escala global. Estão inerentes a este processo a integração de sistemas digitalizados de gestão e monitorização da cadeia de aprovisionamento de produtos e materiais em tempo real [27].

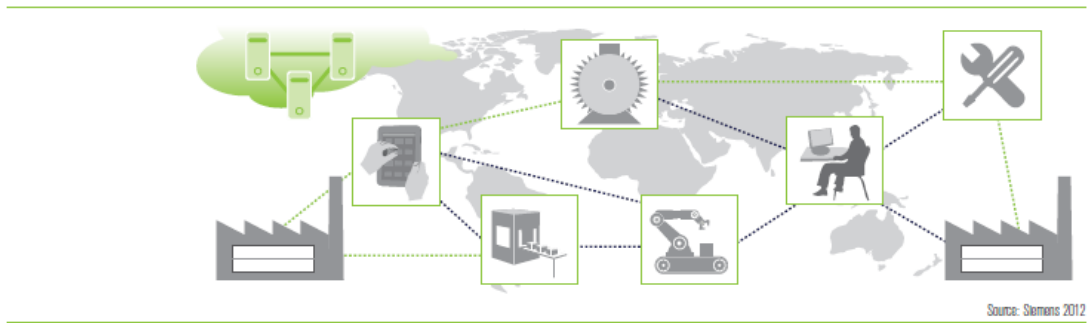


Figura 2.21 – Integração horizontal pela rede de valor [29]

Engenharia e Modelos de negócio digitais e acesso do consumidor: oferecer acesso ao produto através da engenharia e de toda a sua cadeia de fornecimento e produtiva, garantindo todo o acompanhamento ciclo produtivo do produto. Os produtos e serviços digitais são desenvolvidos para servir os consumidores com soluções completas num distinto ecossistema digital. Estes modelos de negócio estão geralmente focados em gerar receitas digitais adicionais e a otimizar a interação e o acesso dos consumidores [27].

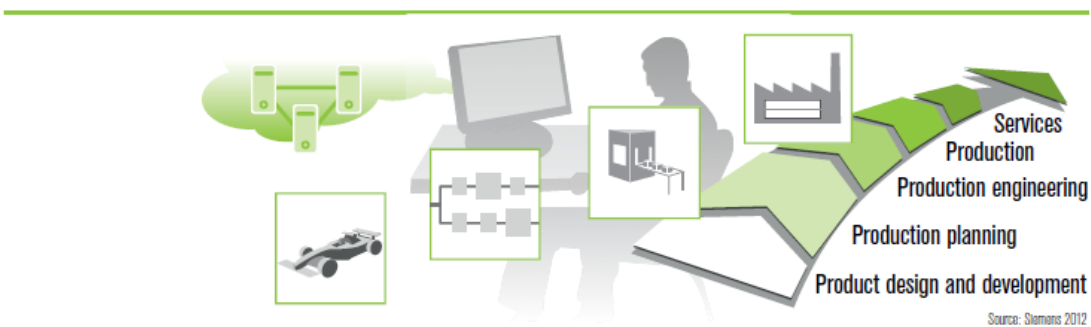


Figura 2.22 – Acompanhamento da Engenharia em toda a cadeia de valor [29]

Novas Tecnologias: Não será um novo termo, mas o aceleração industrial através de novas tecnologias capacitou a produção de produtos para as necessidades do mercado a baixo custo e o poder da computação cresceu massivamente [27].

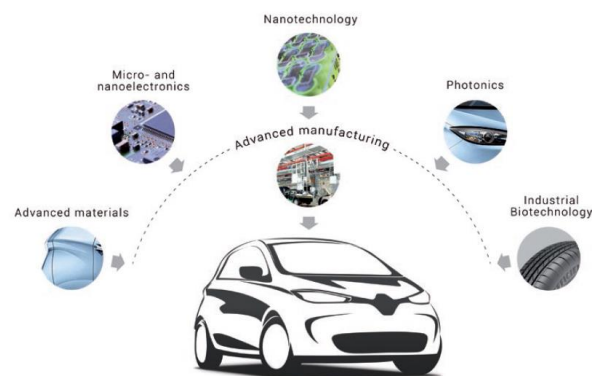


Figura 2.23 – Novas tecnologias potenciadoras de sistemas produtivos avançados [2]

Podemos referir cinco áreas onde existirão novas tendências e desenvolvimentos na criação de valor no meio industrial [22].

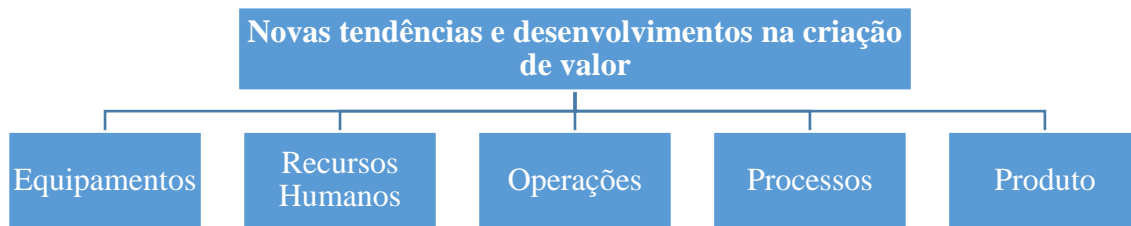


Figura 2.24 - Desenvolvimento e novas tendências por área

1. **Equipamento.** O equipamento associado à indústria irá ser caracterizado pela integração de sistemas altamente automatizados e robots. Os equipamentos serão capazes de se adaptarem com flexibilidade a variações produtivas e realizarem trabalhos em cooperação com seres humanos.
2. **Recursos Humanos.** Muitos trabalhos existentes na indústria têm sido extintos ou têm a possibilidade de virem a ser extintos devido ao crescimento exponencial da automação. Não é previsível que essa tendência seja alterada com a indústria 4.0. Dessa forma, prevê-se que os trabalhos associados à indústria passem por trabalhos altamente especializados de curta duração e tarefas de difícil planeamento e gestão. Os trabalhadores terão de controlar os sistemas automatizados, estarem integrados em estruturas onde os centros de decisão poderão estar descentralizados e participar em tarefas de engenharia de desenvolvimento de produto.
3. **Operacional.** O aumento da complexidade organizacional num sistema industrial não pode ser gerido de um único ponto central. Os centros de decisão irão ser alterados implementando uma política de descentralização. Toda a informação gerada localmente é disponibilizada e considerada para cada decisão. Algumas das posições e decisões irão ser automaticamente efetuadas equipamentos que utilizem sistemas inteligentes e métodos do campo da inteligência artificial.
4. **Processos.** Novas tecnologias de fabrico com base na adição de material como é o caso da impressão 3D irão ter um crescimento despoletado pela criação de valor,

sendo que os custos de produção destas novas tecnologias têm vindo a cair nos últimos anos em contraciclo com os equipamentos que se têm tornado cada vez mais eficientes e eficazes. Isto permitirá o desenvolvimento de produtos mais complexos, resistentes e com geometrias mais leves.

5. **Produto.** Os produtos irão ser produzidos sob pedido do cliente individual e sob todos os seus requisitos. A produção em massa irá ser transformada em customização em massa dos produtos, o que faz com que o cliente final seja integrado na cadeia de valor do produto numa fase inicial.

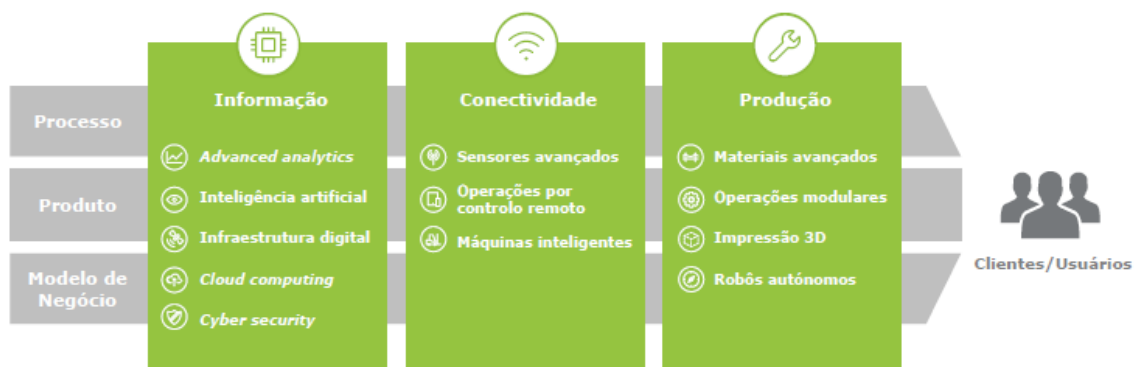


Figura 2.25 – Esquema dos novos processos, produtos e modelos de Negócio espoletados pela Indústria 4.0 [5]

2.6.4. Vantagens, Potencialidades e Expectativas para a Indústria 4.0

A indústria 4.0 também será um passo importante para indústria sustentável. Tornando o impacto ambiental da indústria sob os ecossistemas menor, pois a alocação de recursos necessários para os processos industriais como água, matérias-primas, energia irá acontecer de uma forma mais eficiente [30].

Para além das incontestáveis possíveis melhorias ambientais que a introdução da indústria 4.0 irá lançar, existe uma criação de valor para uma indústria sustentável a três diferentes posições, a nível económico, a nível social e a nível ambiental [30].

De uma forma global os modelos de negócio terão de ser movidos por toda a informação oferecida pelas novas tecnologias colocadas em serviço. Este desenvolvimento deverá ser explorado de forma a que todos os desafios inerentes a um modelo de negócio sustentável sejam integrados. Dessa forma são criadas condições para diminuir o impacto negativo que as empresas têm com o ambiente e com a sociedade, aumentando a sua competitividade a longo prazo [30].

No relatório final emitido pelo grupo de trabalho para o estudo da Indústria 4.0 intitulado “*Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*” são apresentados oito tópicos distintos que traduzem as grandes potencialidades que a nova revolução industrial pode trazer para a indústria [29].

1. **Ir de encontro aos requisitos solicitados pelo Cliente.** A indústria 4.0 permite que os critérios individuais específicos nas diferentes fases do processo industrial sejam respondidos, incluindo áreas como o projeto, configuração, encomendas, planeamento, fases produtivas e o incorporar alterações de última hora. E ainda produzir lotes com baixos volumes e ainda assim serem rentáveis.
2. **Flexibilidade.** A implementação de sistemas ciber-físicos permitem a criação de sistemas dinâmicos em vários aspetos de diferentes processos industriais. Sendo o seguimento e gestão de matérias-primas e de toda a rede de fornecimento sistemático, dessa forma os processos de fabrico tornam-se mais ágeis, podendo sofrer alterações temporárias. Estas alterações podem surgir de aumentos de encomendas de um produto específico.
3. **Otimização da tomada de Decisão.** Para ser competitivo num mercado aberto e global é crucial dispor da maior quantidade de informação possível sobre algo a decidir, mas também é igualmente importante garantir um processo capaz de analisar toda a informação recolhida rapidamente. Dessa forma é garantida a decisão mais sustentada e correta num menor espaço de tempo possível. Sendo a indústria 4.0 alimentada com modelos de negócio *end-to-end*, permite verificações e validações do cliente ao seu produto desde uma fase de projeto até aos processos de fabrico respetivos do produto.
4. **Recurso para a produtividade e eficiência.** Os objetivos dos processos de fabrico continuam-se a aplicar à Indústria 4.0. Ou seja, oferecer a maior diversidade de produtos de um conjunto de recursos (produtividade) e para isso utilizar a quantidade mais baixa de recursos para produzir um dado produto (eficiência). Os sistemas ciber-físicos permitem o ajuste e otimização dos processos de fabrico numa análise caso-a-caso englobando toda a sua rede de valor. E ainda, em vez de existir uma paragem de produção, os sistemas podem ir

otimizando continuamente os processos de fabrico, gerindo melhorias ao sistema como redução de consumo de energia, emissões, etc.

5. **Oportunidade para a criação de valor através de novos serviços.** A indústria 4.0 é a rampa de lançamento de novas formas de criação valor e de emprego. Algoritmos inteligentes podem ser aplicados em grandes quantidades de informação disponível em dispositivos inteligentes de forma a desenvolver melhorias nos processos e na comunicação entre empresas e os seus clientes.
6. **Reorganização demográfica no espaço de trabalho.** Em conjunto com a organização laboral e as iniciativas de desenvolvimento de competências, a colaboração entre seres humanos e sistemas tecnológicos resultará com que as empresas encontrem novas formas de gerir os seus recursos humanos em sua vantagem. Face à escassez de mão-de-obra qualificada e à crescente diversidade da força de trabalho, a Indústria 4.0 proporcionará carreiras profissionais diversificadas e flexíveis que permitirão com que as pessoas continuem a trabalhar e sejam produtivas por mais tempo.
7. **Equilíbrio Vida-Trabalho.** Com modelos organizacionais gerados pelos sistemas CPS as estruturas das empresas serão mais flexíveis. Garantindo atingir um melhor equilíbrio entre a vida pessoal e profissional dos colaboradores. Por exemplo, assistentes de trabalho pessoais inteligentes permitiram a organização de trabalho entre colaboradores de forma aumentar a eficiência da empresa, mas também poder melhorar a vida pessoal dos colaboradores.
8. **Economia competitiva com salários altos.** Uma indústria que se desenvolva como líder na Indústria 4.0 encontra uma estratégia que a coloca como uma indústria de alta eficiência, porém para atingir esta posição são necessários quadros especializados. Com a diminuição de colaboradores de trabalho indiferenciado a média e a crescente necessidade de admitir colaboradores especializados a média salarial praticada na indústria é incrementada.

Tabela 2.4 – Oportunidades na Indústria 4.0 nas cadeias de valor horizontal e vertical [3]

Novos modelos de negócio digitais	<ul style="list-style-type: none"> • Otimização dos processos digitais e performance • Modelo <i>Pay-per-use</i> • Gestão global da plataforma • Análise <i>big data</i> e gestão da <i>performance</i>
Engenharia Digital	<ul style="list-style-type: none"> • Colaboração Digital em I&D • Modelização digital, protótipos e simulações
Integração des operações verticais	<ul style="list-style-type: none"> • E2E gestão ciclo vida do produto • Fábrica Digital • MES • Gestão de ativos avançada
Integração da cadeia de valor horizontal	<ul style="list-style-type: none"> • Centro de controlo da cadeia de valor • Digital sourcing • Logística Smart site • Planeamento da procura e fornecimento
Manutenção inteligente e serviços	<ul style="list-style-type: none"> • Manutenção Preventiva • Engenharia digital integrada • Soluções de Realidade Aumentada
Digital Workplace	<ul style="list-style-type: none"> • E-finance/Controlos • Recursos Humanos Digitais • Partilha de conhecimento interno • Agilidade dos sistemas
Vendas e Marketing digital	<ul style="list-style-type: none"> • CRM Digital • Comércio Omni-channel • Portais self-service • E-payments

A introdução da indústria 4.0 permite obter ganhos diretos nas receitas das empresas, mas também indiretamente com a redução de custos e melhorando a eficiência. A tabela 2.5 expõe as possíveis áreas onde a indústria 4.0 obterá ganhos [3].

Tabela 2.5 – Ganhos de receita, custos e de eficiência com a Indústria 4.0 [3]

Receita adicional proveniente de:	Menor custo e maior eficiência a partir de:
Digitalização de produtos e serviços dentro do atual portfólio	Controlo de qualidade em tempo real, baseado na análise de dados
Novos produtos serviços e soluções digitais	Conceitos de produção modular, flexível e adaptável pelo cliente
Oferta de big data e análise como um serviço	Visibilidade, em tempo real, da variância dos processos e produtos, realidade aumentada e otimização através da análise de dados
Produtos personalizados e customização em massa	Manutenção preditiva dos ativos-chave através da utilização de algoritmos preditivos para otimizar os períodos de reparação e manutenção e melhorar a disponibilidade dos mesmos
Obtenção de maiores margens através de uma melhor visão do cliente, a partir da análise de dados	Integração vertical de sensores, através de MES (<i>Manufacturing execution systems</i>) para a produção em tempo real, procurando a otimização da utilização da máquina e a redução dos tempos de produção
Aumento da quota de mercado nos principais produtos	Integração horizontal, bem como <i>track-and-trace</i> de produtos para melhorar o desempenho do inventário e reduzir a logística necessária
	Digitalização e automatização de processos para uma utilização mais inteligente dos recursos humanos e de maior velocidade nas operações
	Planeamento, em tempo real, do sistema <i>end-to-end</i> e colaboração horizontal através do uso de plataformas de planeamento, para otimização da execução
	Aumento da escala de participação dos produtos básicos de mercado

Pode-se concluir que um fator chave para uma empresa ser competitiva é a sua flexibilidade, em causa estão os mercados cada vez mais voláteis e com alterações a longo prazo. Esta volatilidade do mercado é refletida num aumento flutuações de encomendas, prazos de entrega exigidos mais curtos e uma impossibilidade de fazer uma programação

de produção a longo prazo. Numa perspetiva tradicional do mercado para se ser competitivo é necessário responder a três elementos chave, prazos de entrega baixos, alta produtividade com custos controlados e uma qualidade ótima. A estes três elementos chaves é adicionado mais um, a flexibilidade produtiva [31].

O paradigma de tornar a indústria capaz de ser altamente flexível parece ser a resposta para a volatilidade dos mercados atuais. Não sendo apenas importante conseguir produzir num prazo curto, mas também ter capacidade de dar respostas rápidas ao cliente sobre o seu produto e a produção do mesmo [31].

A indústria Alemã tem vindo a aplicar modelos para tornar-se mais flexível. Isto significa obter regulação que permita uma fácil contratação e despedimento de colaboradores, consolidar uma cadeia de fornecimento altamente responsiva e estabelecer uma estrutura sob princípios da gestão *Lean*. A utilização de sistemas de emprego flexível na Alemanha tem sido bastante utilizada, com seis a cada dez empresas a recorrerem a esse tipo de emprego [31].

2.7. Panorama da Manutenção na Indústria

2.7.1. Evolução da Manutenção

Hoje em dia para que uma empresa seja competitiva e o seu negócio seja sustentável necessita de se capitalizar da melhor forma [32]. As empresas aplicam políticas de melhoria continua para que os seus sistemas de produção sigam modelos de gestão *lean*, tornando-se mais competitivas. De uma forma semelhante as empresas promovem iniciativas, como a metodologia *Total Productive Maintenance*, para que consigam atingir a excelência na sua manutenção e fiabilidade.

Nos últimos anos a manutenção tem sido consecutivamente estudada, ganhando assim um novo interesse e significado no meio industrial. A manutenção passou de um campo que era abordado com pouco interesse por ser visto como um custo inerente à estrutura industrial e sem criação de valor, para um investimento com um impacto positivo na organização. A melhoria dos sistemas de manutenção provou ser capaz aumentar a qualidade do produto, aumentar a disponibilidade dos equipamentos e por sua vez a produção.

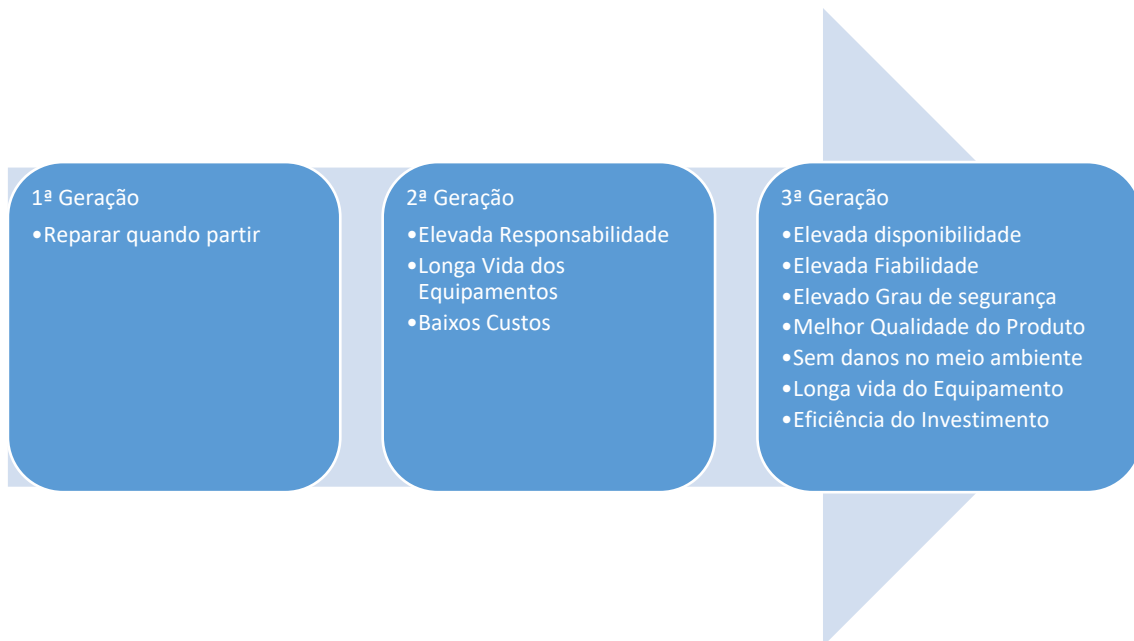


Figura 2.26 - Evolução dos sistemas administrativos e de gestão, adaptado [33]

A posição da manutenção mudou para um suporte ao crescimento da competitividade. Não podendo limitar a sua função a ser reativa a emergências e deixando-se dominar pelos problemas [32].

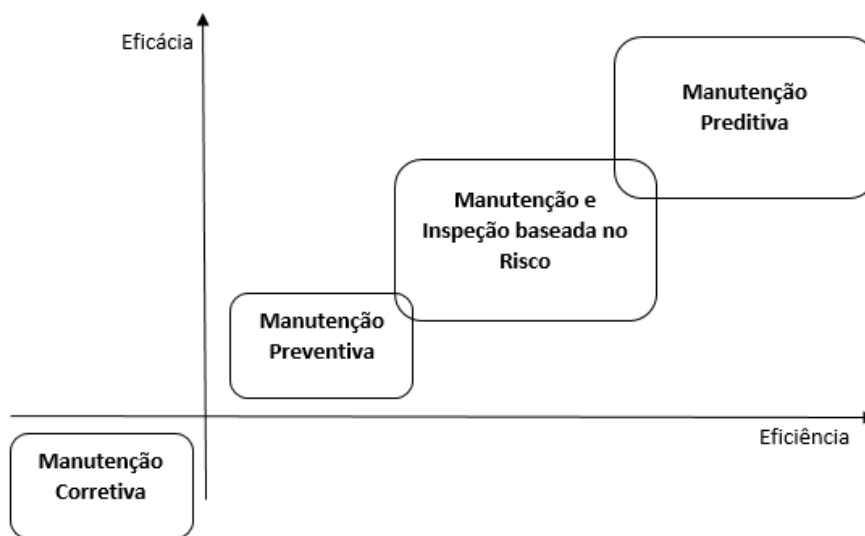


Figura 2.27 - Eficácia e Eficiência dos diferentes modelos de manutenção

Nas últimas duas décadas as atividades da manutenção foram ganhando um envolvimento com as novas tecnologias de informação cada vez mais expressivo [34]. Com a garantia que estão disponíveis os sistemas, infraestruturas, processos e procedimento adequados e que estes são corretamente executados é possível assegurar que as perdas são minimizadas, as operações tornam-se estáveis, a capacidade produtiva irá aumentar e o produto final terá uma maior qualidade [32]. A otimização com base em simulações tem

mostrado um grande potencial em apoiar as equipas e gestores de manutenção em tomar as decisões mais acertadas em sistemas de manutenção complexos [35].



Figura 2.28 - Desenvolvimento da Eficiência da Manutenção [36]

2.7.2. Função da Manutenção

Segundo a Norma Portuguesa NP EN13306 a definição de manutenção é, a combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo num estado em que pode desempenhar a função requerida [37]. A mesma norma define a gestão de manutenção como, todas as atividades de gestão que determinam os objetivos, a estratégia e as responsabilidades respeitantes à manutenção e que os implementam por diversos meios tais como o planeamento, o controlo e supervisão da manutenção e a melhoria de métodos na organização, incluído aspetos económicos [37].

2.8. Tipos de Manutenção

Não existe uma unanimidade em relação aos tipos de manutenção existentes entre autores, existindo maiores ou menores categorias e subdivisões na manutenção de autor para autor.

Cada empresa deverá adequar os gerir a sua manutenção e a forma como a mesma atua de acordo com os objetivos da direção da empresa. Dessa forma, é essencial conhecer os

equipamentos, as condições de aplicação de cada método, assim como os custos de manutenção e os custos de quebra de produção [37].

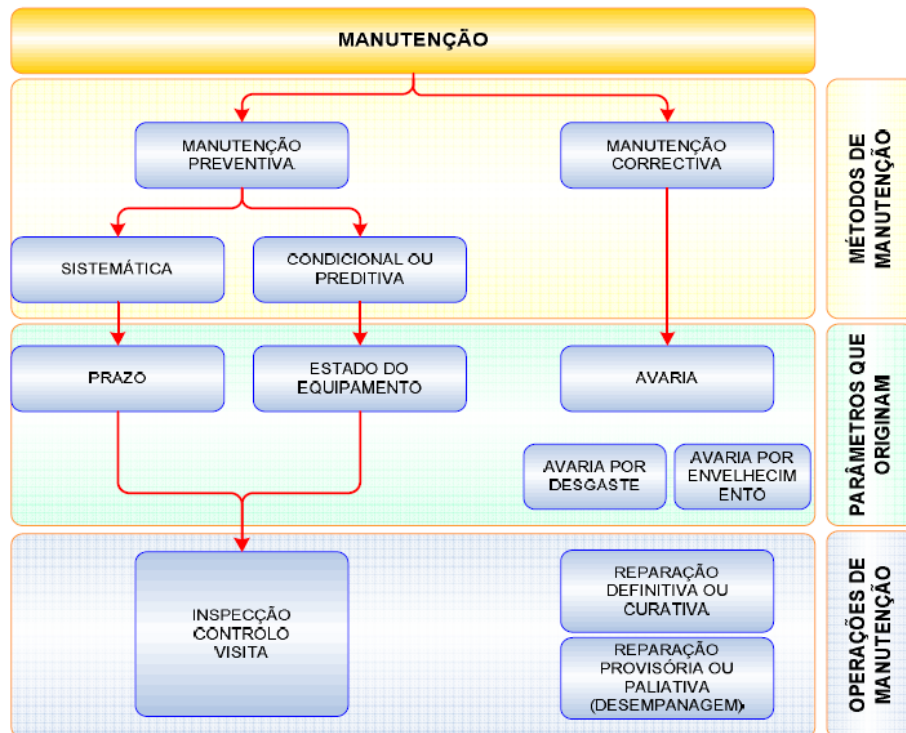


Figura 2.29 – Tipos de Manutenção [36]

2.8.1. Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva define-se pela manutenção efetuada depois da deteção de uma avaria e destinada a repor um bem num estado em que pode realizar uma função requerida [37].

Assim sendo é a manutenção que se efetua após a ocorrência de uma avaria, considerando a avaria como a alteração ou cessação da capacidade do equipamento realizar a função para que foi especificado. A avaria pode ser parcial ou total. Parcial se há apenas uma alteração na capacidade de realizar a função e total se há a cessação dessa mesma capacidade [38].

2.8.2. Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva é efetuada a intervalos de tempo pré-determinados, ou de acordo com critérios prescritos, com a finalidade de reduzir a probabilidade de avaria ou degradação do funcionamento de um bem. [37]

O principal objetivo deste da manutenção preventiva é evitar que ocorram avarias aos equipamentos que se encontram a funcionar, desde que em termos financeiros seja mais favorável do que deixar que a avaria ocorra. Dessa forma é possível aumentar a duração da vida dos materiais, diminuir a probabilidade das avarias em serviço, diminuir os tempos de imobilização em caso de revisão ou avaria, evitar e prever intervenções de manutenção corretiva, permitir decidir sobre a manutenção corretiva nas melhores condições, diminuir o consumo de energia, evitar a degradação da qualidade da produção, diminuir os custos de manutenção e suprimir causas de acidentes graves [38].

Na manutenção preventiva sistemática são definidos intervalos de tempo em que são executadas operações de manutenção. Dependendo dos intervalos definidos, a manutenção preventiva pode resultar num aumento significativo das inspeções e manutenções programadas. A manutenção preventiva também reduz a frequência e a gravidade das falhas não planeadas dos equipamentos com padrões de desgaste definidos, relacionados à idade [39].

2.8.3. Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva é definida como a manutenção condicionada efetuada de acordo com as previsões extrapoladas da análise e da avaliação de parâmetros significativos da degradação do bem [37], ou seja, este tipo de manutenção é a monitorização da condição avaliando o estado real dos equipamentos com recurso a equipamentos específicos promovendo dessa forma intervenções de manutenção nos equipamentos apenas quando são alcançados os limites aceitáveis definidos.

Existem vários de métodos para avaliar a condição de sistemas e equipamentos, com a finalidade de determinar o melhor agendamento para executar a manutenção. A tabela 2.6 expõe as tecnologias atualmente utilizadas para a monitorização do estado de equipamentos.

Estas tecnologias/técnicas incluem métodos intrusivos e não intrusivos e o uso de parâmetros de processo para determinar a condição geral do equipamento. Os dados adquiridos permitem uma avaliação da degradação do desempenho do sistema e do equipamento a partir da condição requerida [39].

Tabela 2.6 – Técnicas de Manutenção Preditiva por Equipamentos [39]

Tecnologias/ Aplicações	Bombas	Motores Elétricos	Geradores Diesel	Disjuntores	Permutadores de Calor	Sistemas Elétricos	Válvulas	Transformadores	Tubagens e Tanques
Análise de vibrações	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Análise de partículas/ lubrificação	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Sim	Não
Monitorização do desempenho	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Não	Sim	Não
Análise por ultrassons	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Termografia infravermelha	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
Inspeção visual	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

2.8.3.1. Análise de Vibrações

A análise de vibrações é relevante na avaliação do estado dos equipamentos mecânicos e tem como característica a capacidade de detetar a degradação gradual dos equipamentos num ponto inicial antes de os mesmos se tornarem críticos.

A análise de vibrações aplica-se em equipamentos rotativos tais como turbinas a gás, bombas, motores, compressores, máquinas de produção de papel ou caixas redutoras.

Vários problemas mecânicos, como desalinhamentos, geram uma vibração apenas numa frequência, tornando possível a análise da vibração do equipamento e a identificação do problema e as respetivas tarefas corretivas necessárias para reparação do equipamento.

Dois dos componentes essenciais na análise do sinal de vibração são a amplitude e a frequência. A amplitude é o “tamanho” do sinal de vibração e depende da magnitude da força de excitação, da massa e rigidez do sistema e do seu amortecimento. A amplitude, tanto em deslocamento, velocidade ou aceleração, é indicadora de gravidade. A frequência é o número de vezes que um evento ocorre num certo período de tempo. Através da frequência é possível identificar potenciais falhas em equipamentos, pois

muitas dessas falhas ocorrem sempre na mesma frequência, sendo assim simples encontrar a causa da falha e definir as medidas de correção adequadas [40].

A Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transformation*, FFT) é um dos métodos utilizados para estudar a vibração de um equipamento é a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Com a utilização da FFT a vibração é exibida em forma de espectro, designado espectro de frequências [41].

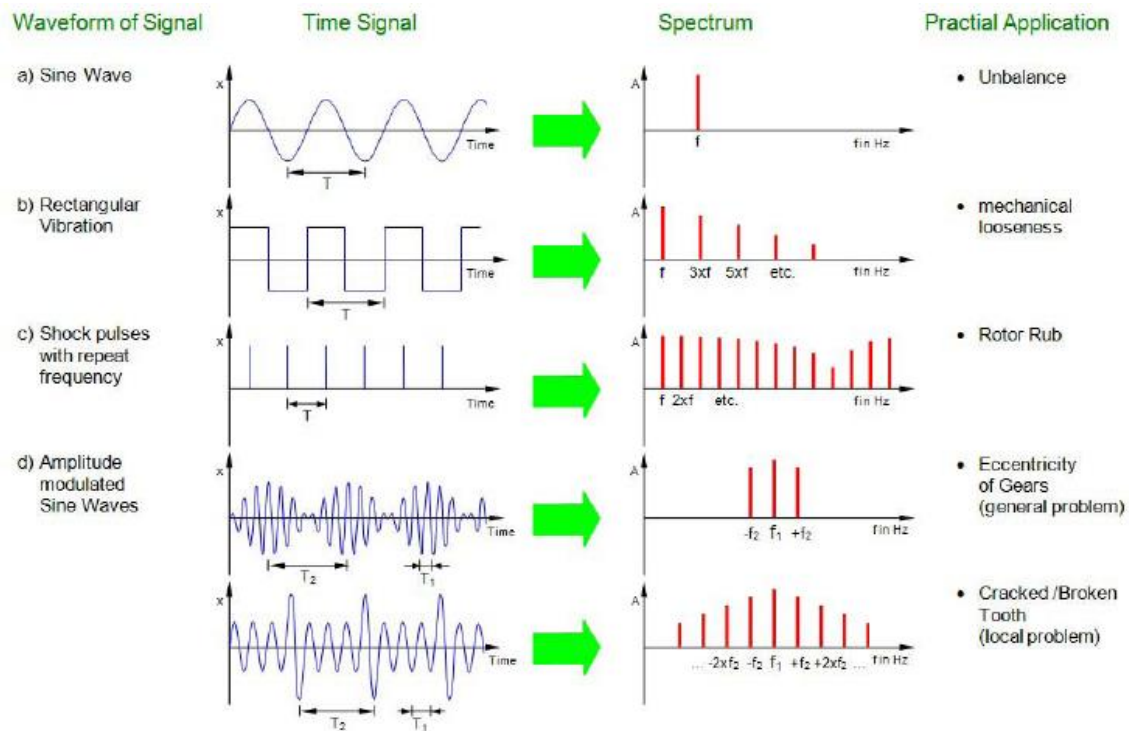


Figura 2.30 - Sinal de vibração típico por tipo de defeito mecânico [40]

Para garantir o desempenho adequado dos sensores de vibração é necessária uma análise de todo o sistema para que sejam assegurados antecipadamente que os sinais de vibração estão dentro de vários constrangimentos. Para a seleção de transdutores é necessário conhecer: a gama de utilização, sensibilidade, frequência (ou tempo de resposta), compatibilidade com o meio ambiente, precisão, características elétricas, condições de aplicação e a robustez [42].

2.8.3.2. Análise de Partículas/Lubrificação

A análise de partículas é uma técnica de análise que determina o estado dos lubrificantes utilizados em equipamentos mecânicos e elétricos. Estas análises de lubrificantes

fornecem dados quantitativos de elementos químicos, tanto de aditivos do lubrificante como de contaminantes presentes no óleo [32].

Até recentemente, a análise tribológica era um processo lento e caro. As análises eram conduzidas utilizando técnicas de laboratório tradicionais e obrigavam um trabalho demorado e complexo. Atualmente devido ao incremento da capacidade de computação e microprocessadores estão disponíveis sistemas automáticos de análises de óleos lubrificantes e análises espectrográficas, reduzindo significativamente o tempo e o custo das análises [32].

Os três grandes objetivos para a análise de óleos lubrificantes são o controle de qualidade do lubrificante, a redução de inventário de lubrificante e a determinação do intervalo ótimo para a troca do fluido lubrificante. Os resultados desta análise podem determinar se o óleo cumpre os requisitos de lubrificação do equipamento ou da aplicação. E assim proceder à reposição dos lubrificantes ou à sua atualização para atingir requisitos funcionais específicos [43].

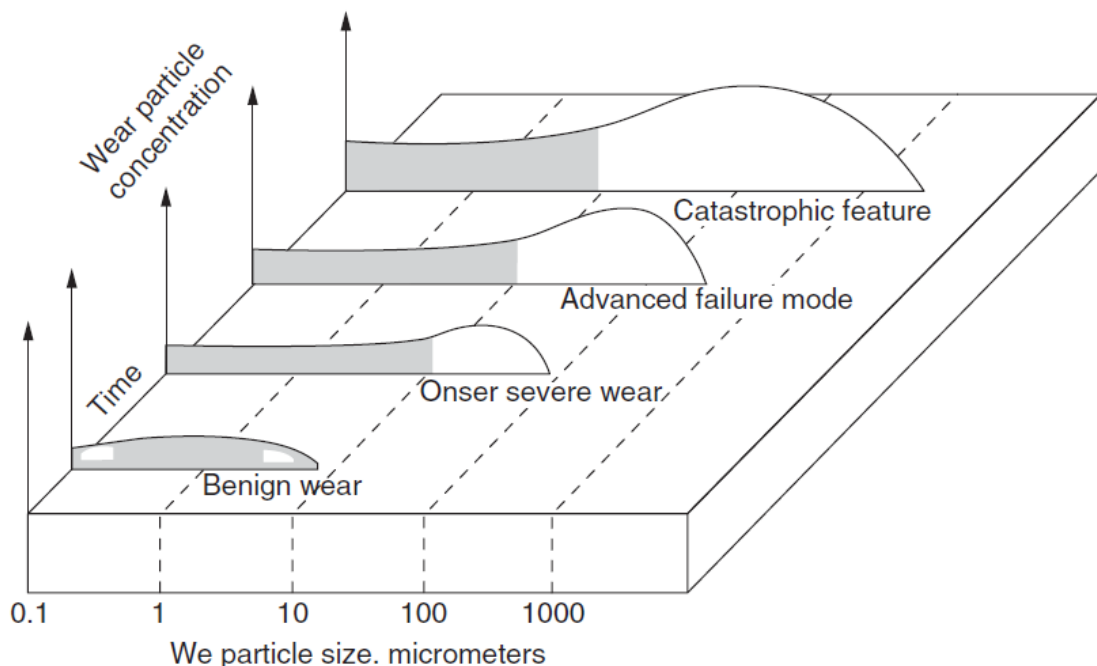


Figura 2.31 - Distribuição da dimensão de partículas versus estado do equipamento [32]

Esta técnica ainda tem limitação para que o seu desenvolvimento seja mais acentuado, o investimento necessário fazer em equipamento de análise, o custo constante na recolha de amostras e ainda a dificuldade de obter amostras que sejam representativas do estado real do óleo lubrificante [43].

2.8.3.3. *Análise por Ultrassons*

O método de manutenção preditiva por ultrassons baseia-se na emissão de sons de elevada frequência, acima do limite audível ao ouvido humano, na superfície do equipamento que se pretende verificar. O som emitido provoca a vibração mecânica nos equipamentos, vibração que depende da frequência e amplitude da excitação provocada, do material, geometria e massa dos componentes [43].

No caso de existirem fissuras ou poros no material, o sinal recebido é distorcido, pois a velocidade de propagação do som através do ar existente em vazios é menor. Assim é necessário um bloco de material padrão, que seja representativo da superfície, para que se consiga efetuar uma comparação entre o sinal recebido da superfície a analisar com a isenta de defeitos [32], [43].

A análise por ultrassons é uma técnica que exige da equipa de manutenção conhecimento e experiência para que seja feita a correta avaliação do estado do equipamento.

Este método é aplicável à deteção de defeitos, mas também à medição de espessura de peças. Essa técnica permite obter informações como a dimensão dos defeitos e a profundidade a que se encontram.

2.8.3.4. *Análise Termográfica*

O principal princípio de funcionamento da análise termográfica é a que qualquer material emite radiação acima do zero absoluto. A intensidade da radiação infravermelha de um objeto é função da sua temperatura à superfície [32]. Porém, a medição de temperatura utilizando métodos de termografia é complexa devido a existirem três fontes de energia térmica possíveis: a energia emitida pelo objeto, a energia refletida no objeto e a energia transmitida pelo objeto. No caso da termografia apenas a energia emitida pelo objeto é que é relevante para a manutenção preditiva, sendo as restantes fontes de distorção das medições. Dessa forma para determinar a temperatura de uma superfície é necessário subtrair à energia emitida, as energias refletidas e transmitidas [43].

A inspeção e análise termográfica têm como objetivo identificar e documentar problemas em equipamentos elétricos ou mecânicos, ou seja, detetar elevadas temperaturas e acréscimos de temperatura nos sistemas.

Nos equipamentos mecânicos a análise termográfica é aplicável a sistemas rotativos, utilizando o calor gerado pela fricção e desgaste dos componentes para verificar o seu estado de degradação [44].

Nos equipamentos elétricos o problema predominante é o aumento da resistência elétrica, que é traduzido pelo aumento de temperatura no local. Este fenómeno pode se dar devido a conexões elétricas soltas, oxidadas ou corroídas [32].

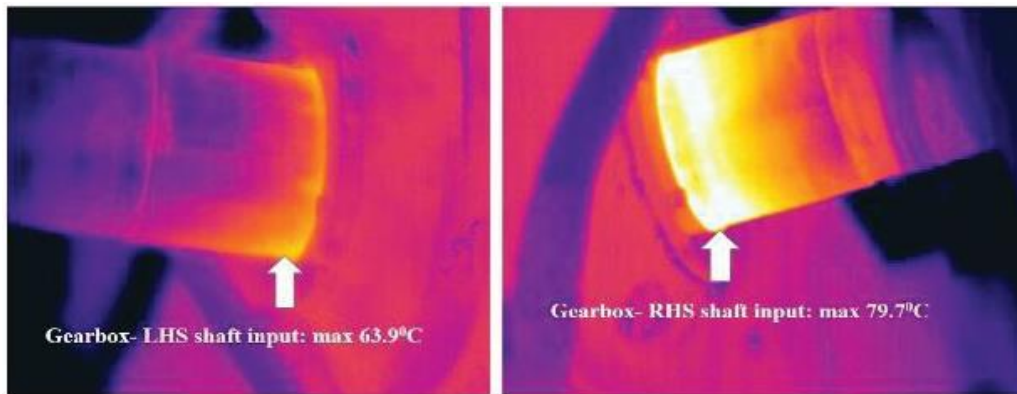


Figura 2.32 - Análise termográfica da entrada de um veio numa Caixa Redutora [44]

A técnica termográfica mais comum na indústria é a comparação termográfica, sendo esta qualitativa ou quantitativa. Sendo a análise quantitativa mais aprofundada, pois exige a medição das temperaturas e os resultados são analisados e guardados, os parâmetros que se considerem relevantes são anotados e registados para análises posteriores. Após o ensaio toda a informação recolhida deve ser enviada para *softwares* de análise da especialidade, como o FLIR TOOLS, e posteriormente interpretada [32].

A monitorização de equipamentos através de análise termográfica exige a definição de critérios para a avaliação desta análise. O critério mais comum é a diferença entre a temperatura nominal ideal do equipamento a operar e a temperatura do equipamento em laboração. Deverão ser incluídas variáveis como a temperatura do ar ambiente e a temperatura máxima admissível do componente ou equipamento. Este método pode evoluir e sofrer algumas alterações com o avanço do histórico de funcionamento do equipamento [43].

Não sendo a termografia uma substituta da análise por vibrações, a utilização das duas técnicas em simultâneo aumenta a capacidade de uma manutenção preditiva com sucesso, dessa forma as duas técnicas complementam-se.

2.9. Modelos de Manutenção

2.9.1. Manutenção e Inspeção Baseada no Risco

Com os novos desafios e os mercados cada vez mais exigentes a gestão da manutenção moderna tem procurado minimizar os seus custos e manter as instalações e componentes seguras. Assim surge o RBIM (*Risk-Based Inspection and Maintenance*), concebido numa primeira fase pela e para a indústria petroquímica, e com o principal objetivo de gerir esforços num programa de inspeção. Nesta metodologia o risco é analisado tendo em consideração a probabilidade de falha e as suas consequências, se o risco for inaceitável então é recomendável uma ação de mitigação de modo a prevenir ou prever o evento (inspeção).

O RBIM é um método de gestão de risco, que foi iniciado em maio de 1993 pelo *American Petroleum Institute*, com o apoio de várias indústrias, onde constavam nomes como *ARCO, BP, Chevron, Dow Chemical, DNO Heather; DSM Services, Equistar Exxon, Fina, Koch, Marathon, Mobil, Petro-Canada, Phillips, etc* [45].

No método RBIM o objetivo é a priorização e gestão de esforços num programa de inspeção. Num sistema em funcionamento uma percentagem relativamente elevada do risco está associada a uma pequena percentagem de itens do equipamento. O RBI e RBIM permitem alocar os recursos de inspeção e de manutenção para proporcionar um nível de cobertura sobre os itens de alto risco, e adequar o esforço aos equipamentos de menor risco [45]. Com a aplicação do método RBI deverá ser possível fazer:

- Classificação do risco de todos os equipamentos analisados;
- Descrição detalhada do plano de inspeção;
- Descrição de outras atividades de redução do risco;
- Níveis de risco esperados de todos os equipamentos analisados e outras atividades de mitigação do risco a serem implementadas;

2.9.1.1. Inspeção

De acordo com a Norma Portuguesa, NP EN 13306:2007, a inspeção define-se como “controlo de conformidade realizado através de medições, observações, testes ou calibrações das características significativas de um bem” [37].

2.9.1.2. *Definição de Risco*

De acordo com a Norma de Portuguesa NP 4410:2004 – Sistemas de Gestão da Segurança e Saúde do Trabalho, o risco pode ser definido como, “A combinação da probabilidade e das(s) consequência(s) da ocorrência de um determinado acontecimento perigoso” [46]. Ou seja, o risco é a combinação da probabilidade de ocorrência e pela consequência dessa situação potencialmente perigosa.

A metodologia RBIM analisa o risco tendo em consideração a probabilidade de falha e as consequências de falha, que são combinadas numa matriz, designada como matriz de risco. A probabilidade de falha (PoF) é a frequência da ocorrência de um determinado acontecimento por ano, que pode ser avaliada qualitativamente ou quantitativamente. A consequência de falha (CoF) é o resultado de um acontecimento ou ocorrência. As consequências podem afetar diferentes áreas como a saúde, a segurança, o ambiente e a economia. Como a probabilidade de falha a consequência de falha pode ser avaliada qualitativamente ou quantitativamente.

O risco obtém-se da seguinte expressão:

Risco = Probabilidade de Falha x Consequências da Falha [46]

Os principais objetivos da análise de risco no âmbito da RBI são:

- Identificar o equipamento onde um defeito pode causar o aumento da possibilidade de acidente;
- Determinar o âmbito do esquema de avaliação do procedimento adotado;
- Especificar o equipamento para a avaliação segundo um procedimento;
- Identificar a causa e os mecanismos de degradação;
- Estabelecer os intervalos de inspeção para o primeiro e subsequentes avaliações;
- Selecionar a técnica de inspeção mais indicada;

2.9.1.3. *Análise de Risco*

O *Risk-Based Inspection*, ou Inspeção Baseada no Risco, é uma avaliação do risco direcionada para as consequências relacionadas com a Saúde, Segurança e Ambiente. Na Manutenção Baseada no Risco (RBM), a avaliação é mais direcionada para as consequências e os seus impactos nos âmbitos económicos e financeiros. Simplificando, pode-se dizer que a RBIM, Inspeção e Manutenção Baseada no Risco é a junção dos dois métodos.

Na análise de risco, identificam-se os perigos bem como os modos de degradação e os modos de falha relevantes. É neste passo que se determina as CoF (consequência de falha) e as PoF (probabilidade de falha) e o consequente risco.

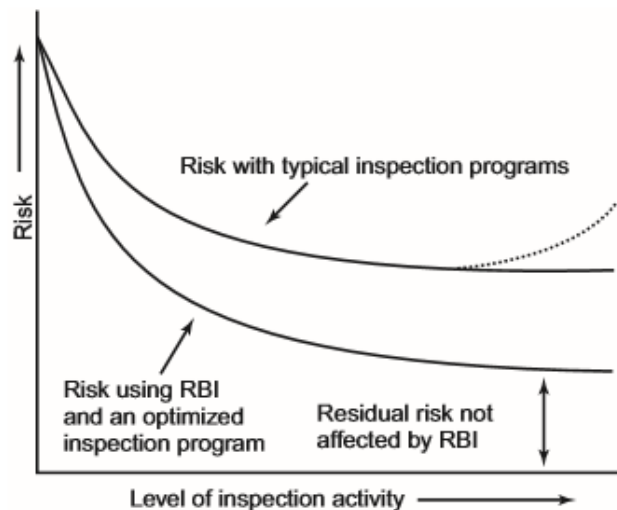


Figura 2.33 - Gestão de Risco utilizando a metodologia RBI [45]

2.9.1.4. *Análise Qualitativa*

Este método de análise é bastante simples e fácil de aplicar, mas necessita de pessoas com conhecimentos e competências bastante desenvolvidas, pois utiliza a experiência e o julgamento como base para a determinação da probabilidade de falha e as consequências da falha. Os itens analisados apenas precisam de ser categorizados em amplas faixas ou classificados em relação a uma referência. Neste método é importante definir regras para a categorização e classificação terem coerência [45].

A análise qualitativa baseia-se nos seguintes procedimentos:

- Listar os sistemas e componentes;

- Identificação dos cenários de acidente envolvendo a falha do equipamento;
- Identificação dos mecanismos e modos de falha de uma potencial degradação;
- Determinar a probabilidade de falha de cada equipamento;
- Avaliar as consequências resultantes da falha do equipamento;
- Determinação do risco da falha do equipamento;
- Categorização e Classificação do risco;

2.9.1.5. *Análise Quantitativa*

Antes de uma análise quantitativa é essencial fazer a análise qualitativa. Assim depois de uma análise em amplas faixas da Probabilidade de Falha e da Consequência de Falha, deve-se proceder uma avaliação quantitativa do risco, onde se atribuem valores de custos numéricos para a Consequência da Falha.

Na metodologia RBI quantitativa os modelos são analisados estatisticamente com o objetivo de fornecer cenários quantitativos e qualitativos sobre o nível do risco. Neste método as informações e dados são trabalhados em análises quantitativas, mas é importante que a caracterização qualitativa seja mais detalhada e conservadora, pois este é um método com um maior detalhe.

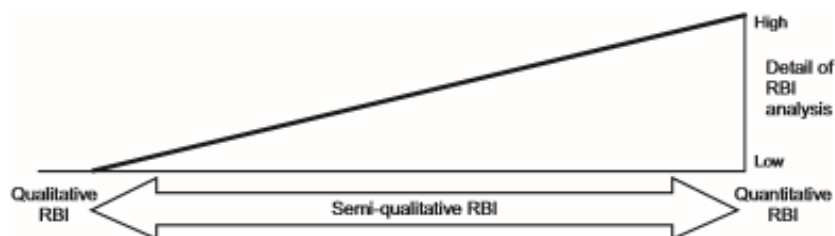


Figura 2.34 - Diferentes abordagens no RBI [45]

2.9.1.6. *Matriz de Risco*

A matriz de risco é uma forma fácil e eficaz de apresentação de resultados, assim conseguir mostrar a distribuição de riscos para as diferentes componentes numa unidade de processo.

A matriz de risco está organizada para que os componentes de maior risco se encontrem no canto superior direito e os de menor risco no canto inferior esquerdo. Tem no eixo das abcissas o Impacto do acontecimento e no eixo das ordenadas a Probabilidade do Acontecimento. Assim os equipamentos que se situarem no canto superior direito terão uma maior prioridade de inspeção, pois são considerados componentes de risco alto. Da forma oposta acontece com os equipamentos que se situem no canto inferior esquerdo, considerados equipamentos de risco baixo. Depois da realização da avaliação é necessário proceder à aceitação do risco, que se deve basear em princípios definidos.

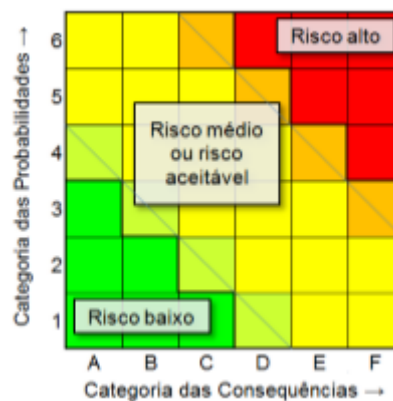


Figura 2.35 - Exemplo de uma matriz de risco utilizando a probabilidade de falha e categorias de consequências para evidenciar os diferentes níveis de risco

Ao aplicar-se uma estratégia RBIM é essencial compreender os valores dos critérios específicos de aceitação. O limite de risco admissível é definido como o nível de risco aceitável, para fins de planeamento da inspeção [47].

A especificação do risco admissível é um encargo da pessoa responsável pelo equipamento/instalação. Um risco admissível pode ser desenvolvido com base em diretrizes internas do proprietário ou do operador para tolerância a risco. Existem vários tipos de riscos com diferentes critérios entre eles, riscos de segurança, riscos ambientais e risco financeiros.

Estes critérios de risco devem ser usados quando se tomam decisões baseadas em modelos RBIM, em cada empresa terá critérios distintos em termos de níveis de risco aceitável e assim as decisões de gestão de risco podem variar.

2.9.1.7. Programação de Inspeções

A estratégia de inspeção deve ser um processo iterativo para assegurar que as atividades são continuamente focadas, e, que os riscos são efetivamente reduzidos com as atividades implementadas.

Na figura 2.36 o processo RBIM é ilustrado num diagrama de blocos. Resumindo as diferentes fases do processo e a sua constante atualização.

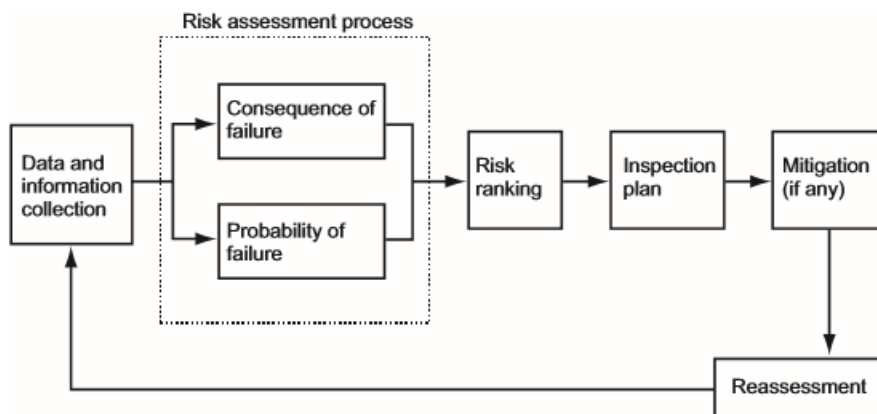


Figura 2.36 - Processo de planeamento no RBI [45]

A matriz de risco é uma forma fácil e eficaz de apresentação de resultados, assim conseguir mostrar a distribuição de riscos para as diferentes componentes numa unidade de processo.

A inspeção de um equipamento só será eficaz se a técnica usada for capaz de detetar o mecanismo ou componente em deterioração e a sua severidade. Uma aplicação correta das atividades de inspeção melhorará a capacidade do utilizador para prever os mecanismos de deterioração e taxas de deterioração associadas ao processo. Quanto melhor for a capacidade de prever menor será a incerteza de quando ocorrerá uma falha. Assim, as atividades de redução do risco podem ser feitas antes da altura em que a falha seja previsível.

A estratégia de inspeção deve ser um processo iterativo para assegurar que as atividades são continuamente focadas, e, que os riscos são efetivamente reduzidos com as ações implementadas.

2.9.1.8. Atividades de Redução de Custos

A aplicação da avaliação do risco em planos de manutenção permite determinar o que inspecionar, como inspecionar, e, a extensão da inspeção. Se os riscos após a inspeção forem considerados inaceitáveis, torna-se necessário proceder à sua mitigação. Como atividades de redução de risco podem-se mencionar:

- Reparação/Substituição, ou seja, quando o equipamento chega a um estado onde o risco de falha não pode ser gerido até um nível aceitável, a reparação /substituição é a única maneira de reduzir o risco;
- “*Fitness for Service*”, este conceito permite a avaliação das falhas para determinar a aptidão para o serviço. Este procedimento determina se o equipamento continua apto para executar as suas funções, em que condições e durante quanto tempo, com as falhas determinadas na inspeção. O “*Fitness for Service*” pode também ser usado para determinar qual a extensão das falhas, e, determinar inspeções futuras, que obrigam à reparação ou substituição do equipamento [45];
- *Retrofit*, ou seja, modificação da conceção/projeto do equipamento. A modificação do equipamento em projeto pode permitir a redução da probabilidade de falha;
- Modificação dos parâmetros de operação, em certos casos, consegue-se diminuir a consequência e a probabilidade de falha, alterando-se as próprias condições de operação para condições menos perigosas;

2.9.2. TPM - Total Productive Maintenance

Historicamente a primeira referência e desenvolvimento inicial da metodologia TPM foi dada nos Estados Unidos pela General Electric Corporation. No ano de 1953, após o termo da segunda Guerra Mundial o Japão encontrava-se derrotado e destruído, nessa altura um grupo de empresários Japoneses se uniu para investigar e observar a

“manutenção produtiva Americana” nos Estados Unidos da América na expectativa de voltar a erguer o país implementando técnicas que promovessem a excelência produtiva nas suas empresas. Esta tarefa deu início à criação do Japan Institute of Plant Engineers (JIPE), antecessor do Japan Institute of Plant Maintenance, criado em 1969 [48].

A primeira aplicação da metodologia TPM foi de um fornecedor da *Toyota Production System* que necessitava de corresponder aos requisitos exigentes do seu cliente.

À medida que os resultados da implementação do TPM iam sendo relatados e sucessivamente comprovado por mais empresas que adotavam a metodologia nas suas fábricas. Hoje é claro que a metodologia TPM é essencial para o desenvolvimento industrial, e que a troca de ideias, experiências e informações é um motor para a continuação do seu desenvolvimento.

Após os resultados apresentados pela implementação do TPM a ferramenta ficou conhecida e passou a ser divulgada e implementada por diversas indústrias no mundo inteiro. O Japan Institute of Plant Maintenance atribui prémios anualmente de reconhecimento às empresas que implementem o TPM alcançando a excelência.

2.9.2.1. Definição do TPM

A Manutenção Produtiva Total é uma metodologia que combina a manutenção preventiva americana e os conceitos de gestão de qualidade japoneses com um envolvimento integral dos trabalhadores, dessa forma, pretendesse maximizar a eficiência do equipamento e ao mesmo tempo melhorar a sua vida útil.

A aplicação do TPM é vertical a toda estrutura fabril, isto é, a manutenção é acompanhada por toda a fábrica, sendo envolvidos operadores de máquina, equipas de manutenção e gestão de topo. Sem o acompanhamento, liderança e trabalho de toda a equipa focada nos objetivos da empresa em identificar e eliminar fatores de perdas de eficiência de equipamentos a metodologia TPM não irá resultar.

Fazendo uma análise do significado do conceito *Total Productive Maintenance* resulta [36]:

T – Total

- Eficiência global;
- Rendimento total dos equipamentos;
- Abrangência de todo o ciclo de vida do produto;
- Participação de todos os colaboradores da empresa;

P - *Productive* ou Produtividade

- Limite máximo de eficiência de produtividade;
- Zero acidentes;
- Zero defeitos;
- Zero falhas;

M - *Maintenance* ou Manutenção

- Conservar os equipamentos em condições de novos;
- Ter um nível máximo de produção;
- Ter um nível máximo de produtividade;
- Apresentar melhorias e conservá-las;

Um lema bastante utilizado no TPM é “Da minha máquina cuido eu” [36]. Se o lema for seguido pelos colaboradores este sistema de manutenção irá conseguir que o operador se familiarize com os equipamentos, ganhando uma capacidade de prevenir e prever paragens, defeitos ou acidentes com os equipamentos. Desta forma, as equipas de manutenção terão mais disponibilidade para se dedicarem a tarefas de maior valor acrescentado, como manutenções especializadas, manutenções preventivas complexas e projetos de melhoria.

Segundo Steven Borris [48], o TPM garante resultados positivos nas fábricas, renovando o ambiente e local de trabalho, e aumenta o nível de conhecimento e as capacidades dos colaboradores.

Os tempos de paragem dedicados à Manutenção são programados com o processo produtivo para que seja encontrado o tempo ideal para a paragem da produção e proceder à manutenção dos equipamentos. Esta ação pretende reduzir o número de manutenções de urgência, sempre com o objetivo de atingir as zero paragens para manutenção corretiva.

A metodologia TPM pretende evitar gastos desnecessários, produzir produtos sem sacrificar a qualidade dos mesmos, reduzir custos e produzir mais quantidade em menos tempo.

2.9.2.2. Eliminação de Perdas

O TPM é um método de gestão, que tem como uma das finalidades a identificação e eliminação de perdas existentes durante o processo produtivo, a maximização na utilização dos ativos industriais e a garantia de que os produtos apresentam a qualidade exigida e preços competitivos.

Pode ser associada as perdas existentes num parque industrial de um sistema produtivo com recurso à metodologia *Overall Equipment Effectiveness*.

Disponibilidade

- Perdas devido a avarias/falhas no equipamento;
- Perdas devido a preparação/ajustes na produção;

Desempenho

- Perdas em paragens curtas ou tempos de não produção;
- Perdas por velocidade reduzida;

Qualidade

- Perdas por defeitos/retrabalho

- Perdas entre o início da produção e a “velocidade cruzeiro” de produção;

Para melhorar a eficiência da organização é possível afirmar sete perdas que a Manutenção Produtiva total pretende eliminar [36].

1. **Perdas por avaria/falha** – É um fator com forte impacto na eficiência dos equipamentos e pode ser medido através da fiabilidade dos bens. Estes tipos de perdas provocam a tempo de inatividade produtiva e querem assistência pelas equipas de manutenção, estas perdas podem ser evitadas com o uso de ações adequadas de manutenção preventiva, desenvolvimento e aplicação de procedimentos operacionais e mudanças ao nível de *design*. É importante saber antecipar a falha do equipamento, para isso devem ser seguidas técnicas de manutenção preditiva. No entanto, na existência de uma falha deve fazer uma análise detalhada à causa/raiz da falha para que se possam encontrar soluções eficazes e duradoras;
2. **Perdas por mudança de produto e afinações (*setup*)** – As mudanças de produto requerem que os equipamentos sejam afinados ou que exista mudanças de ferramentas. Este poderá ser um processo demorado e complexo se não existir se não existir documentação e colaboradores devidamente treinados neste tipo de tarefas.
3. **Perdas devido a ferramenta ou molde** – Perdas resultantes da utilização de ferramentas ou moldes e do seu desgaste inerente à utilização no processo produtivo, que caso não sejam devidamente mantidas causaram transtornos na eficiência produtiva.
4. **Perdas por pequenas paragens** – As pequenas paragens resultam de problemas momentâneos, onde o equipamento para ou opera em vazio. Será necessário recorrer a operações de manutenção corretiva ou a novas afinações para que o problema seja solucionado e a produção retomada.
5. **Perdas por redução de velocidade** – A cadência produtiva de um equipamento é um fator essencial para que se atinjam custos produtivos

baixos, ao diminuir a velocidade de processamento relativamente à velocidade nominal, a cadência produtiva irá baixar e o custo de cada unidade produzida será mais dispendiosa.

6. **Perdas por produto defeituoso** – Perdas originadas pela deteção de produtos sem a qualidade requerida. Esta perda pode ser consequência de afinações deficientes, processos produtivos instáveis ou não capazes ou desregulação do equipamento.
7. **Perdas por arranque dos equipamentos** – Muitos equipamentos carecem de um período de estabilização do processo, perdendo-se também em alguns casos uma parte da produção.

2.9.2.3. Oito Pilares do TPM

Para que a filosofia TPM cumpra o seu objetivo de eliminar os desperdícios e perdas foram considerados alguns pilares que suportam a metodologia. Inicialmente o TPM contava com cinco pilares, considerados como básicos para dar sustento ao desenvolvimento do processo, dos quais faziam parte a manutenção autónoma, a manutenção centrada, manutenção planeada, a manutenção da qualidade e a formação e treino. Porém, com a evolução da metodologia foram introduzidos mais três pilares, o da segurança, saúde e meio ambiente, o administrativo e o da melhoria continua.

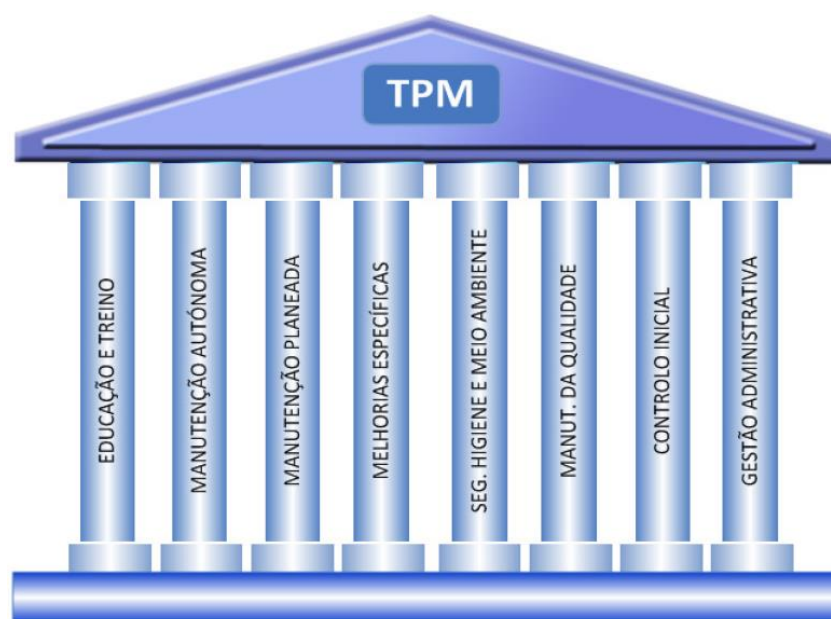


Figura 2.37 - Os oito pilares da filosofia TPM [36]

A figura apresentada expõe os oito pilares que dão suporte ao TPM. Alguns autores defendem que como base à estrutura de pilares do TPM deverá sempre existir uma base de 5S's, pois consideram que não é exequível identificar e resolver problemas sem que o local de trabalho esteja devidamente limpo, arrumado e organizado.

1. **Formação e Treino** – O objetivo deste pilar é a transmissão de conhecimentos e habilidade aos técnicos de produção e manutenção, com o intuito de revitalizar os operários e torna-los multitalentos. Deste modo, estes ficam capacitados para realizar tarefas que sejam necessárias de forma eficaz e independente. O pilar da formação e treino é essencial para a boa implementação do TPM, pois o sucesso da metodologia só é atingido quando existe uma envolvência coletiva e quando os conhecimentos são transmitidos. As técnicas mais utilizadas neste pilar são a Lição Ponto-a-Ponto e a Matriz das habilidades;
2. **Manutenção Autônoma** - Este pilar pretende reforçar a importância dos conhecimentos básicos de manutenção (limpeza, lubrificação e inspeção), treinar os operadores para aplicarem esse mesmo conhecimento nos equipamentos assim como criar um sentimento de posse e responsabilidade, dessa forma os operadores é criado um sentimento de posse e responsabilidade para com o seu equipamento. Deseja-se que operadores qualificados fiquem libertos para tarefas de manutenção de maior complexidade e de maior valor acrescentado.
3. **Manutenção planeada** - Implica um planeamento eficiente e eficaz da manutenção produtiva. Através do planeamento da produção consegue-se reunir esforços em prol da transformação de uma reativa para reação proactiva. O planeamento da manutenção pode utilizar uma equipa treinada para que o conhecimento seja transmitido, ou parte dele, aos operadores, para que eles possam melhorar os seus próprios equipamentos. Este pilar tem como objetivo manter o equipamento nas condições ideais, através do planeamento de ações de manutenção preventiva, preditiva e corretiva. Objetivo a atingir será obter “zero avarias”, melhorando a fiabilidade e manutibilidade dos equipamentos, garantidos a disponibilidade das peças de reserva necessárias e adequando a manutenção mais adequada a cada equipamento.

4. **Melhorias específicas** – Faz referência às atividades onde existem maiores falhas ou desperdícios e atua sobre as mesmas até estarem maximizadas. Dessa forma, procura maximizar a eficiência global dos equipamentos e processos através de um modelo de identificação e eliminação de desperdícios permanentemente. Pretende-se também resolver problemas mínimos nos novos equipamentos que possam existir, utilizando a aprendizagem obtida nos sistemas já existentes. Assim sendo, através dos *feedbacks* obtidos e do reaproveitamento da aprendizagem já retida através dos sistemas existentes consegue-se promover iniciativas de melhoria da manutenção, melhorando a eficiência obtida. Para tal, são utilizadas diversas ferramentas como o ciclo PDCA para a melhoria contínua, ou então, SMED para trocas de ferramentas ou o gráfico Pareto.

5. **Segurança, Higiene e Meio Ambiente** – Este pilar visa eliminar os problemas relacionados com a segurança dos operadores, higiene e meio ambiente. O conceito do pilar é promover a confiabilidade dos equipamentos, ergonomia, eliminação de acidentes e de incidentes ambientais. Assim sendo, este pilar ajuda a criar um ambiente de trabalho seguro e uma área circundante que não seja danificada pelo decorrer normal dos processos ou procedimentos produtivos. Para realizar o objetivo é necessário implementar um plano de prevenção ao nível da segurança e higiene. As empresas deverão adotar e implementarem a norma NP 18001:2000 da segurança e higiene e a norma ISO14000:2000 para o ambiente.

6. **Manutenção da Qualidade** – Estabelecimento de condições que eliminem a ocorrência de defeitos e permitam controlar essas mesmas condições, de forma a se atingir os “zeros defeitos”. A essencial deste pilar é compreender quais são os equipamentos ou processos que afetam a qualidade do produto e ir de encontro à causa/raiz para que sejam eliminados os problemas de qualidade. Existe também presente a passagem de uma mentalidade reativa para um proativa.

7. **Controlo Inicial** – Muitas das perdas que ocorrem nos processos produtivo têm a sua origem em erros efetuados durante a fase de projeto dos equipamentos. Para mitigar esses erros, durante a fase de projeto dos equipamentos deve-se ter em consideração várias dimensões a analisar como, facilidade de manutenção, *Life Cycle Cost* ou

custos da manutenção, características de funcionamento, tipo de material utilizado, etc.

8. **Gestão administrativa** – Visa melhorar a produtividade e eficiência nas funções administrativas, assim como identificar e eliminar perdas, com o propósito de criar funções administrativas organizadas e eficientes. Para isso, é necessário analisar processos e procedimentos para a automatização neste sector ser maior. As áreas abrangidas por este pilar correspondem a áreas da logística, do planeamento, dos recursos humanos, da contabilidade, das compras e ainda de áreas administrativas da manutenção e da produção.

2.9.3. Indicadores de eficiência TPM

2.9.3.1. Overall Equipment Effectiveness - OEE

Após a implementação do TPM é importante garantir que existe um sistema de medição de resultados, para que se consigam extrapolar quantitativamente, as melhorias alcançadas durante as operações. Ao elaborar uma análise sistemática é possível verificar onde estão as maiores perdas que estão a gerar problemas na eficiência produtiva.

Overall Equipment Effectiveness (OEE) é um indicador de desempenho bastante utilizado na indústria em todo o mundo. Foi criado quando Nakajima apresentou o conceito de Manutenção Produtiva Total (TPM). O indicador OEE está relacionado com a área da manutenção, mas também a área de produção e de qualidade produtiva, pois fornece informações sobre a produção e tempo desperdiçado. A imagem 2.39, demonstra os fatores para o cálculo do OEE e como é que eles se relacionam.

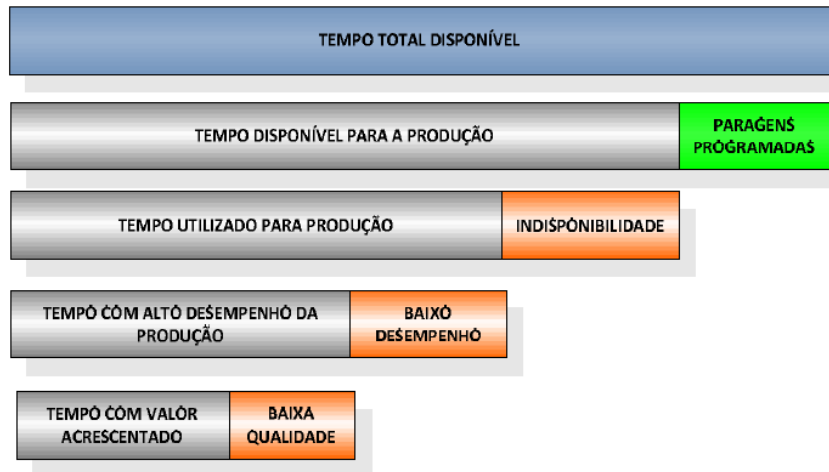


Figura 2.38 - Fatores de Cálculo do OEE [36]

O OEE pode ser considerado uma forma eficiente de analisar a eficiência dos equipamentos da organização e trata-se de uma função que engloba o produto entre a disponibilidade, desempenho e qualidade.

$$OEE (\%) = Disponibilidade \times Desempenho \times Qualidade$$

Onde,

$$Disponibilidade (\%) = \frac{Tempo \ Total \ Produção - Paragens}{Tempo \ Total \ Produção - Paragens \ planeadas}$$

O índice de disponibilidade do equipamento representa, percentualmente, o desfasamento de tempo entre em que o equipamento está planeado trabalhar com o tempo que o equipamento trabalhou na realidade. De outra forma, expressa a percentagem de tempo em que o equipamento está efetivamente disponível para produzir.

$$Performance (\%) = \frac{Tempo \ Ciclo \ teorico \cdot Total \ de \ Peças \ Produzidas}{Tempo \ Total \ Produção - Paragens}$$

O índice de performance expressa, percentualmente, a relação entre o tempo de ciclo real do equipamento, quando este se encontra em funcionamento, e o tempo de ciclo teórico. Ou seja, este índice representa a velocidade de funcionamento do equipamento. Fatores como reduções de velocidade de equipamentos, pequenas paragens não registadas, *bottleneck's* na produção, insuficiência de recursos e outros são fatores que prejudicam a performance operacional e por consequência o resultado do índice.

$$\text{Qualidade (\%)} = \frac{\text{Total de Peças Produzidas} - (\text{Peças NOK} + \text{retrabalhadas})}{\text{Total Peças Produzidas}}$$

Índice de qualidade de produto exprime, percentualmente, a quantidade de peças boas no total de peças produzidas, ou seja, proporção de unidades sem defeitos relativamente ao volume total de produção.

A indústria atual possui sistemas de produção altamente complexos, sempre adaptados para a realidade e para o tipo de produtos fabricados. Embora, o OEE médio atual da indústria ser de apenas 50 a 55%. Estes tempos de produção perdidos são causas diretas de falhas que provocam paragens de produção e sistemas [49]. Várias fontes bibliográficas referem como referência ao valor de desempenho a nível mundial um *Overall Equipment Effectiveness* de 85%.

2.9.3.2. Key Performance Indicators

De uma forma mais focalizada no desempenho da manutenção e na gestão de manutenção de equipamentos foi criado os *Key Performance Indicators*. Um conjunto de indicadores que podem auxiliar à gestão do estado de degradação dos equipamentos. Este conjunto de indicadores estão todos descritos na norma portuguesa NP EN15341:2009 – “Indicadores de desempenho da Manutenção (KPI)”.

A norma EN 15341 também expõe a forma para selecionar e utilizar os indicadores de desempenho que sejam relevantes para a empresa. A primeira etapa para a seleção dos indicadores ideias para a organização é a definição de objetivos, para que sejam escolhidos os modelos adequados à gestão da manutenção. A etapa seguinte é a seleção de indicadores que permitam a medição dos objetivos definidos. As empresas poderão sempre criar ou moldar indicadores para que a medição de aspetos específicos [50].

Tendo como objetivo de qualquer organização atingir a excelência da manutenção e utilizar os seus bens imobilizados da uma maneira competitiva. Para esse efeito existem indicadores de desempenho que auxiliam a gestão dos bens.

Os indicadores são utilizados para [50]:

- Medir o estado;

- Estabelecer comparações;
- Diagnosticar (análise de pontos fortes e fracos);
- Identificar objetivos e definir metas a alcançar;
- Planear ações de melhoria;
- Medir continuamente os resultados das modificações ao longo do tempo

O desempenho da manutenção depende vários fatores externos e internos à organização, como por exemplo:

- Localização;
- Cultura;
- Processos de transformação e serviços;
- Taxa de utilização;
- Idade;
- Informação;
- Materiais;
- Metodologias de organização;
- Ferramentas;
- Técnicas de execução;
- Mão-de-obra;

Um indicador por ser utilizado a vários níveis, é possível avaliar toda a produção ou apenas a produção gerada por um único equipamento. Desta forma é possível mensurar resultados das atividades complexas da manutenção.

Os indicadores de desempenho ou KPI, estão divididos em três grupos, Indicadores económicos, indicadores técnicos e indicadores organizacionais. Cada grupo de indicadores encontra-se subdividido por vários níveis dos indicadores, numa escala de 1 a 3. Sendo o nível 1, o nível mais prioritário e relevante para a gestão.

Grupo de Indicadores	Nível dos Indicadores		
	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Indicadores Económicos	E1 E2 E3 E4 E5 E6	E7 E8 E9 E10 E11 E12 E13 E14	E15 E16 E17 E18 E19 E20 E21 E22 E23 E24
Indicadores Técnicos	T1 T2 T3 T4 T5	T6 T7	T8 T9 T10 T11 T12 T13 T14 T15 T16 T17 T18 T19 T20 T21
Indicadores Organizacionais	O1 O2 O3 O4 O5 O6 O7 O8	O9 O10	O11 O12 O13 O14 O15 O16 O17 O18 O19 O20 O21 O22 O23 O24 O25 O26

Figura 2.39 - Organização dos indicadores de desempenho - EN 15431 [50]

Nesta dissertação será explorada as vantagens e desvantagens, os processos atuais e quais as expectativas para os indicadores de manutenção na indústria 4.0. A adequação dos métodos atualmente existentes no processo de avaliação de desempenho da manutenção de equipamentos.

3. Estratégias para a Manutenção na Indústria 4.0

3.1. Novos Modelos e Ferramentas na Manutenção

Num futuro próximo, os fabricantes de equipamentos e componentes irão procurar gerar maiores margens de lucro nos seus negócios de serviços. A conectividade colocada nos produtos abre novas perspectivas de modelos de negócios que podem ser continuamente adaptados às mudanças das necessidades dos clientes e das expectativas dos utilizadores.

Um exemplo é a monitorização do estado de degradação de um equipamento, com um contrato de serviço correspondente. Este serviço poderá ser a monitorização de componentes e equipamentos por acesso remoto e acionar automaticamente trabalhos de manutenção e manutenção quando necessário [51]. Toda a informação disponibilizada é armazenada e analisada pelo fornecedor do serviço, com o objetivo de identificar padrões que poderão indicar degradação de um componente ou um equipamento está em risco de falha iminente.

Este tipo de serviço tem como base a manutenção preditiva dos equipamentos. Os dados da condição da máquina fornecem informações sobre o estado de degradação dos equipamentos e possíveis falhas, enquanto os dados do processo permitem tirar conclusões sobre o estado do equipamento e sobre o serviço ou a manutenção necessária.

A conectividade dos produtos e equipá-los com sensores, atuadores e *softwares* adequados é um pré-requisito essencial para o tipo de modelo de negócio exposto. É imperativo um acesso aos equipamentos sem interrupções, para que no final o resultado seja tarefas de manutenção planeadas e otimizadas para ir de encontro às necessidades produtivas das empresas. É importante também o cliente deste tipo de serviço ter informações pormenorizadas sobre todas as falhas, o estado dos equipamentos monitorizados e toda a documentação relativa às medidas tomadas. No caso do fornecedor destes serviços seja os fabricantes dos equipamentos, os fabricantes podem beneficiar da manutenção preditiva, pois permite fazer uma gestão de recursos, solicitar peças de reposição, de uma forma mais atempada evitando custos de armazenamento e de transporte desnecessários.

3.1.1. *Magic Triangle*

Com a quarta revolução industrial não há dúvida de que as empresas serão capazes de gerar receitas no futuro com novos modelos de negócios baseados nas novas tecnologias. Porém ainda não é certo como esses novos negócios se irão desenvolver e integrar as técnicas atuais de manutenção.

O *Magic Triangle* foi desenvolvido pela Universidade de St. Gallen e faz uma ilustração do desenvolvimento prático da aplicação de um novo modelo de negócio que tem como base a manutenção preditiva sendo que o controlo de condição dos equipamentos é feito via remota por uma empresa externa. O modelo define quatro dimensões de manutenção preditiva - **Quem**, **O quê**, **Como** e a **Receita** - para levar em conta fatores internos e externos e criar uma visão abrangente de todas as questões envolvidas.

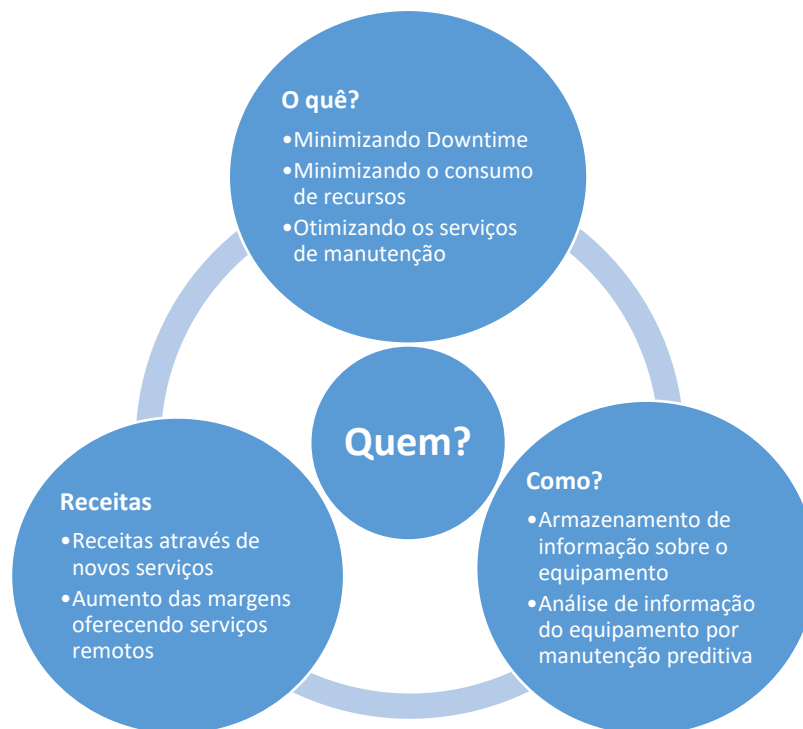


Figura 3.1 - O Magic Triangle ilustra um novo modelo de negócio de manutenção [51]

Quem? – Empresas que desenvolvam e fabriquem equipamentos e componentes que deverão projetar os seus equipamentos para que seja possível a monitorização do estado dos equipamentos em tempo real.

O quê? – Dessa forma é possível oferecer ao cliente a monitorização do equipamento, podendo o fabricante do equipamento determinar, numa fase inicial, quando a manutenção deve ser realizada em resposta a uma eventual degradação iminente do equipamento. Isso permite que os fabricantes de equipamentos ofereçam aos seus clientes novos serviços, manutenção preditiva, ao mesmo tempo em que reduzem seu próprio consumo de recursos. Além de atribuir menos colaboradores às tarefas de manutenção preventiva, os fabricantes dos equipamentos poderão fazer uma melhor gestão de *stocks* de *spare parts*. O resultado final do serviço resulta num tempo de indisponibilidade do equipamento menor comparando com métodos convencionais de manutenção.

Como? – Utilizando meios de controlo de condição embebidos nos equipamentos originais de fábrica, possibilitando a monitorização em tempo real do estado do equipamento com recurso a novas tecnologias de partilha de informação e do seu respetivo processamento de uma forma descentralizada. Isto permite que possíveis defeitos sejam detetados numa fase inicial e que a falha do equipamento seja evitada.

As agregações de todos estes fatores potenciam a criação de valor diretamente ou indiretamente ao fabricante do equipamento, isto é, **Receitas**. Os fabricantes de equipamentos encontram na indústria 4.0 um novo conjunto de serviços que podem adicionar ao seu portfólio, e assim, criar uma fonte de receitas contínua adicional ao fabrico e venda de equipamentos. Além disso, ambas as empresas prestadoras de serviço e clientes economizam dinheiro devido à otimização de gestão de stocks, *downtimes* e colaboradores. Isso proporciona outro benefício direto ao fabricante de equipamentos, porque o aumento na satisfação do cliente protege os seus negócios e ajuda o fabricante de equipamentos a se destacar da concorrência. Outra vantagem é a constante monitorização dos equipamentos que disponibilizam dados diretamente ao fabricante, permitindo uma contante evolução e melhoria no desenvolvimento e fabrico dos seus equipamentos, mais uma vez destacando-se da sua concorrência.

3.1.2. Softwares de Gestão de Manutenção

Apesar de não ser uma tecnologia nova no mercado, os *Computerized Maintenance Management System (CMMS)*, têm vindo a evoluir a sua capacidade de guardar e produzir informação sobre as atividades de manutenção.

Estes sistemas ganham uma nova importância na era da digitalização, pois é necessário que cada fábrica tenha acessível a informação sobre o estado dos seus ativos, a definição

de funções, gestão de atividades e de objetivos. Embora estes sistemas estejam amplamente aplicados na indústria, acredita-se que a sua utilização está muito abaixo das suas capacidades, servindo apenas como ferramenta de armazenamento das informações dos trabalhos de manutenção.

Na indústria 4.0 os sistemas CMMS serão utilizados como plataforma base para a comunicação entre o equipamento e a equipa de manutenção. Sendo o seu funcionamento estendido em duas áreas importantes:

1. Integração direta dos *Key Performance Indicators* no ciclo de decisão relativamente à gestão de atividades de manutenção. Dessa forma, é necessário ampliar a utilização do sistema, operando como um sistema de gestão de manutenção automatizado, seguindo os critérios do RBIM. É nuclear que o sistema tenha autonomia para recolher os dados necessários para gerar os indicadores de desempenho dos equipamentos, não dependendo da incerteza humana na recolha de informação. O vínculo entre as medidas de manutenção reais e o CMMS aumentará a confiança nos resultados obtidos a partir de uma análise e ajudará a obter uma aproximação de sistemas físicos mais realista. Existindo segurança na aproximação entre os sistemas físicos e virtuais terá um impacto positivo na disponibilidade de equipamentos, redução dos custos operacionais e de suporte.
2. A segunda área é a incorporação de sistemas de *Machine Learning*, tendo como base os sistemas *Cloud*, portais de fornecedores e outros *KET's*. A urgência de uma *spare part* está diretamente relacionada com o seu prazo de entrega e antecedência com que foi verificada a necessidade. Os sistemas de gestão de manutenção deverão comunicar diretamente com os fornecedores, verificando a disponibilidade de componentes, custos e prazos de entrega. Dessa forma é possível classificar quantitativamente não só o comportamento dos equipamentos, mas também dos fornecedores. Produzindo automaticamente ordens de compra de um determinado componente a um fornecedor específico.

3.1.3. *Machine Learning*

Machine Learning é um método de aprendizagem automática que recorre a algoritmos e técnicas que permitem os sistemas computacionais aprenderem, ou seja, os sistemas computacionais ficam possibilitados de melhorarem o seu desempenho numa

determinada tarefa de uma forma dinâmica e autónoma[52]. Os algoritmos de *Machine Learning* utilizados são ferramentas computacionais capazes de otimizar o critério de um modelo de desempenho utilizando dados ou experiências recolhidas anteriormente com uma saída ou ação desejada. Esta tecnologia é segmentada em dois tipos de aprendizagem diferentes, a supervisionada e a não-supervisionada [53].

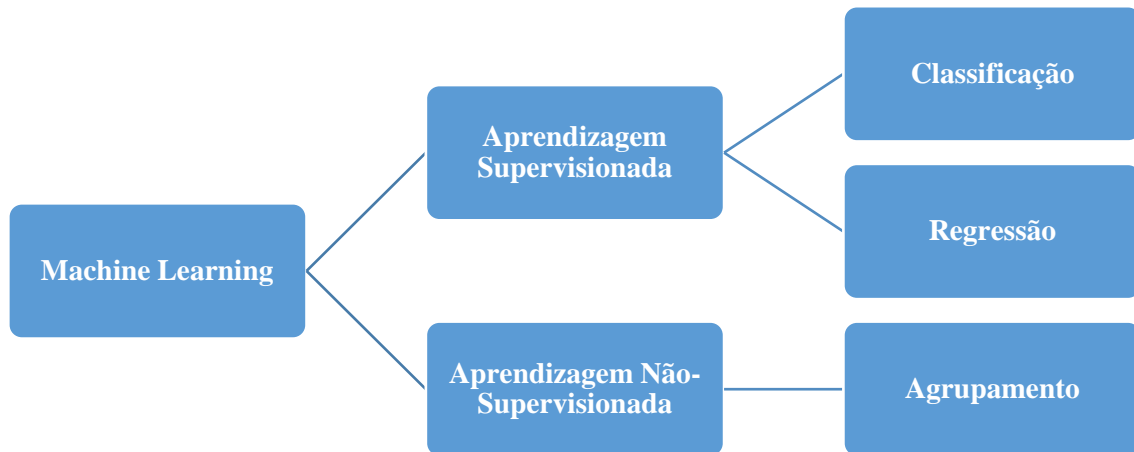


Figura 3.2 - Modelos de Machine Learning [52]

A aprendizagem supervisionada, o algoritmo de aprendizagem tem um conjunto de dados previamente conhecidos de entrada e respostas conhecidas aos dados, e executa um modelo para gerar previsões de resposta a novos dados de entrada. Este tipo de aprendizagem aplica métodos de classificação de informação e de regressões[54].

A aprendizagem não supervisionada é aplicada quando existe informação disponível, mas não há um objetivo específico ou não há certezas da informação contida nos dados. Este método também é uma boa forma de reduzir a dimensão dos dados [55].

Os resultados obtidos num sistema *Machine Learning* são influenciados por diversos fatores. Para cada aplicação os dados disponíveis podem não ser suficientes ou estarem desequilibrados, dessa forma é necessário compreender e verificar qual o melhor método de aprendizagem deve ser aplicado em cada sistema de manutenção preditiva [55].

- O método **Fuzzy Logic** pode ser utilizado para codificar conhecimento empírico e experiência adquirida na manutenção de um equipamento e na avaliação da sua condição. Os algoritmos utilizados suportam variáveis qualitativas e simulam processos de raciocínio. Assim, é possível quantificar conhecimentos imprecisos ou avaliações subjetivas.

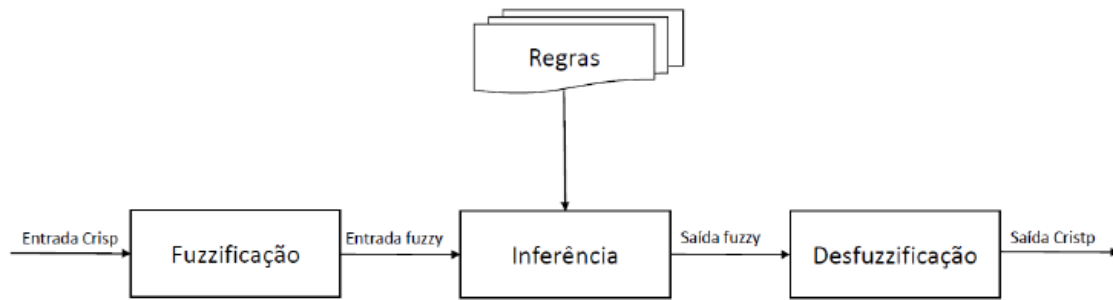


Figura 3.3 - Estrutura de um sistema Fuzzy Logic [56]

- As **Redes Neurais** são sistemas de aprendizagem não-supervisionada, sendo capazes de aprender diretamente com os dados disponíveis e ajustar os dados de saída a partir destes. Enquanto nos métodos *Fuzzy Logic* as regras de avaliação têm de estar previamente definidas, as redes neurais têm como vantagem o fato de não necessitarem de conhecimento explícito do problema para gerarem decisões. Este método é aplicado em diversas áreas como classificação, diagnóstico, análise de sinais e de imagens, reconhecimento de padrões, otimização e controle de sistemas.

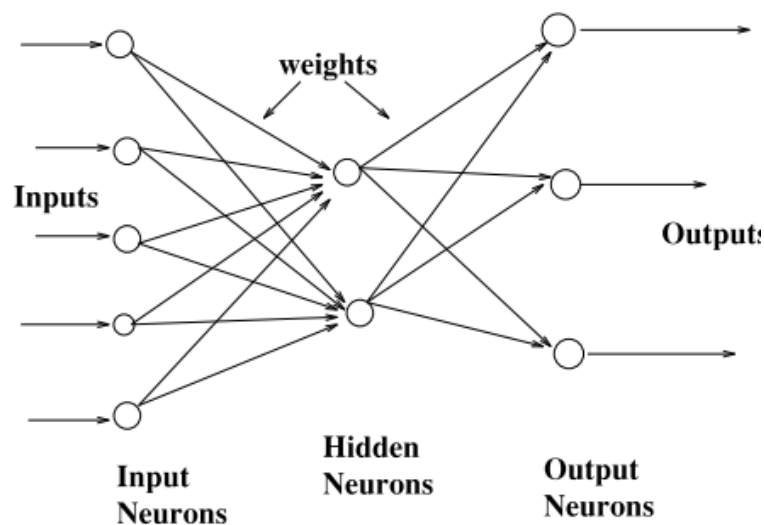


Figura 3.4 - Estrutura de uma rede neural [57]

Várias indústrias, como a aeronáutica, naval e a nuclear, têm desenvolvido sistemas de manutenção preditiva como recurso a redes neurais.

Ainda assim as redes neurais apresentam algumas limitações como [57]:

1. O tempo de processamento pode aumentar rapidamente à medida que o tamanho do problema cresce.

2. O desempenho de uma rede pode ser sensível à qualidade e ao tipo de pré-processamento dos dados de entrada.
3. As redes neurais podem não conseguir explicar os resultados obtidos; as regras de operação são desconhecidas.

3.1.4. Manutenção Remota

A monitorização e o diagnóstico remoto de equipamentos foram amplamente debatidos na década de 1970, quando se deu os primeiros desenvolvimentos da tecnologia para transmissão de dados via linha telefónica. Embora muitos fabricantes de máquinas disponibilizarem o serviço de manutenção remota naquele momento, este tipo de serviço não se desenvolveu entre a indústria devido à prematuridade da tecnologia. Atualmente, sempre que ocorrem problemas com equipamentos, é prática a visita de técnicos de serviço representantes do fabricante do equipamento às fábricas dos clientes para solucionar as falhas verificadas.

Para implementar um sistema de manutenção remota, e dessa estabelecer um serviço mais capaz e eficiente para gerir situações de avaria de equipamentos, o primeiro passo é melhorar a qualidade do produto para reduzir o número de chamadas/solicitações de serviços potenciais. O segundo é aumentar a eficiência do próprio serviço. Para isso, é necessário adquirir remotamente informação sobre o estado de desgaste dos equipamentos dos clientes, realizar diagnósticos e análises de manutibilidade remotamente na base de serviços do fabricante e gerar planos de manutenção preventiva necessários *online*.

Nos anos 2000, a manutenção remota com recurso a tecnologias de redes telefónicas móveis foi desenvolvida e aplicada por vários fabricantes de equipamentos. A DMG MORI e outras empresas de desenvolvimento de equipamentos já instalaram sistemas de manutenção remota para equipamentos de vários milhares de clientes [58]. A manutenção remota exige a comunicação e partilha de dados entre a empresa fornecedora do serviço e a empresa cliente. A manutenção remota é sobretudo efetuada ao nível de acesso aos parâmetros de desgaste de uma máquina remotamente e executa tarefas de recondição e atualização de *software*.

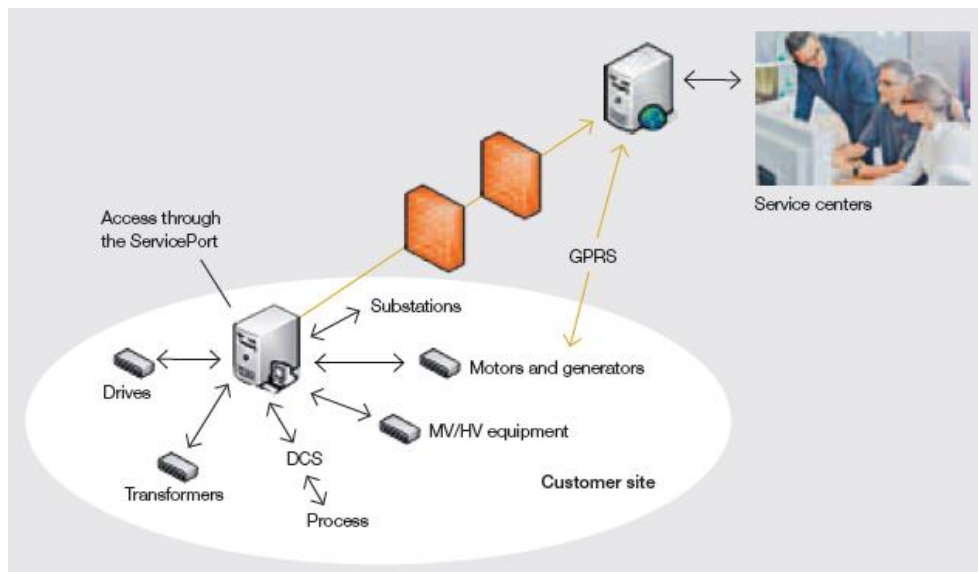


Figura 3.5 - Estrutura de um sistema de Manutenção Remota [59]

Numa abordagem a futuro a menos curto prazo, a perspectiva para a manutenção remota é usar robôs controlados remotamente para executar tarefas de manutenção em ambientes incertos. Este tipo de técnica de manutenção é frequentemente utilizado em indústrias nucleares, espaciais e outras potencialmente perigosas. Estas tecnologias de manutenção para funcionar corretamente necessitam ambiente controlado e que o estado do equipamento seja conhecido.

3.1.5. Fabrico Aditivo e Impressão Tridimensional

A impressão 3D (ou Manufatura Aditiva) é um conjunto de tecnologias de fabricação aditiva, em vez de subtrativa, em que o modelo é obtido quase sempre, por deposição de camadas sucessivas de material a partir de um modelo digital 3D criado num *software* CAD [60]. Este tipo de tecnologia apresenta-se vantajosa em comparação com as tecnologias de produção convencionais, como por exemplo a injeção plástica. Enquanto na injeção plástica tradicional é necessária a construção de um molde para a injeção, processo complexo, trabalhoso, demorado e dispendioso, a impressão 3D permite a produção de peças plásticas de uma forma mais imediata.

Existem várias tecnologias das quais derivam outras, no entanto é possível fazer uma subdivisão de dois processos tipo, a deposição do material depois de aquecido como no caso do FDM (*Fused Deposition Modeling*), e a fundição de grãos finos usando um Laser. No caso de materiais metálicos é utilizada a Sinterização Seletiva a Laser (SLS), Sinterização de Metal Direta por Laser (DMLS), Sinterização Seletiva de Metais (SLM).

O processo mais comum é a Sinterização Seletiva a Laser, onde a impressão 3D é feita seletivamente por sinterização, formando uma massa sólida de material pelo calor, mas sem chegar à liquefação [60].

No caso da indústria dos plásticos a impressão 3D apresenta-se como uma solução fiável para a produção de peças protótipo, permitindo dessa forma que o processo de desenvolvimento de produto seja feito com recurso à produção de pequenas séries e possibilitando verificar a exequibilidade na sua finalidade.

Para a manutenção a impressão tridimensional é um recurso importante para situações urgentes, em que não existindo recursos imediatos a impressão 3D pode ser um auxílio importante à continuação da laboração, mas também para o desenvolvimento de pequenos projetos e estudos, auxiliando a construção de protótipos ou modelos de trabalho com a finalidade de estudar e testar diferentes recursos, ideias, conceitos, funcionalidades, formas e desempenhos [60].

3.1.6. Realidade Aumentada para apoio à Manutenção e Formação

A realidade aumentada complementa o mundo físico permitindo a sobreposição de objetos virtuais e físicos no ambiente em que o utilizador se encontra, e possibilitando ainda a interação do utilizador com os objetos em tempo real [61].

Esta tecnologia pode ser utilizada para facilitar a correta execução de processos, permitindo reduzir o tempo de operação e a necessidade de técnicos especialistas presente durante a operação. Podem ser produzidas simulações desde modelos CAD para serem expostos através de um dispositivo móvel. Essas simulações podem conter informações necessárias para completar atividades de manutenção de um equipamento, como os passos a seguir, a ferramenta certa para cada etapa e notas de advertência. Ainda é possível apresentar aos utilizadores as "melhores práticas", sugestões e exemplos que podem auxiliar o sucesso da intervenção [62].



Figura 3.6 - Realidade Aumentada aplicada a ensaios não destrutivos em condutas [58]

O auxílio da Realidade Aumentada pode eliminar dúvidas e interpretações erráticas numa operação de manutenção. Os intervenientes serão apoiados nos processos de decisão, combinando o historial de manutenção dos equipamentos, as informações recolhidas relativas ao estado dos vários componentes integrantes do equipamento e a experiência do técnico de manutenção.

A Realidade Aumentada é uma ferramenta relevante na correta execução do modelo de manutenção e inspeção baseado no risco. No seguimento de uma operação de inspeção ou manutenção os técnicos devem proceder de acordo com as estratégias para a resolução de problemas, aumentando assim a precisão dos trabalhos efetuados. Permitindo dessa forma, verificar se no decorrer dos trabalhos o componente inspecionado é o correto ou se o componente substituído é o correto, garantindo uma rastreabilidade, repetibilidade e reprodutibilidade de todos os trabalhos efetuados.

3.2. Recolha e Análise de Indicadores de Desempenho Automaticamente

3.2.1. Implementação/Aplicação do *OEE* em Sistemas Produtivos

Em qualquer atividade empresarial é essencial obter um bom desempenho, para isso é necessário saber quais as metas a estabelecer, os desafios a ultrapassar e como gerir os recursos disponíveis [50].

A Eficiência global do equipamento, também denominado como *Overall Equipment Efficiency* ou apenas *OEE*, é um indicador que mede a produtividade dos equipamentos e dos processos. Este indicador é bastante utilizado para a monitorização da atividade

produtiva numa área mais específica como uma linha produtiva ou um equipamento ou então numa análise macro de uma fábrica ou de uma empresa.

A indústria atual possui sistemas de produção altamente complexos, sempre adaptados para a realidade e para o tipo de produtos fabricados. Embora, o *OEE* médio atual da indústria é de apenas 50 a 55%. Estes tempos de produção perdidos são causas diretas de falhas que provocam paragens de produção e sistemas [49] e danificam a qualidade do produto final.

3.2.2. Obtenção do Indicador OEE Automaticamente

O aumento da digitalização na indústria providenciou à indústria meios para adquirirem e analisarem informação automaticamente. Como consequência, as fábricas estão a investir em sistemas *MES*, *Manufacturing Execution Systems*, onde o cálculo e acompanhamento do indicador *OEE* podem ser feitos. Embora, a validade e utilidade dos resultados obtidos esteja altamente dependente da recolha da informação, ou seja, é necessário garantir que existe informação disponível e que toda a informação recolhida está conforme.

3.2.3. Gestão de Indicadores de Performance de Equipamentos

A evolução tecnológica que a terceira revolução industrial trouxe agregada às novas exposta na aquisição de informação, partilha e análise da mesma. É agora possível elaborar sistemas de monitorização de sistemas produtivos em tempo real.

Atualmente os indicadores de performance de equipamentos estão bastante dependentes de fatores externos à organização. Como a Localização, Cultura, Idade, Informação, Metodologias de organização, Ferramentas, Técnicas de execução e Mão-de-obra;

O novo paradigma da indústria 4.0 exige que a manutenção como é hoje conhecida acompanhe a evolução para uma realidade de partilha de informação, e promova a digitalização da informação. Esta evolução deverá ser desencadeada pelos fabricantes de equipamentos com a incorporação de sistemas que permitam a monitorização do estado dos equipamentos, garantindo que as operações de manutenção acontecem com a frequência necessária e são assertivas.

Com o desenvolvimento de tecnologias que atuam em áreas como a informação, comunicação, gestão, sensores, e novas propostas de sistemas de produção avançada como a gestão *lean*, produção ágil e flexível, produção sustentável, mudança nas exigências do mercado cada vez mais dinâmico, com alterações de tempo e quantidades de produção e uma menor tolerância à falha. Houve necessidade de encontrar sistemas avançados de produção e de gestão de produção, capazes de produzir adaptações rápidas para ir ao encontro à procura do mercado [63].

Os sistemas de produção modernos incorporam vários domínios da engenharia como sistemas mecânicos, elétricos, hidráulicos, pneumáticos, térmicos, controlo, automação, etc. [63].

3.2.4. Incorporação de Sistemas Ciber-físicos nos sistemas Produtivos

Um planeamento de produção que promova altos índices de rentabilidade e competitividade no mercado globalizado está dependente da qualidade da informação disponibilizada no controlo de produção. Existe planos de produção não factíveis quando disponibilizados à área produtiva, sendo uma das razões principais para isso, a utilização de dados relacionados com a produção que diferem daqueles, geralmente valores médios, que foram usados durante o processo de planeamento da produção.

De forma a eliminar as não conformidades no planeamento de produção as fábricas podem adotar uma metodologia que permita uma gestão de produção adaptativa assente na informação em tempo real sobre as necessidades de um determinado produto. Nos produtos são colocadas etiquetas RFID que auxiliam o armazenamento de informação sobre o produto, como por exemplo, número de ordem de fabrico, data da produção, equipamentos de fabrico utilizados e ainda informação em tempo real sobre o processo de produção. A gestão de produção é auxiliada por uma rede de sensores, composta por antenas e leitores RFID, que permitem a recolha de dados específicos de recursos durante a produção de um único produto (figura 3.3).

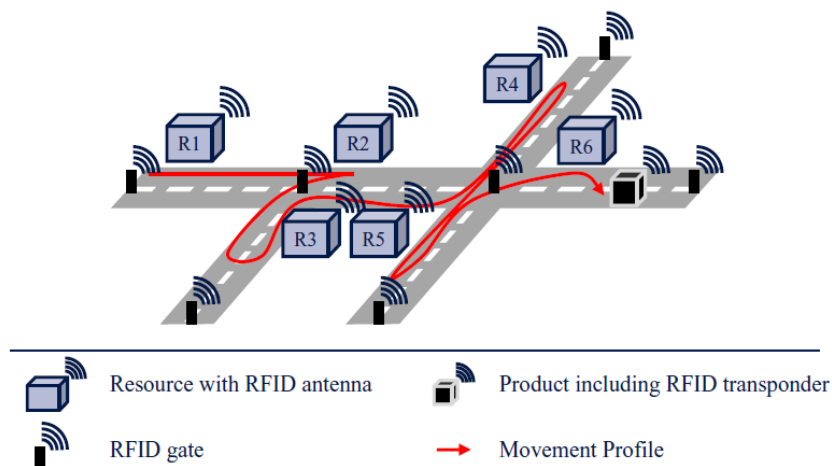


Figura 3.7 – Sistemas RFID aplicados em sistemas produtivos [64]

Os dados gerados especificamente de um produto são armazenados numa base de dados após o encerramento do processo produtivo. Esta base de dados é analisada com suporte de técnicas da *Big Data* em relação às possíveis discrepâncias relevantes na informação recebida. Em caso de deteção de discrepâncias relevantes, os dados são, consequentemente, ajustados após verificação se as discrepâncias devem ser isoladas e demonstradas se são dependentes ou independentes nas condições particulares no chão de fábrica. As discrepâncias causadas independentemente das condições reais provocam uma alteração geralmente válida na informação recolhida e processada.

As disparidades afetadas pelas condições reais levam a uma extensão do processamento dos dados. A extensão de informação recolhida apenas é válida para um produto quando as condições produtivas se mantêm constantes.

O principal objetivo da análise de dados é identificar discrepâncias entre os tempos de produção planeados e os reais e com a maior antecedência possível reajustar planos de produção. Um pré-requisito para obter resultados de alta qualidade é realizar a análise em relação às condições no chão de fábrica no momento da sua aquisição. Com isso, é possível identificar valores anormais e os resultados válidos podem ser criados para atualizar a informação raiz dos sistemas de planeamento de produção.

Numa primeira fase, é necessário elaborar medições aos elementos de medição garantindo a repetibilidade e a reprodutibilidade dos dados gerados. Garantido dessa forma que a variabilidade verificada na aquisição de dados deve-se à variabilidade inerente do processo produtivo e não ao sistema de medição usado.

Admitindo que os valores estão no intervalo admissível (dispersão aceitável sobre o valor planejado), não há necessidade de adaptar os dados de planejamento. No entanto, no caso desse intervalo ser excedido, os motivos subjacentes são averiguados na segunda fase. É necessário destacar duas características:

- Divergências verificadas do valor planejado não são dependentes das condições no chão de fábrica;
- Divergências verificadas do valor planejado são dependentes das condições no chão de fábrica;

Na primeira situação é necessário efetuar uma adaptação da informação base independente da condição. Em contraste, se as dependências entre os valores reais e as condições na fábrica podem ser identificadas, esse valor é formalmente válido nas mesmas condições. Assim, torna-se necessário considerar as dependências identificadas para adaptar a informação base.

A adaptação da informação base dependente das condições da fábrica reclama uma extensão da informação base em termos de condição de produção descrevendo particularidades. Portanto, essas particularidades devem ser consideradas adicionalmente no planejamento de produção.

Para capacitar um planejamento adaptativo para além dos planos produtivos serem adaptáveis à informação base é necessário definir pré-requisitos. Dessa forma é necessário definir os recursos alternativos para as várias operações, as ordens de produção, as condições esperadas no chão de fábrica no momento da produção planejada, as capacidades dos recursos e o tempo de transporte de produtos das várias operações.

3.3. Monitorização e Controlo de Condição de Equipamentos

3.3.1. Desenvolvimento e Construção de Equipamentos

Devido à globalização do mercado e conseqüente à crescente concorrência, a qualidade do produto e a fiabilidade tornaram-se fatores chave para o sucesso na indústria de transformação. A crescente proeminência na produção sustentável exige melhorar a eficiência e eficácia dos recursos ao longo do ciclo de vida do produto, dos processos e dos sistemas produtivos. A pressão incessante para diminuir custos e em paralelo, melhorar a satisfação do cliente origina um novo paradigma de novas estratégias de

manutenção. A necessidade de redução de custos, obrigou a uma minimização dos parques de máquinas, que tornaram os sistemas produtivos mais vulneráveis ao risco, pois a falta de disponibilidade dos equipamentos podem resultar em perdas críticas de produção

“Os fabricantes de equipamentos tornar-se-ão integradores de *software* nos seus produtos no futuro?” [65], é uma pergunta colocada num estudo desenvolvido pela SEW-EURODRIVE, empresa de referência na produção de motoredutores, redutores, motores, componentes para a instalação descentralizada, acionamentos com controlo eletrónico, etc.

Observando a evolução da computação, das tecnologias de informação e da interligação entre estas novas tecnologias e as ciências de tecnologias de fabrico, é possível observar um desenvolvimento paralelo e uma convergência cada vez maior na sinergia de tecnologias.

O desenvolvimento de computadores despoletou o controlo numérico nas máquinas-ferramentas e robôs, os microprocessadores compuseram o núcleo do controlo numérico (CNC), a utilização de computação gráfica resultou em sistemas de projeto assistido por computador (CAD).

A *Industrial Internet of Things* está a revolucionar a cooperação entre seres humanos e equipamentos, e equipamentos e equipamentos. A comunicação sem fios e as redes de sensores tornam possível o desenvolvimento de sistemas de produção de alta especificidade, com soluções de rastreamento e monitorização do estado dos equipamentos em tempo real.

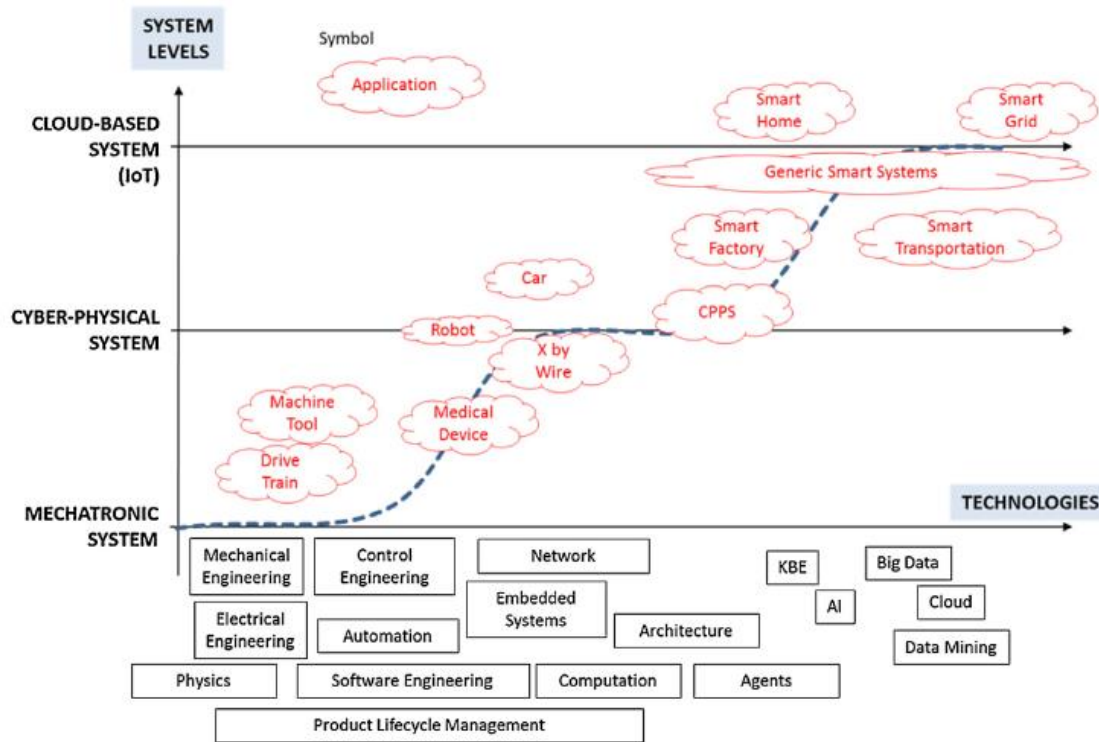


Figura 3.8 - Evolução e Convergência entre o "mundo Virtual e físico" nos equipamentos [66]

Equipamentos e máquinas deverão ser projetadas para que adaptem ao sistema produtivo ciber-físico das fábricas do futuro. Isto é, sistemas autónomos e cooperativos que partilham informação entre sistemas produtivos, logísticos e de manutenção. As três principais características que os equipamentos num ambiente CPPS deverão garantir são:

- Inteligência, os equipamentos deverão ser capazes de adquirir informação da envolvente e ser capaz de agir autonomamente.
- Conectividade, os sistemas têm de estar em constante partilha e recolha de informação com outros elementos, como diferentes equipamentos ou humanos, garantindo um funcionamento cooperativo e colaborativo.
- Resposta, a capacidade de reproduzir uma ação mediante alterações internas ou externas na organização.

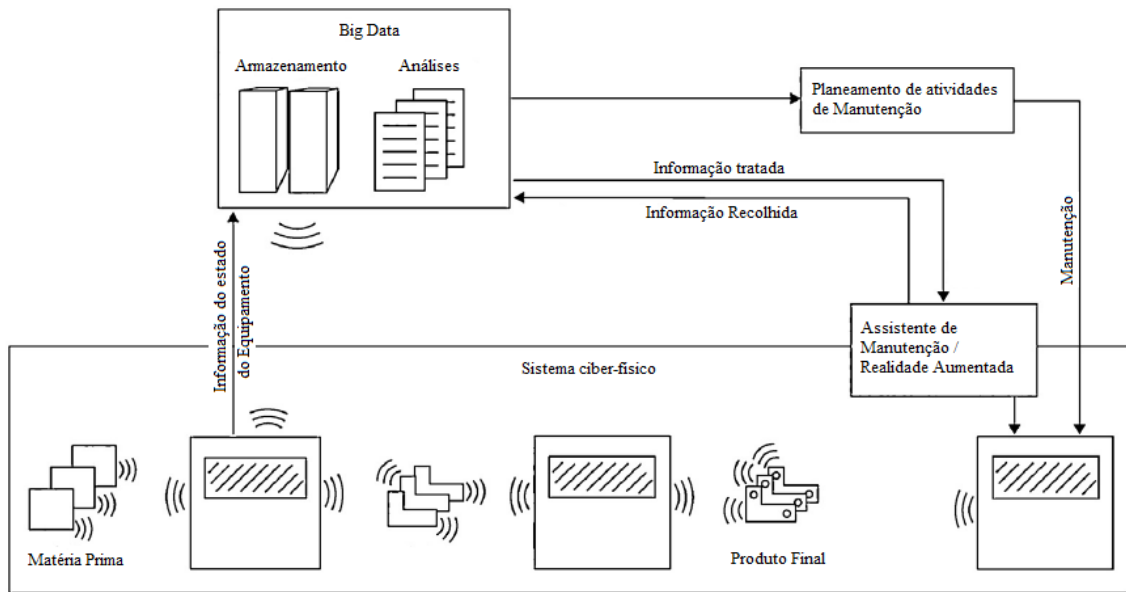


Figura 3.9 - Visualização de uma fábrica baseada na Indústria 4.0 [58]

3.3.2. Controlo de Condição

Em qualquer equipamento independentemente da possível aplicação que poderá vir a ter, a fiabilidade do equipamento é um requisito chave. A fiabilidade é utilizada como uma medida do desempenho do equipamento e pode ser definida como uma probabilidade, sendo o indicador que traduz a confiança que um equipamento irá operar sem ocorrer falhas [37].

O propósito do controlo de condição é monitorizar constantemente o estado de um equipamento e detetar numa fase embrionária qualquer dano ou avaria do equipamento. Sendo assim possível monitorizar e prever a progressão da degradação, e gerir a melhor altura em que deverá ser feita uma intervenção no equipamento.

O controlo de condição de equipamentos também proporciona:

- Uma melhoria na fiabilidade do Equipamento;
- Redução dos custos de ativos com manutenção;
- Minimização do tempo de atividades de manutenção;
- Minimização de paragens não planeadas devido a falhas graves;
- Minimização da necessidade de *spare parts* de emergência;
- Otimização dos intervalos de manutenção;
- Melhoria da segurança nos trabalhos;

Para o correto controlo de condição de um equipamento é necessária uma completa definição da aplicação do equipamento. Equipamentos idênticos podem ter utilizações completamente distintas, dessa forma, é fundamental verificar qual será a aplicabilidade do equipamento para que sejam definidos:

- Dados necessários para a monitorização do sistema produtivo. Permitindo assim a recolha da informação necessária à gestão de produção. Podendo ser tempos de ciclos produtivos, temperatura, quantidades de peças, massa, caudal, velocidade e/ou outros.
- Com recurso à metodologia da manutenção e inspeção baseada no risco é necessário definir o grau de criticidade e relevância do equipamento para a estrutura fabril.

Depois da definição de emprego do equipamento é necessário identificar quais os seus componentes críticos. O objetivo deste procedimento é perceber quais são os componentes que têm o impacto mais significativo no desempenho do sistema. A figura 3.10 exemplifica a frequência de falha pela média de inoperacionalidade associada à falha de componentes. O gráfico divide-se em quatro quadrantes assinalados, no primeiro quadrante encontra-se representado os componentes em que a frequência de falha é menor, mas onde as potenciais falhas provocam o maior tempo de inoperacionalidade. O segundo quadrante apresenta componentes em que a falha é mais frequente, mas o tempo de inoperacionalidade é curto. O terceiro quadrante mostra uma baixa frequência de falhas e uma rápida resolução das mesmas, ou seja, este quadrante reflete boas práticas de manutenção nos componentes analisados. No último quadrante é exibido o pior cenário, e onde é possível definir quais são os componentes críticos de um equipamento. No gráfico apresentado os componentes críticos a considerar são o cabo, o *enconder*, o motor e a caixa redutora e é nestes componentes onde deve ser centrada as atividades de manutenção preditiva.

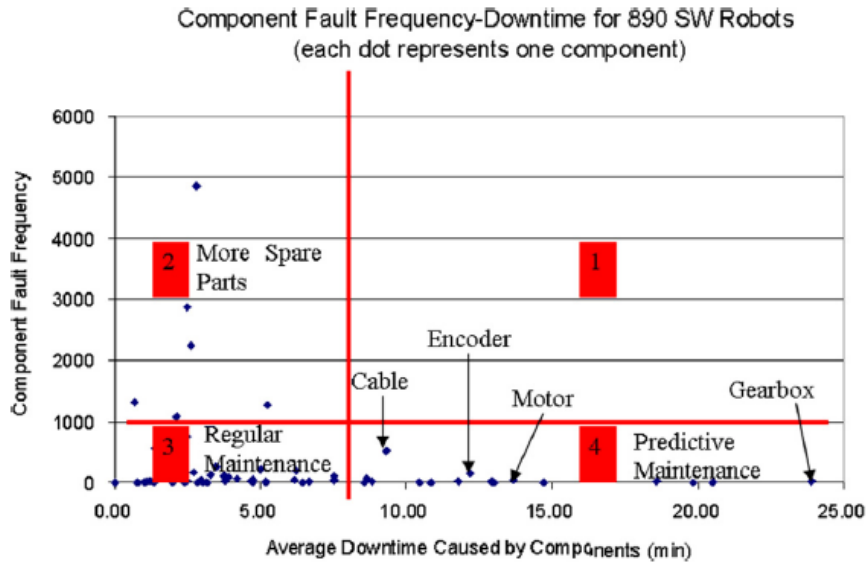


Figura 3.10 - Gráfico de suporte à identificação de componentes críticos [67]

A definição dos dois critérios acima e dos componentes críticos presentes nos sistemas tornará a gestão de ativos mais dinâmica e adequada, com uma correta definição de prioridades.

3.3.3. Aquisição e Tratamento de Dados

O objetivo da detecção de falhas em tempo real é a rápida identificação e classificação de falhas para que sejam feitos procedimentos para que as falhas sejam solucionadas em sem prejuízo para a normal laboração. Por isso, o atraso de tempo entre a ocorrência real de um evento dentro do sistema e o momento em que a falha interpretada e transmitida ao responsável do equipamento deve ser minorada.

Como demonstrado anteriormente neste trabalho, o desenvolvimento tecnológico proporcionou o processamento de dados em tempo real, incluindo aquisição, classificação, assimilação e correlação de dados, que começam a ser integrados em sistemas totalmente automatizados a um custo aceitável.

Hoje, as generalidades dos sistemas de fabrico detêm integrados vários sensores que avaliam diferentes componentes dos sistemas para indicar e controlar seu comportamento para reagir a mudanças indesejadas, sejam elas inerentes ao processo de fabrico ou ao estado de condição do equipamento.

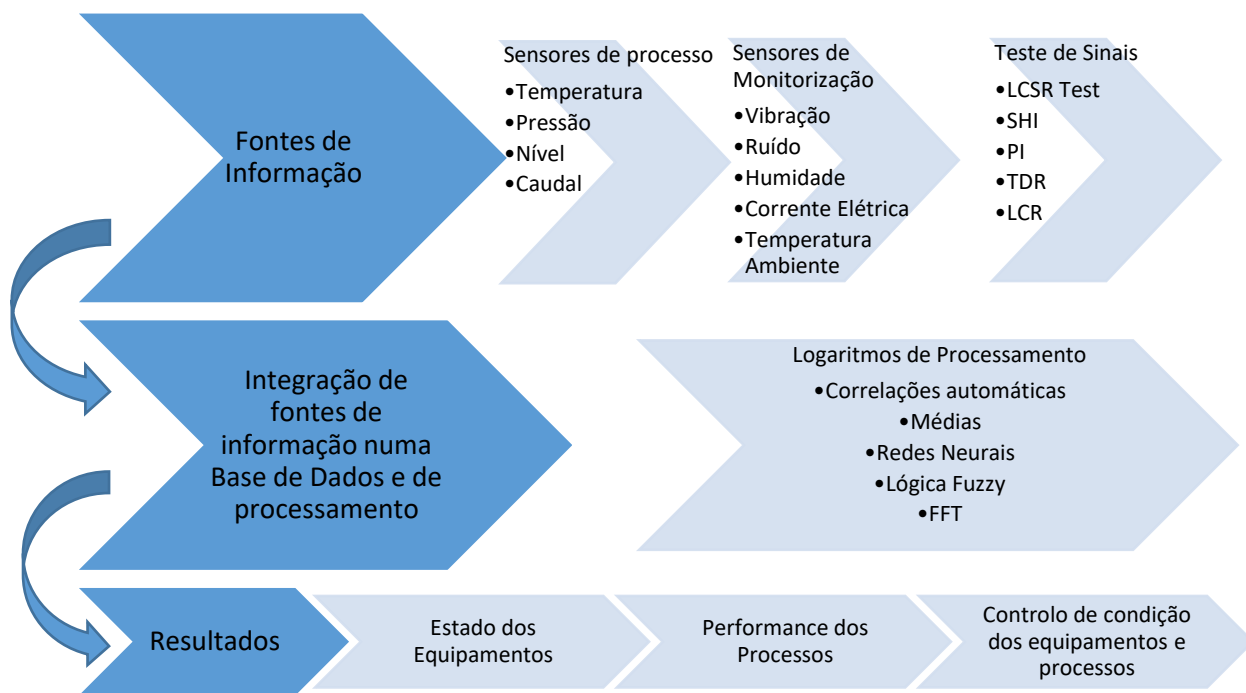


Figura 3.11 - Processamento de Informação na Indústria 4.0

A *Big Data* nos sistemas de produção inteligentes são grandes quantidades de informação, gerada continuamente pelos equipamentos produtivos, sensores de ambiente (temperatura, humidade, vibração, etc.), controladores e pelos sistemas produtivos.

A informação produzida pode ser analisada em sistemas tempo real, padrões temporais curtos ou bases de dados com históricos completos. Porém, é importante refletir em minorar a quantidade de informação armazenada sem perder informação relevante. Centenas de sensores não podem enviar informação a cada milissegundo para ser analisada e armazenada. Dessa forma é necessário definir diferentes abordagens relativamente à redução de informação:

- Informação apenas enviada com base em circunstâncias específicas. Por exemplo, a definição de limites máximos e mínimos de temperatura, e só em caso dos limites serem ultrapassados, é que a informação é enviada.
- Envio de informação agregada. Envio apenas registos de médias, somatórios, etc. Estes pacotes de informação podem ser enviados em períodos em que o fluxo de dados é menor, utilizando dessa forma tarifas mais baixas, se aplicável.
- Envio de pacotes de informação de maior volume em formato *log files* para armazenamento local.

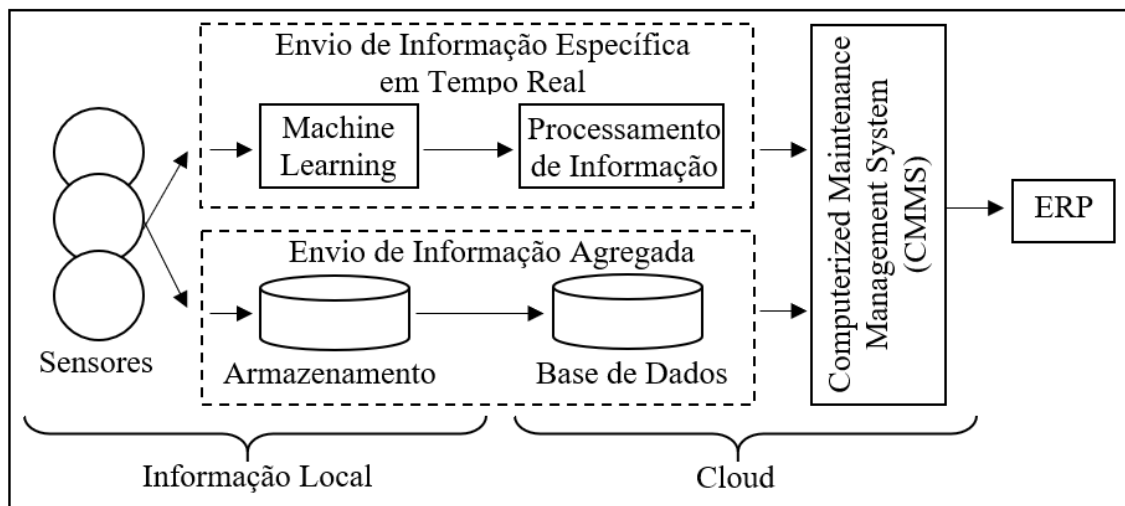


Figura 3.12 – Esquema de aquisição e processamento de dados

3.3.4. Processamento e Análise de Dados

Com o incremento da popularidade do controlo de condição, monitorização de sistemas, *Industrial Internet of Things*, Indústria 4.0 e computação *Cloud*, o volume de informação disponível para uma manutenção preditiva eficaz e capaz de responder com sucesso aos desafios que lhe são propostos. O desenvolvimento de uma manutenção estruturada para recorrer à *Big Data* no suporte da decisão irá produzir sistemas de elevada complexidade devido à diversidade de tipo de dados recolhidos, a gestão da informação ao longo de todo o ciclo de vida é um desafio em termos de armazenamento, acesso e de colaboração ao longo de toda a cadeia de fornecimento.

A análise *Big Data* pode gerar novos conhecimentos relacionando eventos operacionais, degradação de componentes e projeto de componentes. Aplicando e partilhando o conhecimento produzido em toda a fábrica, é melhorada a exatidão de predição do estado de degradação do equipamento e respetivo agendamento de atividades de manutenção no sistema ERP e/ou CMMS. Devido à enorme heterogeneidade e à falta de organização dos dados, a análise e seleção dos dados relevantes requer o desenvolvimento algoritmos complexos.

Os sistemas *Machine Learning* têm evidenciado que providenciam uma melhoria no rápido e eficaz processamento de dados, estes sistemas apoiados pelo aumento da capacidade de processamento e soluções *Cloud* tornam os sistemas computacionais muito mais robustos e aliciantes a novos utilizadores. Entre os sistemas de inteligência artificial

destacam-se as redes neuronais, a lógica *Fuzzy* e outros algoritmos genéricos, o uso destas técnicas permite relacionar registos de funcionamento de um equipamento e os parâmetros atuais de condição do equipamento, permitindo assim a deteção e prevenção de falhas em componentes integrantes do equipamento.

Não é possível defender que um sistema de Lógica *Fuzzy* deve ser utilizado em detrimento de um sistema de redes neuronais artificiais, e vice-versa. Para cada equipamento é fundamental que o seu fabricante verifique e interprete qual a melhor técnica de *Machine Learning* que deve ser aplicada para o processamento e análise de informação. A própria bibliografia demonstra isso mesmo, por exemplo com recurso a dados gerados por acelerómetros Chuan Li utiliza a Lógica *Fuzzy* para detetar falhas em rolamentos [68], também para verificar a condição de rolamentos utilizando a análise de vibrações Mohamad Anis utiliza redes neuronais [69].

Na aplicação de um sistema de manutenção baseada na análise de dados em tempo real para a monitorização dos seus sistemas produtivos antes da aplicação de algoritmos é necessário e benéfico perceber as características dos dados disponíveis. Independentemente do tipo de dados disponíveis (vibração, emissões acústicas, temperatura, etc.), certas características dos dados são fundamentais para a conceção de uma metodologia efetiva com a combinação adequada de algoritmos e para obter soluções com precisão exigida [70].

O processamento de sinal, extração e redução de dados, diagnóstico de falhas, controlo de condição são áreas amplamente reconhecidas e investigadas. Em concordância com os desenvolvimentos dessas categorias, vários algoritmos foram apresentados, desenvolvidos e comparados para processar dados, classificá-los, estimar o estado do componente em questão e prever o nível de degradação futuro. A Tabela 3.1 lista os algoritmos mais utilizados e resume cada um deles, exibindo as suas aplicações, pontos fortes e fracos para o prognóstico do estado de equipamentos.

Tabela 3.1 - Características dos algoritmos mais utilizados [67]

Algoritmo	Utilização	Vantagens	Desvantagens
Análise das séries temporais	- Utiliza diretamente a forma de onda para comparar diferentes sinais;	- Mostra imediatamente a diferença dos sinais;	- Não fornece informações suficientes para análises posteriores;

Transformada Fourier	<ul style="list-style-type: none"> - Representa a forma de onda no domínio da frequência; - Decompõe a forma de onda em somatório de sinusoides de frequências diferentes; 	<ul style="list-style-type: none"> - Adequado para sinais estacionários; - Apresenta um sinal com boa resolução no espectro; 	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de informação temporal; - Não é apropriada para sinais não estacionários;
Transformada de Fourier de tempo curto (STFT)	<ul style="list-style-type: none"> - Representa sinais simultaneamente com informações de tempo e frequência; 	<ul style="list-style-type: none"> - Fornece informações temporais e espectrais; - Apropriada para sinais não estacionários; 	<ul style="list-style-type: none"> - Difícil de determinar os parâmetros ótimos para o filtro <i>wavelet</i>; - Pode comprometer as propriedades matemáticas do sinal;
Redes Neurais	<ul style="list-style-type: none"> - Modelo simula as estruturas e funções das redes neurais biológicas; - Reconhece através da modelação de relações complexas entre <i>inputs</i> e saídas e encontrar padrões em dados; 	<ul style="list-style-type: none"> - Para sistemas complexos que envolvem comportamento não-linear e processos instáveis; - Sistema adaptativo; 	<ul style="list-style-type: none"> - Nenhum método <i>standard</i> para determinar a estrutura da rede; - Requer recursos computacionais suficientes;
Árvore de Decisão	<ul style="list-style-type: none"> - Classifica dados começando no nó de raiz da árvore e seguindo as ramificações até chegar a um nó terminal; 	<ul style="list-style-type: none"> - Boa visualização, facilidade de interpretação e capacidade de análise rápida para tomada de decisão; 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessária experiência e conhecimento para formular a estrutura da árvore;
<i>Fuzzy Logic</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Representa e processa a incerteza para tornar a complexidade do sistema gerível; - Tolerante à incerteza e pode utilizar uma linguagem para fornecer modelos robustos e tolerantes ao ruído; 	<ul style="list-style-type: none"> - Trabalha com dados incompletos, ruidosos ou imprecisos; - Vantajosa no desenvolvimento de modelos com dados imprecisos; - Mais compatível com o raciocínio humano do que a abordagem simbólica tradicional; - Adequada para sistema complexos e/ou desconhecidos; 	<ul style="list-style-type: none"> - Não é exequível em situação em que as funções de associação são difíceis de determinar; - Os termos linguísticos podem comprometer a precisão do modelo;
<i>Support Vector Machine (SVM)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Encontra um hiperplano otimizado no espaço projetado para maximizar os limites da decisão; 	<ul style="list-style-type: none"> - Alcança uma melhor decisão em casos especiais devido ao limite de decisão maximizado; - Eficiente para elevados volumes de dados e análises em tempo real 	<ul style="list-style-type: none"> - Nenhum método <i>standard</i> para escolher a função kernel que é o processo base para o SVM;

Como anteriormente demonstrado é do interesse dos fabricantes de equipamentos industriais terem sistemas de *Machine Learning* e de controlo de condição aplicados aos seus equipamentos e sabendo que dentro de uma fábrica existem equipamentos de um número indeterminado de fornecedores, é possível confirmar o seguinte:

- Os algoritmos desenvolvidos por fabricantes de equipamentos fazem parte do *know-how* interno das suas organizações, dessa forma existirá confidencialidade e segurança relativamente aos mesmos.
- É responsabilidade do fornecedor garantir que a informação recolhida tem volume, variedade, velocidade, valor e veracidade exigida pela *Big Data*.

Sendo importante garantir que todos os *outputs* gerados e fornecidos são fidedignos e que podem ser exportados de sistemas *Cloud* do fornecedor para os sistemas utilizados pela entidade cliente ou por empresas fornecedoras de serviços de manutenção, é igualmente importante que todos os dados fornecidos tratados sejam enviados em formatos abertos para que possam ser introduzidos automaticamente nas plataformas *CMMS*.

À medida que o número de dispositivos conectados aumenta e diferentes mecanismos são interligados, surge a necessidade de encontrar soluções e normalizações comuns aos produtos *IIoT*. Quando os produtos de diferentes fornecedores começam a comunicar entre si, eles devem conseguir comunicar na mesma linguagem para torná-los interoperáveis.

A informação recolhida, processada e partilhada deve obedecer às normas aplicáveis no controlo de condição de cada tipo de sistema eletromecânico. Permitindo, que diferentes fornecedores apresentem os mesmos níveis de criticidade para equipamentos semelhantes no mesmo estado de degradação.

3.3.5. Decisão e Auxílio à Gestão das Tarefas de Manutenção

A transformação tecnológica verificada na manutenção dá-se com a complementação de três agentes transformadores, a construção equipamentos com a integração de plataformas sensoriais, as análises preditivas da informação recolhida e as ferramentas de visualização da informação recolhida e processada.

A forma como é visualizada a informação processada é essencial para suportar o pensamento analítico humano e a tomada de decisão para a manutenção. As ferramentas

de visualização sintetizam a informação multidimensional com o objetivo de apoiar a avaliação, planeamento e previsão das atividades de manutenção.

A informação que é apresentada deve obedecer aos diferentes níveis hierárquicos da empresa e deve integrar valores base sobre os equipamentos, como, o valor do ativo e o valor gerado pelo ativo. Dessa forma as atividades de manutenção deverão sempre obedecer à matriz da Inspeção e Manutenção Baseada no Risco (figura 2.35).

Atualmente o processo de decisão relativamente a atividades de manutenção de um equipamento tem em consideração oito fases diferentes:

1. Responsável do bem necessita de determinar o planeamento da manutenção de um equipamento;
2. É contactado o fabricante do equipamento para que seja determinado o estado do equipamento e obtidas recomendações relativas à sua manutenção;
3. Fabricante ou empresa especializada fornece relatórios relativos à condição do equipamento;
4. Responsável do ativo prepara um caderno de encargos;
5. É enviado o caderno de encargos para diferentes fornecedores para obter propostas comerciais;
6. São estabelecidos requisitos pelo fornecedor para a elaboração da proposta;
7. É apresentada a proposta para componentes e serviço de manutenção;
8. Responsável pelo equipamento analisa as propostas recebidas;

Um sistema que faça uso de informações de monitorização da condição remotamente, elimina a necessidade de o responsável dos ativos físicos aceder manualmente aos parâmetros de uso. O uso do sistema proposto suporta a melhoria dos processos de decisão relativamente às atividades de manutenção industrial, estabelecendo uma proposta de manutenção de equipamentos e uma melhor gestão de ativos. O processo de decisão com a implementação de sistemas *IIoT* de suporte à manutenção pode ser sustentado em apenas quatro fases:

1. Equipamento emite um alerta relativamente ao estado de condições de uma parte do seu sistema;
2. Responsável do equipamento solicita que seja analisada toda a informação relativamente ao equipamento e é efetuado e enviado um caderno de encargos aos fornecedores qualificados;

3. É apresentada a proposta para componentes e serviço de manutenção;
4. Responsável pelo equipamento analisa as propostas recebidas;

Depois de serem definidos e testados os algoritmos para processamento dos dados, a informação de recolhida será analisada com o intuito de apoiar o processo de tomada de decisão. Um objetivo primordial dos sistemas de decisão é permitir que o sistema transmita as informações certas à pessoa certa, para que as decisões sejam tomadas da forma mais célere possível. Por esse motivo, as ferramentas de visualização são parte essencial para o sucesso dos sistemas de manutenção na indústria 4.0. As quatro ferramentas de visualização mais utilizadas são, o Gráfico de Degradação, Gráfico de Radar de Desempenho, Mapa de Classificação e Falhas e Gráfico de Radar de Risco, podem ser projetados para apresentar informações de prognósticos como ilustrado na Fig. 3.13. A aplicabilidade de cada uma das ferramentas de visualização é descrita abaixo [67]:

- Gráfico de Degradação: se o nível de confiabilidade (0 – Não Conforme, 1 - Conforme) de um componente baixar, é acionado um procedimento de manutenção para analisar a curva do componente e encontrar uma tendência de degradação. O Gráfico de Degradação avalia o desgaste do componente em função da evolução histórica e do seu estado atual.
- Gráfico de Radar de Desempenho: o gestor de manutenção pode analisar este gráfico para obter uma visão geral do *status* de desempenho de cada componente. Cada eixo do gráfico corresponde ao nível de confiança de um componente específico.
- Mapa de Classificação e Falhas: o Mapa de Classificação e Falha é usado para determinar as causas raiz da degradação ou falha. Este mapa classifica diferentes modos de falha dos componentes monitorizados, apresentando diferentes modos de falha em *clusters*, cada um indicado por uma cor diferente.
- Gráfico de Radar de Risco: o Gráfico de Risco é uma ferramenta de visualização para gestão de informação de manutenção ao nível da fábrica que expõe valores de risco, indicando as prioridades de manutenção. O valor de risco do equipamento (determinado com base na metodologia da Inspeção e Manutenção com Base no Risco) indica a relevância de proceder a atividades de manutenção no equipamento, sendo que quanto maior o valor do risco, maior será a prioridade do equipamento receber manutenção.

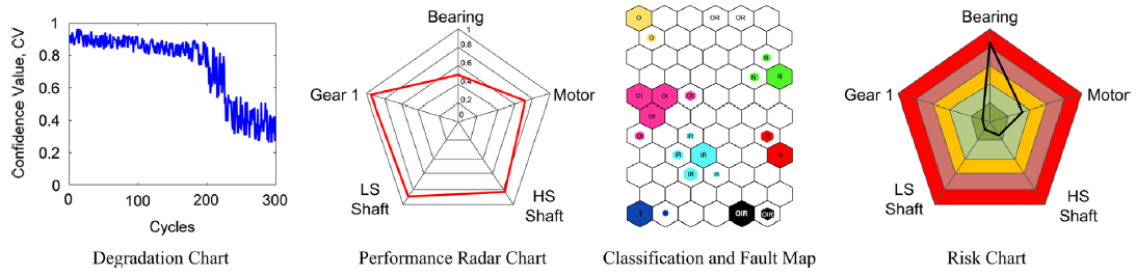


Figura 3.13 - Quatro ferramentas de visualização para Controle de Condição [70]

4. Caso de Estudo – Bomba Centrífuga

4.1. Bombas centrífugas: Caso de estudo

As eletrobombas centrífugas são equipamentos bastante comuns em instalações industriais. Com aplicação direta ou indireta em vários processos de fabrico industriais. Numa análise sucinta é possível concluir que este é um equipamento bastante simples de compreender a sua aplicação e forma de operar.

Embora estes equipamentos sejam vulgares a nível industrial e doméstico nos últimos anos não se tem verificado evoluções a nível tecnológico aplicadas ao desenvolvimento destes equipamentos. Como apresentado no capítulo anterior deste trabalho, a indústria 4.0 trouxe novas valências que potenciam uma readaptação de todos os equipamentos relacionados aos processos produtivos. Dessa forma é necessário perceber quais as tecnologias possíveis de serem aplicadas nos equipamentos de bombagem numa abordagem centrada na manutenção, e como será a interação entre o equipamento de bombagem, as tecnologias nele aplicadas e as equipas de manutenção.

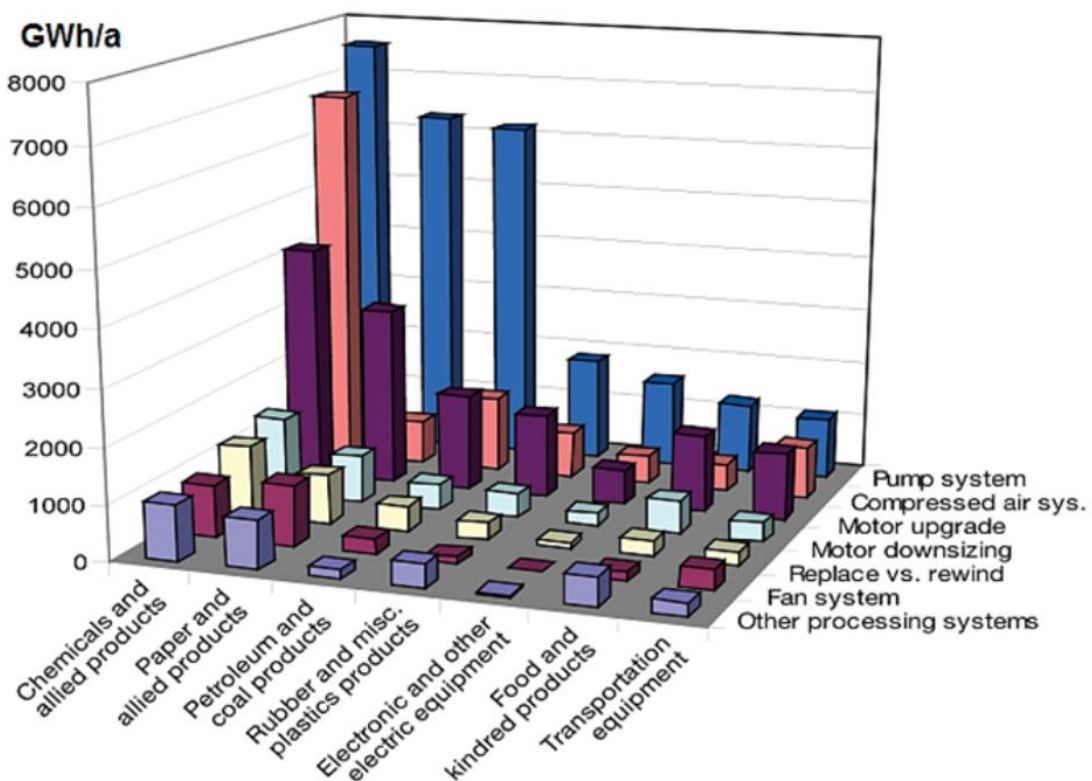


Figura 4.1 - Oportunidades de otimização de energia em sistemas industriais [71]

Em indústrias como a do Petróleo, Gás e Químicos, as eletrobombas são equipamentos nucleares para os seus processos produtivos. Além disso, as eletrobombas são os ativos que consomem mais energia nessas indústrias. A figura 52 ilustra oportunidades de poupança energética em várias indústrias para vários equipamentos industriais.

Ainda, é importante verificar os custos inerentes aos equipamentos de bombagem. Onde cerca de 40% estão relacionados com custos energéticos e 25% com custos de manutenção [71].

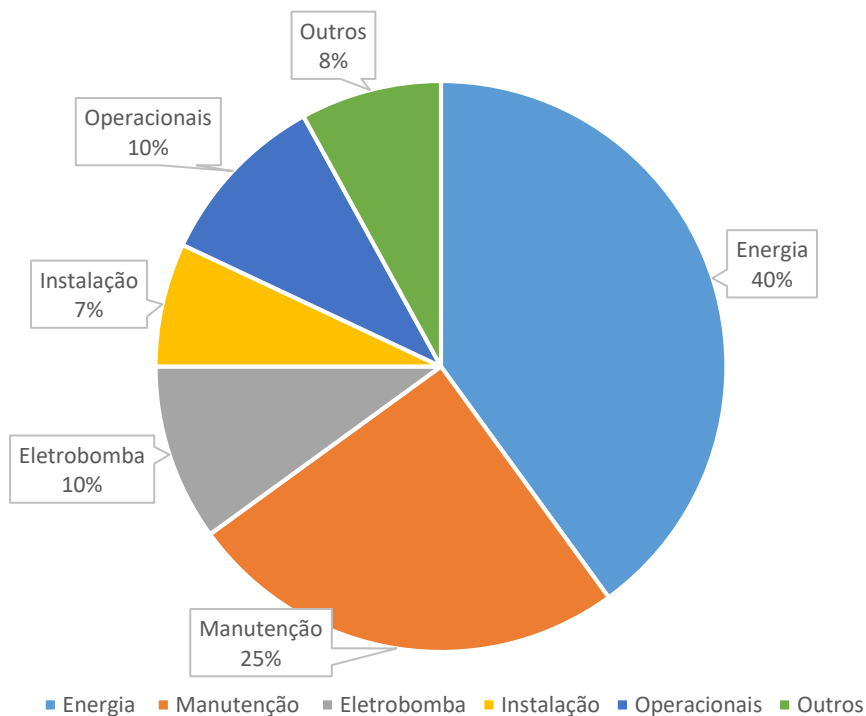


Figura 4.2- Exemplo de custos do ciclo de vida para um sistema de bombeamento [71]

4.2. Constituição de Bombas Centrífugas

Na sua forma mais simples, a bomba é constituída por um rotor que gira no interior de uma carcaça [72]. As bombas centrífugas criam pressão impondo velocidade no fluido através do impulsor, e posteriormente essa velocidade converte-se em pressão. É importante verificar que as bombas centrífugas dependem da energia cinética, em vez de meios mecânicos para deslocar o líquido. A energia cinética do fluido aumenta do centro do rotor para a ponta das palhetas propulsoras. Esta energia cinética é convertida em pressão quando o fluido sai do impulsor e entra na voluta ou difusor. Veios condutores

fixos no corpo da bomba podem ajudar a dirigir o fluido, melhorando a eficiência da bomba [72];

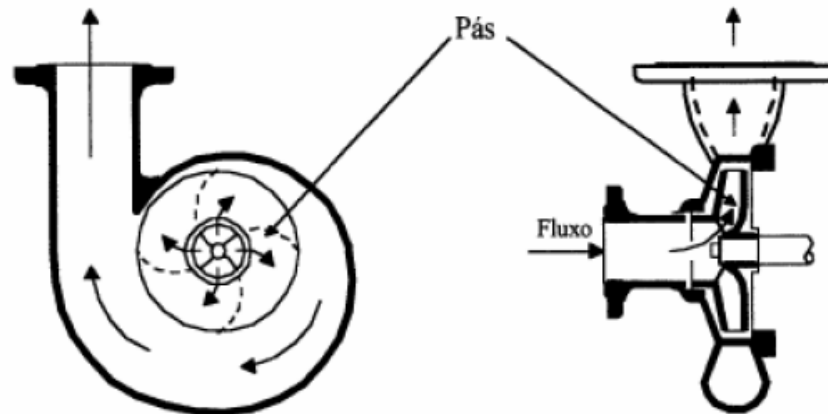


Figura 4.3 - Forma típica do corpo uma bomba centrífuga [72]

Normalmente o ímpulsor é considerado o coração da bomba, sendo constituída por um disco que roda a alta velocidade, o que permite transmitir a energia ao líquido para este adquirir o aumento de pressão desejado [72].

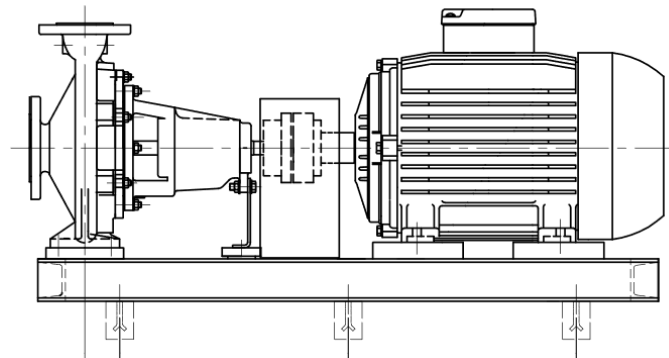


Figura 4.4 - Grupo Eletrobomba montado em estrado [73]

Os componentes e mecanismos que integram um equipamento de bombagem podem ter várias configurações diferentes. De uma forma sintética, os principais elementos constituintes de uma bomba centrífuga horizontal, tipo *end suction*, são os seguintes:

- Corpo da bomba;
- Motor elétrico;
- Ímpulsor;

- Veios condutores;
- Sistema de refrigeração;
- Sistema de lubrificação.

A figura 4.3 e tabela 4.1 expõem de uma forma mais exaustiva todos os componentes e elementos integrantes de uma bomba centrífuga normalizada pela EN 733.

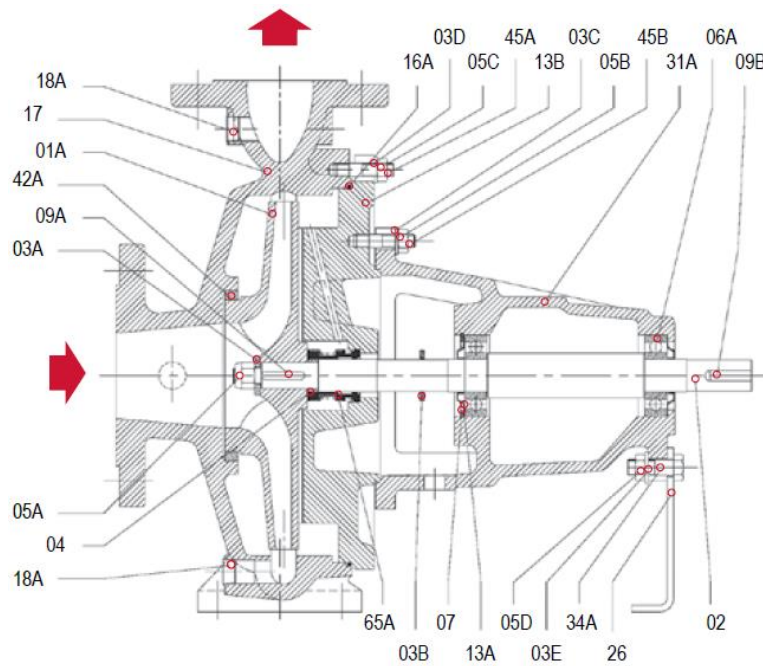


Figura 4.5 - Bomba Centrífuga Normalizada EN733 [73]

Tabela 4.1 - Componentes integrantes de uma bomba centrífuga normalizada EN733 [73]

Item	Quantidade	Designação	Item	Quantidade	Designação
01A	1	Impulsor	17	1	Corpo
02	1	Veio	18A/B	1	Tampão
03A	1	Anilha do Impulsor	21	1	Bucim
03B	1	Anilha centrifugadora	26	1	Pé de Suporte
04	1	Casquilho	31A	1	Chumaceira
06	2	Rolamento	36	1	Lubrificador de Nível

09A	1	Chaveta do Impulsor	41	2	Retentor
09B	1	Chaveta	42A/B	1	Anel de Desgaste
13A	2	Tampa da Chumaceira	47	1	Purgador
13B	1	Tampa do Corpo	52	1	Adaptador
16A	1	Junta do Corpo	64	1	Lanterna
16B	1	Junta	65A	1	Empanque mecânico

4.3. Curva Característica da bomba e ponto de funcionamento

O ponto de funcionamento de uma bomba corresponde à interseção da curva característica da bomba (H/Q), com a curva característica da instalação. Com esse ponto, temos o caudal que pode ser bombeado para a instalação, a potência absorvida, o rendimento e o N.P.S.H.req.

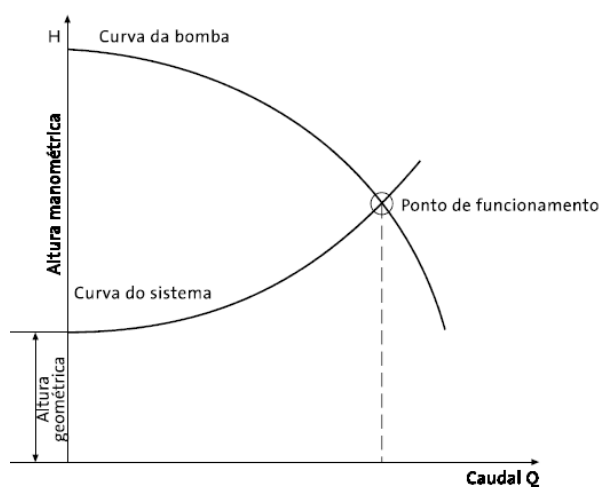


Figura 4.6 - Ponto de funcionamento de uma bomba

4.4. Plano de Manutenção e Inspeção

Os equipamentos de bombagem são equipamentos mecanicamente simples e se a sua seleção for adequada para a função que irá desempenhar são equipamento fiáveis.

A Grundfos é um dos maiores produtores de equipamentos de bombagem, tanto para a área industrial como doméstica. Para as eletrobombas da série NK, a Grundfos apresenta o seguinte plano de manutenção inspeção como recomendado [74].

1. Verificação diária do correto funcionamento do empanque;
2. Verificação semanal do nível de lubrificante e ruído de rolamentos. Assim que os rolamentos iniciarem a gerar ruído devem ser trocados;
3. Verificação mensal do acoplamento entre bomba e motor. Se as juntas de borrachas mostrarem sinais de degradação devem ser trocadas;
4. Se o equipamento de bombagem estiver parado ou em standby durante longos períodos deverá ser ligado semanalmente para o manter operacional;
5. A bomba deverá ser limpa anualmente;

4.5. Possíveis causas de avarias em bombas centrífugas

A correta instalação de um equipamento de bombagem é um ponto crucial para a vida útil do equipamento. Nas eletrobombas centrífugas *End Suction* o alinhamento do veio ao motor é uma operação determinante, pois é uma operação que se não for executada corretamente irá potenciar o aparecimento de várias avarias. Sendo que mais de 50% de avarias em bombas *End Suction* são causadas por desalinhamentos [75].

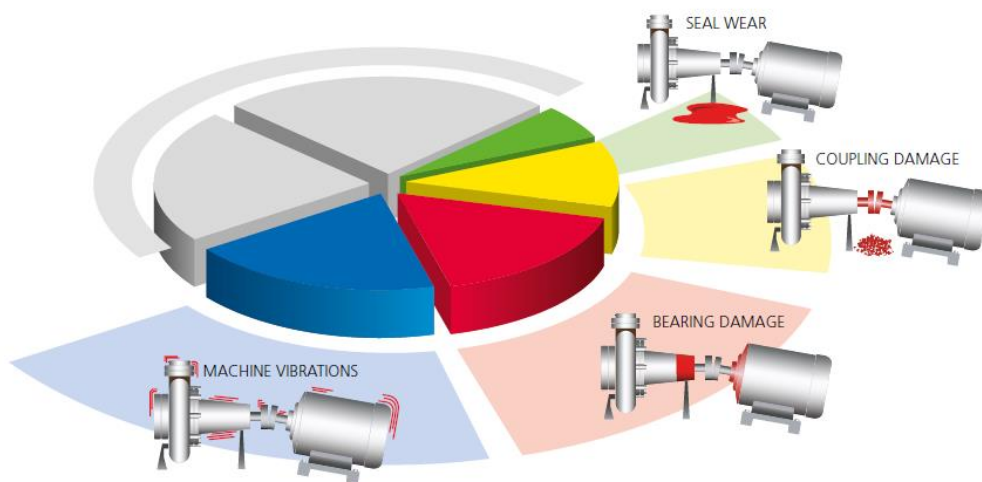


Figura 4.7 - Avarias causadas por desalinhamentos [75]

As falhas nos equipamentos bombagem estão diretamente ligadas à sua utilização, instalação e à sua adequada seleção para a função a desempenhar. Porém eletrobombas centrífugas horizontais apresentam sempre desgaste devido ao esforço físicos e à fricção.

Componentes como os rolamentos dos motores e das bombas, empanques e retentores, anéis de desgaste e casquilhos têm uma necessidade de intervenção maior nos equipamentos de bombagem.

Condições como o tempo de operação dos equipamentos de bombagem, a qualidade da água, temperatura do fluido a bombear, temperatura ambiente, condições de ventilação da sala onde estão instaladas as bombas são importantes para o estabelecimento de um plano de manutenção adequado.

Na tabela 4.2 são apresentadas as diferentes avarias de equipamentos de bombagem e as respectivas causas e solução.

Tabela 4.2 - Tabela suporte para deteção de avarias em bombas End Suction [74]

Avaria	Causa	Solução
1. A bomba não liberta líquido ou liberta líquido em quantidade insuficiente.	a) Ligação elétrica incorreta (2 fases).	Verifique a ligação elétrica e repare-a, se necessário
	b) Sentido de rotação incorreto.	Troque duas fases da alimentação elétrica.
	c) Ar na tubagem de aspiração.	Purgue a tubagem de aspiração ou a bomba e volte a encher.
	d) Contrapressão demasiado elevada.	Ajuste o ponto de funcionamento de acordo com os dados técnicos. Verifique se o sistema contém impurezas.
	e) Pressão de entrada demasiado baixa.	Aumente o nível do líquido no lado da aspiração. Abra a válvula de seccionamento na tubagem de aspiração.
	f) Tubagem de aspiração bloqueada ou impurezas no impulsor.	Limpe a Bomba
	g) A bomba aspira ar devido ao vedante danificado.	Verifique os vedantes das tubagens, as juntas do corpo da bomba e os empanques e substitua-os, se necessário.
	h) A bomba aspira ar devido ao nível reduzido de líquido.	Aumente o nível do líquido no lado da aspiração e mantenha-o o mais constante possível.
2. O disjuntor diferencial de	a) Bomba bloqueada por impurezas.	Limpe a bomba.

proteção do motor disparou porque o motor está sobrecarregado.	b) A bomba está a funcionar acima do ponto de funcionamento nominal.	Ajuste o ponto de funcionamento de acordo com os dados técnicos.
	c) A densidade ou a viscosidade do líquido é superior à especificada na encomenda.	Se for suficiente um caudal inferior, reduza-o no lado da descarga. Ou instale um motor mais potente.
	d) A configuração da proteção contra sobrecarga do disjuntor diferencial de proteção do motor está incorreta.	Verifique a configuração do disjuntor diferencial de proteção do motor e substitua-o, se necessário.
	e) O motor está a funcionar em duas fases.	Verifique a ligação elétrica. Substitua o fusível, se estiver danificado.
3. A bomba faz demasiado ruído. A bomba funciona irregularmente e vibra.	a) Pressão de entrada demasiado baixa (cavitação)	Aumente o nível do líquido no lado da aspiração. Abra a válvula de seccionamento na tubagem de aspiração.
	b) Ar na tubagem de aspiração ou na bomba.	Purgue a tubagem de aspiração ou a bomba e volte a encher.
	c) A contrapressão é inferior à especificada.	Ajuste o ponto de funcionamento de acordo com os dados técnicos.
	d) A bomba aspira ar devido ao nível reduzido de líquido.	Aumente o nível do líquido no lado da aspiração e mantenha-o o mais constante possível.
	e) Impulsor desequilibrado (pás do impulsor obstruídas).	Limpe e verifique o impulsor.
	f) Partes interiores gastas.	Substitua as peças danificadas.
	g) Bomba pressionada pela tubagem (originando ruído no arranque).	Monte a bomba de modo que não exista pressão sobre a mesma. Apoie as tubagens.
	h) Rolamentos danificados.	Substitua os rolamentos.
	i) Ventilador do motor danificado.	Substitua o ventilador.
	j) Acoplamento danificado.	Substitua o acoplamento. Alinhe o acoplamento.
k) Corpos estranhos na bomba.	Limpe a bomba.	
4. Fugas na bomba ou nas ligações. Fugas	a) Bomba pressionada pela tubagem (originando fugas na bomba ou nas ligações).	Monte a bomba de modo que não exista pressão sobre a mesma. Apoie as tubagens.

no empanque mecânico. Fugas na caixa de empanque de cordão.	b) Juntas do corpo da bomba e juntas das ligações danificadas.	Substitua as juntas do corpo da bomba ou as juntas das ligações.
	c) Empanque mecânico sujo ou colado.	Verifique e limpe o empanque mecânico.
	d) Empanque mecânico danificado.	Substitua o empanque mecânico.
	e) Caixa de empanque de cordão danificada.	Volte a apertar a caixa de empanque de cordão. Repare ou substitua a caixa de empanque de cordão.
	f) Superfície ou camisa do veio danificada.	Substitua o veio ou a camisa do veio. Substitua o vedante na caixa de empanque de cordão.
5. Temperatura demasiado elevada na bomba ou no motor.	a) Ar na tubagem de aspiração ou na bomba.	Purgue a tubagem de aspiração ou a bomba e volte a encher.
	b) Pressão de entrada demasiado baixa.	Aumente o nível do líquido no lado da aspiração. Abra a válvula de seccionamento na tubagem de aspiração. Consulte as instruções de instalação e operação.
	c) Rolamentos com lubrificante insuficiente, em excesso ou lubrificante inadequado.	Reabasteça, diminua a quantidade ou substitua o lubrificante.
	d) Bomba com caixa de rolamentos pressionada pela tubagem.	Monte a bomba de modo que não exista pressão sobre a mesma. Apoie as tubagens. Verifique o alinhamento do acoplamento.
	e) A pressão axial é demasiado elevada.	Verifique os orifícios de redução do impulsor e os anéis vedantes no lado da aspiração.
	f) O disjuntor diferencial de proteção do motor está danificado ou a configuração está incorreta.	Verifique a configuração do disjuntor diferencial de proteção do motor e substitua-o, se necessário.
	g) O motor está sobrecarregado.	Reduza o caudal.

4.6. Técnicas de monitorização do estado de bombas centrífugas

Na tabela 4.3 são apresentadas as diferentes falhas em equipamento de bombagem e as respetivas técnicas de monitorização preditiva que podem dar informação sobre o estado do equipamento permitindo uma atuação informada e mais conveniente.

Tabela 4.3 - Técnicas de Monitorização de Equipamentos de Bombagem por Defeito tipo; 1) Prática de Monitorização adequada à deteção do defeito; 2) Prática de Monitorização parcialmente adequada à deteção do defeito 3) Prática de Monitorização não adequada à deteção [76], [77]

Defeito/ Técnica	Análise de Vibrações	Termografia	Análise de óleos	Análise Acústica	Visualização com estroboscópio
Desequilíbrio	1	3	3	3	3
Desalinhamento	1	2	3	3	3
Empeno do Veio	1	3	3	3	3
Desaperto	1	3	3	3	2
Ressonância	1	3	3	3	3
Rolamentos	1	2	2	2	2
Cavitação	1	3	3	2	3
Motor Elétrico	1	2	3	3	3

4.6.1. Norma ISO 10816

O controlo de condição tem como principal objetivo detetar variações no estado do equipamento e dessa forma antecipar possíveis problemas. Para partes não rotativas de máquinas industriais a norma ISO 10816 estabelece limites que servem de base na classificação da possível falha em que o equipamento se encontra [40]. Com base no tipo de equipamento e na velocidade de vibração são apresentados valores que permitem visualizar se o equipamento está em bom ou mau estado. A norma é aplicável a equipamentos industriais como, motores elétricos, compressores rotativos, bombas, ventiladores, etc. [78].

A norma ISO 10816 define dois critérios de avaliação da criticidade da vibração, o primeiro considera a magnitude da vibração medida em banda larga, e o segundo considera as variações da magnitude da vibração [78].

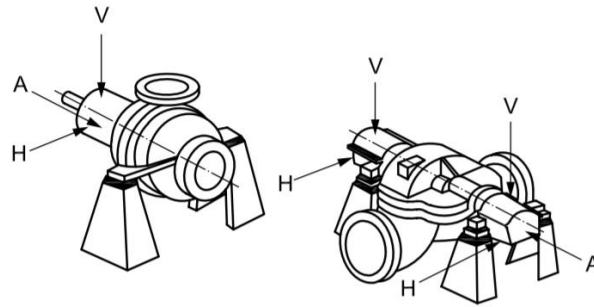


Figura 4.8 - Locais de medição de vibrações e as suas direções [79]

4.6.1.1. Magnitude de Vibração

Este critério divide em quatro níveis a magnitude de vibração nos apoios, relacionando a magnitude de vibração com as cargas dinâmicas admissíveis nos apoios e a transmissão aceitável da vibração para o equipamento.

- Zona A: Máquinas novas;
- Zona B: Vibração considerada admissível para laboração normal;
- Zona C: Vibração não admissível para laboração contínua. Equipamento pode operar por um período limitado até a correção do problema;
- Zona D: Vibração não admissível para laboração. Vibração pode provocar danos ao equipamento;

A norma apresenta ainda uma matriz onde situa os níveis de magnitude de vibração de uma máquina para diferentes velocidades de vibração e potência do equipamento.

Tabela 4.4 - Valores de severidade de vibração [78]

Velocidade de vibração mm/s rms	< 15 kW Classe I	15 kW ≤ P ≤ 75 kW Classe II	P > 75 kW (base rígida) Classe III	P > 75 kW (base flexível) Classe IV
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	B
1,8				
2,8	C	C	C	C
4,5				
7,1				
11,2	D	D	D	D
18				
28				
45				

4.6.1.2. Mudança na Magnitude de Vibração

O segundo critério incide sobre as mudanças da magnitude de vibração, sejam elas instantâneas ou progressivas. Estas mudanças podem ocorrer sem que o limite da Zona C

tenha sido atingido, e podem significar que ocorreu ou poderá ocorrer um dano no equipamento.

4.7. Monitorização e controlo de Condição na Indústria 4.0

Cada bomba ou conjunto de bombas, deve efetuar a sua função de modo aceitável para a sua aplicação. Daí que cada sistema de bombeamento necessita sempre de um conjunto de equipamentos externos às bombas, aplicados em diferentes pontos da instalação, de forma a assegurar a operacionalidade das bombas de acordo com a metodologia recomendada. As bombas necessitam por isso sempre de um sistema de controlo, de modo a efetuarem corretamente as funções para as quais foram selecionadas e projetadas, servindo a necessidade dos utilizadores.

Esse sistema de controlo pode ser dividido em três grupos:

- Sensores de monitorização de processo;
- Sensores de monitorização de condição;
- Sistemas de comunicação e gestão;

A gestão cumpre o processo pelo qual é possível contabilizar os diversos parâmetros, custos de exploração, custos de manutenção, controlo e rentabilização de exploração, em termos energéticos e de serviço, entre outros. Permite ou não efetuar relatórios por forma a ajudar ao melhor aproveitamento das variáveis necessárias ao processo de funcionamento. Pode elaborar mapas de controlo automáticos, bem como registo de avarias ou acontecimentos importantes para otimizar o funcionamento dos equipamentos de bombeamento (bombas, válvulas, aparelhagem de medida e controlo).

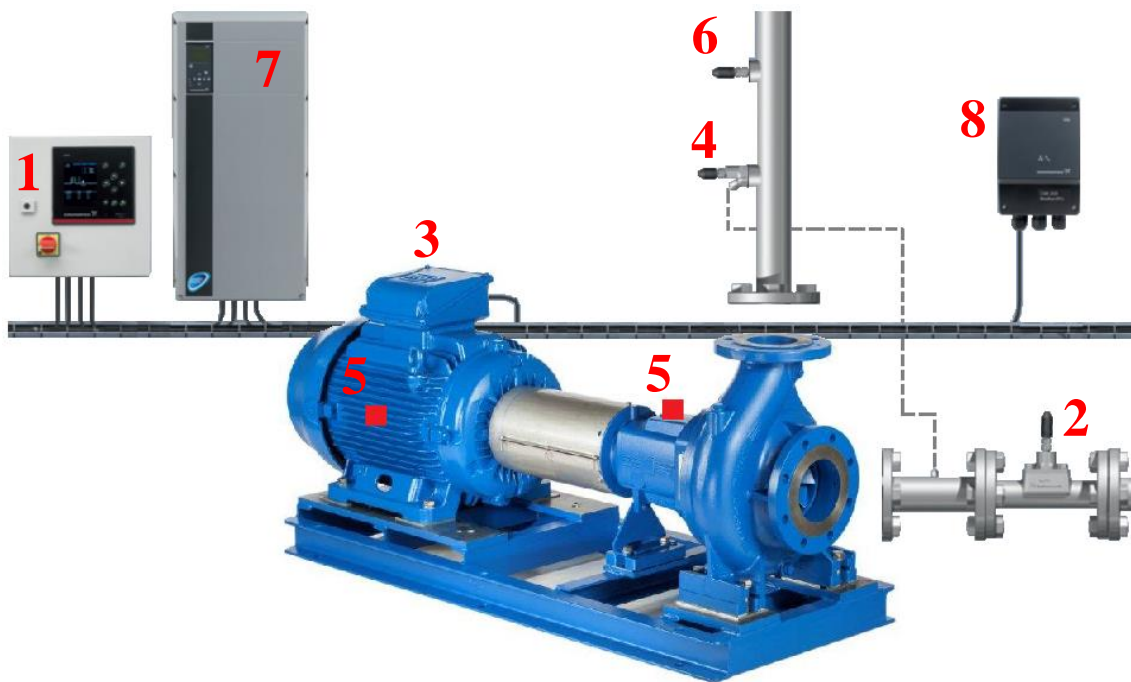


Figura 4.9 - Adaptado. Esquema ilustrativo de uma central de bombagem com monitorização em tempo real [80]

A figura 4.9 ilustra uma eletrobomba *End Suction* com vários elementos sensoriais que permitem a monitorização do equipamento em tempo real, tanto o seu desempenho a nível de processo como o seu estado de degradação. A tabela 4.5 exhibe os equipamentos utilizados para gerar informação para a monitorização dos equipamentos. Estes equipamentos não têm de estar forçosamente integrados num equipamento central, a sua dispersão ou centralização é feita de acordo com cada tipo de processo e de monitorizações a efetuar.

Tabela 4.5 - Equipamentos utilizados para monitorização de uma Eletrobomba *End Suction*

1	Quadro Elétrico de Comando e Controlo
2	Transdutor de Caudal
3	Motor Elétrico
4	Transdutor de Pressão Diferencial e Temperatura
5	Acelerómetros
6	Transdutor de Pressão e Temperatura
7	Variador de Frequência
8	Módulo de Comunicação <i>Wireless</i>

4.7.1. Sensores de Monitorização de Processo

Um sistema de monitorização de processo permite o controlar o sistema a operar de forma automática, segura e eficaz, garantindo que o equipamento trabalha de acordo com as condições com que foi projetado.

Num equipamento de bombagem deverão ser utilizados sensores que controlem a pressão e o caudal debitado pela bomba.



Figura 4.10 - Eletrobomba End Suction com diferentes sistemas de monitorização de processo [81]

4.7.1.1. Monitorização do Caudal

Este tipo de controlo visa a monitorização do caudal, possibilitando assim assegurar o correto abastecimento da instalação, deve ser utilizado em concordância com a instalação e os respetivos equipamentos de bombeamento. Este rigor é tanto mais preciso quanto melhor for o equipamento de medida e o controlo das bombas.

4.7.1.2. Monitorização da Pressão

Tradicionalmente o controlo de arranque e paragem de sistemas de bombagem é feito por pressão. Pode ser executado com recurso a um sistema de pressóstatos e vaso de expansão, ou seja, um sistema analógico.

Num sistema de bombagem adaptado à indústria 4.0 o sistema de controlo é executado com recurso a um transdutor de pressão integrando os processadores desenvolvidos para o efeito. A monitorização da pressão é também utilizada para auxiliar os conversores de frequência, para permitir gerir o funcionamento das centrais de bombeamento de uma forma eficaz, melhorando a sua performance nas aplicações onde é utilizada. Garante-se assim um valor de pressão constante na rede de abastecimento independente da variação dos consumos, conduzindo a uma melhoria da carga a que o equipamento é sujeito e proporcionando uma redução dos custos com a eletricidade.

4.7.2. Sensores de Monitorização de Condição

As figuras 4.2 e 4.3 ilustram um equipamento de bombagem *End Suction*. Este tipo de equipamento pode ser subdividido em três equipamentos distintos, o motor, o acoplamento motor/bomba e a bomba.

Para que a monitorização do equipamento como um todo seja bem-sucedida é necessário encontrar a melhor forma de monitorizar cada um destes subsistemas.

4.7.2.1. Monitorização do Motor Elétrico

Os motores elétricos são utilizados numa vasta gama de aplicações. Estes tipos de equipamentos são fiáveis e de baixo custo devido a serem equipamentos normalizados e de produção em grande escala. Devido a essas características o custo da monitorização de condição permanente em motores de baixa tensão ainda é demasiado elevada, e como resultado muitas vezes os motores trabalham até falharem.

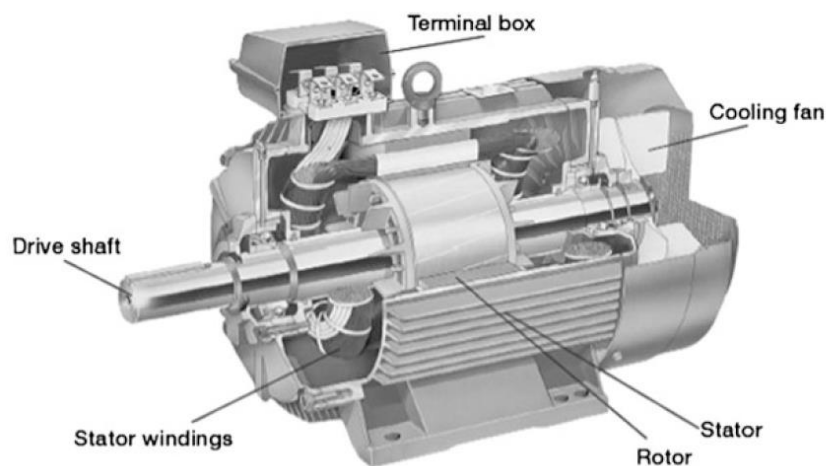


Figura 4.11 - Motor Elétrico [82]

Os componentes críticos de um motor elétrico são os rolamentos, o enrolamento do estator, a barra rotórica e o veio. As avarias mais comuns dos motores elétricos podem ser divididas em três categorias distintas [82]:

- Elétricas: Curto-circuitos entre fases, ligações erradas entre enrolamentos, circulação de correntes nos rolamentos e no veio, problemas ligação à terra;
- Mecânicas: Falha nos rolamentos, barras rotóricas partidas, circuito magnético do motor danificado, veios empenados, desalinhamentos do veio, anéis partidos das extremidades das gaiolas rotóricas;
- Externas: Motor deficientemente selecionado, desequilíbrios nas tensões de alimentação do motor, cortes na alimentação, falha nos componentes mecânicos de transmissão de potência;

A tabela 4.6 apresenta a percentagem relativa às principais avarias nos motores elétricos de indução nos seus componentes críticos.

Tabela 4.6 - Avarias por componente de Motor Elétrico de Indução [82]

Organização	Rolamentos	Estator	Rotor	Outras
IEEE	42%	28%	8%	22%
EPRI	41%	36%	9%	14%

Devido à evolução incutida pela indústria 4.0 fabricantes de motores elétricos começaram a desenvolver e apresentar soluções de baixo custo que permitem fazer um controlo de condição do equipamento. Segundo a ABB, o sensor *ABB Ability Smart* tem a capacidade de monitorizar e analisar informação gerada pelos parâmetros de operação, permitindo a otimização da manutenção do motor, reduzindo o *downtime* em cerca de 70%, aumentar a vida útil do motor por 30% e diminuir o consumo elétrico em 10% [83].

O *ABB Ability Smart Sensor* é um sensor compacto que é facilmente instalado na lateral dos motores do fabricante sem a necessidade de passagem de cabos ou da alteração no equipamento. O sensor é um componente opcional na compra de um motor ABB, podendo ser instalado em quase toda a gama antiga e nova de motores de baixa voltagem da ABB.



Figura 4.12 - ABB Ability Smart Sensor instalado num Motor Elétrico [83]

A informação gerada é processada e armazenada em plataformas *Cloud* de forma encriptada para garantia de segurança, e disponibilizada em portais à equipa de manutenção responsável pelo equipamento e também pode ser acedida por técnicos especializados do fabricante do equipamento.

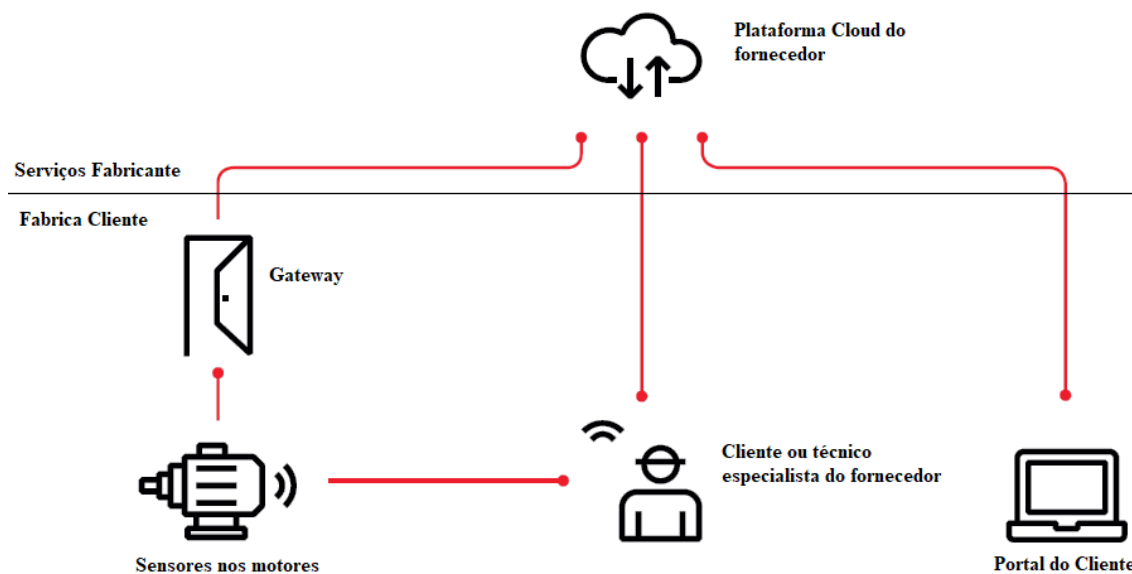


Figura 4.13 – Esquema de operação de sistema de monitorização de motores elétricos [83]

Na tabela 4.7 são expostos os parâmetros de monitorização de condição que o sensor analisa em tempo real que têm por base a análise de vibrações e a verificação da temperatura de funcionamento. Para além desta informação o equipamento ainda gera e disponibiliza informação proveitosa tanto para a monitorização da condição como do processo, como a temperatura de funcionamento, consumo energético, horas de funcionamento, potência e sobrecarga, número de arranques e a velocidade de funcionamento (rpm) [83].

Tabela 4.7 - Parâmetros analisado pelo ABB Ability Smart Sensor

Parâmetros analisados	Possíveis falhas
Vibração Axial	Desequilíbrios, Corpos soltos, Gestão do Estado do Acoplamento, Efeitos de Sobrecargas, etc.
Vibração Radial	
Vibração Tangencial	
Condição dos Rolamentos	Rolamentos danificados
Condição de Arrefecimento	Sobreaquecimento devido ao bloqueio do fluxo de ar
Excentricidade do veio	Empeno do Veio
Estado dos Enrolamentos do rotor	Fissura na barra do rotor

4.7.2.2. Monitorização do Acoplamento

O bom alinhamento do acoplamento de uma bomba *End Suction* na fase de instalação do equipamento é importante para que não existam avarias prematuras, porém devido à sensibilidade deste tipo de equipamentos é essencial monitorização contínua do alinhamento do acoplamento.

Como verificado anteriormente mais de 50% das falhas em bombas *End Suction* são causadas por um alinhamento do acoplamento entre a bomba e motor deficiente. O alinhamento com recurso a equipamentos laser, a boa equilibragem de impulsores e uma metodologia de controlo de condição são pontos fundamentais para uma manutenção viável de máquinas rotativas.

Um desalinhamento pode ser entendido com um desvio geométrico do veio segundo um eixo, que se pode dever a uma instalação deficiente, uma manutenção descuidada, o desgaste de componentes que apoiam o veio, como um rolamento. Existem três tipos de desalinhamentos que podem ocorrer: angulares, lineares e combinados [84].

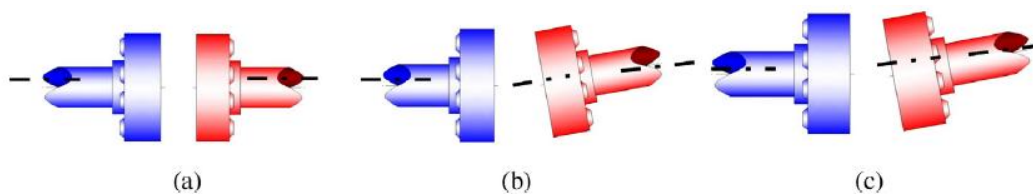


Figura 4.14 - Tipos de desalinhamento a) linear, b) angular, c) combinado [84]

Existem dois métodos mais comuns no alinhamento de veios, um método analógico que utiliza relógios comparadores para garantir o alinhamento e um método digital que utiliza

um emissor e recetor laser para efetuar o alinhamento. Os sistemas de alinhamento laser são mais precisos e geram leituras automáticas dos possíveis desalinhamentos dos equipamentos.

Ainda não é possível fazer uma integração de equipamentos de alinhamento laser nas eletrobombas devido ao seu ainda elevado custo e pelo facto da sua instalação e calibração não ser compatível com o funcionamento da eletrobomba.

Porém, um desalinhamento pode ser detetado com recurso à análise de vibrações, à termografia e à verificação do estado da lubrificação dos rolamentos.

4.7.2.3. Monitorização da Bomba Hidráulica

Uma progressão no desenvolvimento e conceção nas bombas hidráulicas e a incorporação de sistemas IoT dará aos sistemas de bombagem a oportunidade de se tornarem mais fiáveis e com planos de manutenção mais robustos e bem organizados.

A monitorização de um sistema de bombagem está centrada em três áreas distintas [85]:

- Monitorização do desempenho geral do sistema (pressão, eficiência, caudal, etc.);
- Análise de vibrações;
- Monitorização da temperatura dos rolamentos;

Como verificado na tabela 4.3, a análise de vibrações possibilita a deteção das falhas mais comuns num equipamento de bombagem. Dessa forma, as bombas hidráulicas deverão incorporar acelerómetros para a monitorização da vibração nos sistemas e componentes. Porém, deverão ser utilizados métodos que complementem e criem redundâncias no sistema, assim sendo, a monitorização da temperatura e do desempenho do equipamento será igualmente importante.

Individualmente, nenhum dos indicadores referidos acima oferece informação suficiente para uma manutenção robusta, porém a articulação de todos os indicadores fornecem uma informação completa sobre o estado de condição da bomba [85].

A vibração de uma bomba está diretamente relacionada com a sua correta instalação e distância ao seu ponto de maior eficiência. Quanto mais distante do melhor ponto de eficiência, maiores serão as vibrações. Não existe um valor absoluto de amplitude de

vibração que seja indicativo de uma bomba em perigo. Porém, existem várias diretrizes, como a norma ISO 10816, que permitem estabelecer níveis de alarme.

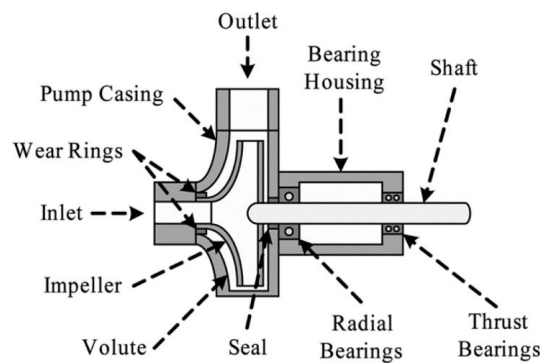


Figura 4.15 - Modelo simplificado de uma bomba centrífuga [86]

A análise de defeitos de rolamentos é outra ferramenta útil que pode deve ser utilizada para a monitorização do estado de uma bomba. Os sensores de vibração, acelerómetros, permitem que sejam isolados os defeitos de um determinado rolamento e que seja determinado se o rolamento está em risco de falha. Para suportar a monitorização dos rolamentos os fabricantes disponibilizam a frequência do rolamento para diferentes defeitos em função da velocidade de rotação.

Em semelhança com as melhores práticas de hoje e da análise de vibração convencional, devem ser estabelecidos parâmetros base iniciais e, em seguida, continuamente monitorizados.

4.7.3. Aquisição, Processamento e Análise de Dados

A tabela 4.8 ilustra a seleção de um algoritmo para a implementação de um sistema de manutenção preditiva utilizando os rolamentos de uma eletrobomba *End Suction* como um exemplo de aplicação. Como verificado anteriormente, os componentes rotativos de uma eletrobomba, como os rolamentos, o veio, acoplamento e impulsor, trabalham sob cargas dinâmicas e são mais suscetíveis à falha do que outros componentes. A metodologia proposta pretende explorar e desenvolver técnicas básicas para auxiliar no estabelecimento de um sistema de manutenção preditiva e controlo de condição para eletrobombas *End Suction* em diferentes processos ambientais e operacionais. Neste caso, a aplicabilidade de cada método de controlo de condição é definida por atribuir uma importância utilizando uma escala de 1 a 5 (sendo 5 o mais relevante) e propondo um algoritmo que efetue o respetivo processamento de dados.

Tabela 4.8 – Exemplo de potenciais algoritmos a utilizar na monitorização de uma eletrobomba

Equipamento	Condições a monitorizar		Importância	Algoritmo/Método de Controlo
Motor	Monitorização de Processo	Temperatura	1	Limite inferior e superior admissível
		Consumo Energético	3	Support vector machine
		Tempo de Funcionamento	3	Support vector machine
		Potência	2	Support vector machine
		Número de Arranques	2	Support vector machine
		Velocidade de Funcionamento	2	Support vector machine
	Controlo de Condição	Vibração Axial	5	Transformada Fourier
		Vibração Radial	5	Transformada Fourier
		Vibração Tangencial	5	Transformada Fourier
		Temperatura	4	Limite inferior e superior admissível
Acoplamento	Controlo de Condição	Vibração Axial	5	Transformada Fourier
		Vibração Radial	5	Transformada Fourier
		Vibração Tangencial	5	Transformada Fourier
		Temperatura	4	Limite inferior e superior admissível
Bomba Centrífuga	Monitorização de Processo	Pressão Descarga	3	Support vector machine
		Pressão Aspiração	2	Support vector machine
		Caudal	2	Support vector machine
		Eficiência	3	Support vector machine
		Temperatura Descarga	2	Limite inferior e superior admissível
	Controlo de Condição	Presença de Líquido	5	Árvores de Decisão / Redes Bayesianas
		Temperatura	4	Limite inferior e superior admissível / Redes Bayesianas
		Tempo de Funcionamento	3	Árvores de Decisão / Redes Bayesianas
		Vibração Axial	5	Transformada Fourier / Redes Bayesianas
		Vibração Radial	5	Transformada Fourier / Redes Bayesianas
		Vibração Tangencial	5	Transformada Fourier / Redes Bayesianas

O desenvolvimento de um sistema de monitorização deverá ser assente na monitorização dos componentes críticos do sistema, porém a análise de dados deverá segmentar a informação de forma a enviar ao utilizador do sistema a informação estruturada por tipo de falha ou componente em falha. No caso de uma eletrobomba os tipos de falhas podem ser, desequilíbrios, desalinhamentos, empenos no veio, desapertos, ressonância no sistema, defeitos nos rolamentos, cavitação no sistema e desempenho deficiente do motor elétrico.

Para além do desenvolvimento de algoritmos de análise de dados, é terminante o cumprimento das normas aplicáveis. Apenas dessa forma será possível que os dados pós-processados de diferentes fabricantes se traduzam nas mesmas escalas de valor. Por exemplo, duas bombas normalizadas *End Suction* EN 733 equivalentes de fabricantes diferentes deverão apresentar os mesmos resultados se o seu estado de degradação for o mesmo.

Neste processamento, é importante o responsável do equipamento poder escolher a norma ou normas de gestão do controlo de condição do equipamento que deseja que sejam aplicadas. Tornando o sistema flexível às normas aplicáveis em determinado país, localidade ou tipo de indústria.

4.7.4. Sistemas de Comunicação e Gestão

Numa unidade industrial a diversidade de equipamentos, máquinas e componentes é enorme. Mesmo particularizando no caso das bombas centrífugas essa mesma realidade pode ser verificada com diferentes tipos de bombas centrífugas, diferentes fabricantes e componentes distintos.

Como anteriormente defendido neste trabalho, a manutenção de equipamentos empregando as tecnologias decorrentes da indústria 4.0 é um fator de diferenciação entre empresas de desenvolvimento e conceção de equipamentos. E serão estas empresas, fabricantes equipamentos responsáveis pelos dados produzidos de monitorização dos seus equipamentos numa determinada unidade industrial.

A descentralização dos *softwares* de gestão de manutenção e a sua constante alimentação automática em deterioramento dos atuais estáticos e de carregamento manual é nuclear para a correta monitorização de equipamentos.

Na perspectiva da manutenção das bombas centrífugas é expectável o aparecimento de novos métodos e ferramentas de apoio à manutenção e gestão dos ativos. Como a existência de aplicações web onde é possível verificar o estado do equipamento, tanto na perspectiva produtiva como da sua condição. A supervisão de um equipamento através de uma aplicação web poderá ter uma abordagem localizada, ficando a responsabilidade da manutenção do equipamento na empresa que o adquiriu, ou descentralizada, ficando a responsabilidade do ativo sobre uma empresa prestadora de serviços ou mesmo o fabricante do equipamento.

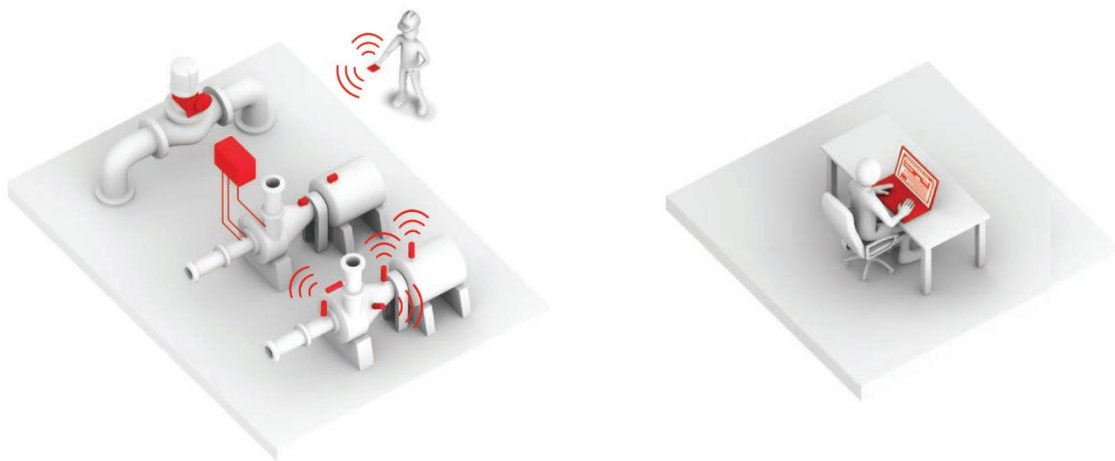


Figura 4.16 - Ilustração de manutenção remota descentralizada e monitorização de manutenção localizada com recurso a aplicações web [87]

O correto carregamento de dados relativos aos ativos produtivos de uma empresa num *software* de gestão de manutenção é determinante para uma gestão de manutenção saudável. Como apresentado no capítulo 2.9.1, a identificação, avaliação e quantificação do nível de risco dos diferentes equipamentos para os processos produtivos e infraestruturas é crucial para a determinação de prioridades. Através da combinação da probabilidade da falha e da consequência de falha, são geridos os recursos e os planos de manutenção de forma a cobrir os equipamentos com maior importância e maior risco.

O formato como é apresentada a informação resultante de todos os dados recolhidos e analisados é um ponto crucial na nova revolução industrial. Para que todas as tarefas de manutenção possam ser mais eficazes é importante a segmentação do estado de condição de cada componente crítico ou subsistema. Será também possível fazer essa segmentação com os diferentes tipos de falha que podem ocorrer no equipamento. Na figura 4.17 é apresentado um exemplo de análise simples e rápida onde se pode verificar um

equipamento de bombagem em bom estado de condição e um segundo com bastantes problemas na sua operacionalidade.

Os sistemas de comunicação e gestão também deverão ser alimentados externamente pelo fabricante do equipamento. Informações como tempos médios para substituição de um componente, prazos para a entrega de *spare parts*, *upgrades* a nível de *software*, melhorias ou otimização do equipamento deverão ser disponibilizadas.

Um grande desafio para a manutenção nas bombas centrífugas será o desenvolvimento de ferramentas que adotem a realidade aumentada, deste modo, intervenções de manutenção terão mais auxílio, dispensando assim a consulta dos manuais de manutenção e tornando-se menos propícias ao erro humano.

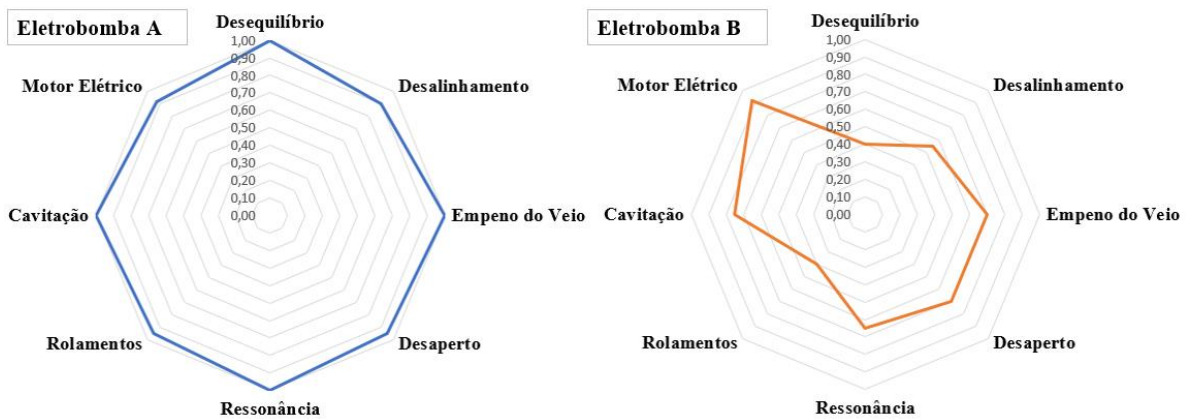


Figura 4.17 - Representação de dois gráficos de radar, Eletrobomba A em funcionamento normal e Eletrobomba B a operar deficientemente;

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Inerente aos desenvolvimentos tecnológicos está o aparecimento de novos modelos de negócio. Hoje em dia, com o desenvolvimento da indústria 4.0 estão a surgir novos modelos de negócio em torno de empresas de produção relacionadas com atividades de manutenção. Porém para responder às exigências e necessidades dos clientes, é necessário assegurar o sucesso operacional e reduzir os custos de produção. Por esse motivo, as empresas devem procurar soluções novas e/ou complementares para as atuais.

As fábricas devem abandonar o conceito que as falhas dos equipamentos só ocorrem após um período de tempo fixo em funcionamento. A manutenção preditiva é uma estratégia de manutenção com elevado potencial de custo-benefício, mas pode ser melhorada com uso de tecnologias integradas nos equipamentos para a deteção inteligente de falhas. Dessa forma, deve ser assumido implementar estratégias de manutenção preditiva e que uma falha pode acontecer numa altura aleatória.

O aparecimento de uma falha no equipamento pode ser localizado nos dados produzidos pelos métodos utilizados para monitorizar o equipamento, fornecendo informações sobre se o equipamento deve ser reparado, substituído ou continuar a operar. A integração de técnicas de manutenção preditiva permitirá às fábricas evitar a substituição desnecessária de equipamentos ou componentes, economizar custos e melhorar a segurança, disponibilidade e eficiência dos processos produtivos.

Contudo ainda existem bastantes melhorias a fazer para que as técnicas de manutenção preditiva se tornem generalizadas, robustas e precisas. Os algoritmos atuais precisam ser melhorados. Atualmente, os algoritmos são baseados em desvios das linhas de referência e é fundamental monitorizar os equipamentos existentes para obter dados novos e complementares. À medida que novos dados sobre as falhas dos equipamentos ficarem disponíveis, o limite para esta condição de falha será avaliado. Quando esses valores forem significativamente diferentes dos dados iniciais, eles serão usados pelo algoritmo no processo de engenharia para melhorar toda a atividade da manutenção.

Sugestões para trabalhos futuros

Um dos maiores desafios para um sucesso à escala global de soluções de manutenção verticalmente integradas será a uniformização da informação, existem muitas normas que

ganharão uma nova dimensão e importância. Pois terão de ser adequadas à tendência da digitalização na indústria. O estudo da aplicabilidade dessas normas para a manutenção na quarta revolução industrial é essencial.

Um trabalho futuro relevante seria a instalação de um modelo físico de uma bomba centrífuga dotada de sensores para que seja possível recolher informação e efetuar a monitorização da mesma. O equipamento deverá ser preparado para estimular falhas como a cavitação, desalinhamentos, desapertos, empenos e outros para que seja possível analisar a informação e com a integração de algoritmos com base no *Machine Learning* melhorar a monitorização do equipamento.

Referências Bibliográficas

- [1] M. Barra, “GM 2015 Sustainability Report,” *General Motors Publications*, p. 4, 2016.
- [2] J. Therme *et al.*, “KETs: Time to act,” *European Commission*, 2015. [Online]. Available: http://effra.eu/attachments/article/125/150626_Second_KETs_HLG_Final_Report.pdf. [Accessed: 09-Jun-2017].
- [3] A. B. Correia, P. Deus, and J. R. Baptista, “Indústria 4.0: Construir a empresa digital,” *PricewaterhouseCoopers Port.*, vol. 1, pp. 1–30, 2016.
- [4] AICEP-Agência para o Investimento e Comércio Externo de Portugal, “Portugal - Ficha País (março 2016),” *Port. Glob. Ficha do País*, 2016.
- [5] COTEC, “Indústria 4.0 - Estratégia Nacional para a Digitalização da Economia,” vol. 1, no. Industria 4.0, 2016.
- [6] Z. Sheng, S. Yang, Y. Yu, A. Vasilakos, J. McCann, and K. Leung, “A survey on the ietf protocol suite for the internet of things: Standards, challenges, and opportunities,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 20, no. 6, pp. 91–98, 2013.
- [7] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, “Understanding the Internet of Things: definition, potentials, and societal role of a fast evolving paradigm,” *Ad Hoc Networks*, vol. 56, pp. 122–140, 2016.
- [8] D. Evans, “The Internet of Things - How the Next Evolution of the Internet is Changing Everything,” *CISCO white Pap.*, no. April, pp. 1–11, 2011.
- [9] J. Holdowsky, M. Mahto, M. E. Raynor, and M. Cotteleer, “Inside the Internet of Things,” *Deloitte University Press*, vol. 1, p. 54, 2015.
- [10] L. Thames and D. Schaefer, “Software-defined Cloud Manufacturing for Industry 4.0,” *Procedia CIRP*, vol. 52, pp. 12–17, 2016.
- [11] Y. Qin, Q. Z. Sheng, N. J. G. Falkner, S. Dustdar, H. Wang, and A. V. Vasilakos,

- “When things matter: A survey on data-centric internet of things,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 64, pp. 137–153, 2016.
- [12] M. T. Hoske, “Industrial internet of things, industry 4.0,” *Control Eng.*, vol. 62, no. 6, pp. 26–35, 2015.
- [13] T. Zhu, S. Dhelim, Z. Zhou, S. Yang, and H. Ning, “An architecture for aggregating information from distributed data nodes for industrial internet of things,” *Comput. Electr. Eng.*, vol. 0, pp. 1–13, 2016.
- [14] S. Wang, J. Wan, D. Zhang, D. Li, and C. Zhang, “Towards smart factory for Industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination,” *Computer Networks*, Elsevier, 18-Jun-2015.
- [15] D. Laney, “Big Data Means Big Business,” *Financ. Times*, pp. 1–29, 2012.
- [16] J. Lee, H. D. Ardakani, S. Yang, and B. Bagheri, “Industrial Big Data Analytics and Cyber-physical Systems for Future Maintenance & Service Innovation,” *Procedia CIRP*, vol. 38, pp. 3–7, 2015.
- [17] J. Lee, E. Lapira, B. Bagheri, and H. an Kao, “Recent advances and trend in predictive manufacturing systems in big data environment,” *Manuf. Lett.*, vol. 1, no. 1, pp. 38–41, 2013.
- [18] E. Olshannikova, A. Ometov, Y. Koucheryavy, and T. Olsson, “Visualizing Big Data with augmented and virtual reality: challenges and research agenda,” *J. Big Data*, vol. 2, no. 1, p. 22, 2015.
- [19] D. Stodder, “Data Visualization and Discovery for better Business Decisions,” *Data Wareh. Inst. Best Pract. Rep.*, no. Third Quarter, 2013.
- [20] Q. Zhang, L. Cheng, and R. Boutaba, “Cloud computing: State-of-the-art and research challenges,” *J. Internet Serv. Appl.*, vol. 1, no. 1, pp. 7–18, 2010.
- [21] A. Botta, W. De Donato, V. Persico, and A. Pescapé, “Integration of Cloud computing and Internet of Things: A survey,” *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 56,

pp. 684–700, 2016.

- [22] J. Qin, Y. Liu, and R. Grosvenor, “A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and beyond,” *Procedia CIRP*, vol. 52, pp. 173–178, 2016.
- [23] D. Wee, R. Kelly, J. Cattell, and M. Breunig, “Industry 4.0 - how to navigate digitization of the manufacturing sector,” *McKinsey Co.*, pp. 1–62, 2015.
- [24] U. Sendler, “Industrie 4.0,” *Beherrschung der Ind. Komplexität mit SysLM*, p. Online-Ressource (XII, 144 S. 71 Abb, online resou, 2013.
- [25] M. Brettel, N. Friederichsen, and M. Keller, “How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An industry 4.0 perspective,” *Int. J.*, vol. 8, no. 1, pp. 37–44, 2014.
- [26] C. Giannetti and R. S. Ransing, “Risk based uncertainty quantification to improve robustness of manufacturing operations,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 101, pp. 70–80, 2016.
- [27] Deloitte, “Industry 4.0. Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies,” *Deloitte*, pp. 1–30, 2015.
- [28] U. Dombrowski and T. Wagner, “Mental strain as field of action in the 4th industrial revolution,” *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 100–105, 2014.
- [29] H. (Deutsche P. A. Henning, Kagermann(National Academy of Science and Engineering). Wolfgang, Wahlster (German Research Center for Artificial Intelligence). Johannes, “Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0,” *Final Rep. Ind. 4.0 WG*, no. April, p. 82, 2013.
- [30] T. Stock and G. Seliger, “Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0,” *Procedia CIRP*, vol. 40, no. Icc, pp. 536–541, 2016.
- [31] W. Bauer, M. Hämmerle, S. Schlund, and C. Vocke, “Transforming to a Hyper-connected Society and Economy – Towards an ‘Industry 4.0,’” *Procedia Manuf.*, vol. 3, no. Ahfe, pp. 417–424, 2015.

- [32] R. Fej, R. K. Mobley, and D. J. Wikoff, *Maintenance Engineering Handbook*, Seventh Ed., vol. 7. McGraw-Hill Education: New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto, 2008.
- [33] A. M. Smith, *Reliability-Centered Maintenance*, 1993rd ed. Mcgraw-Hill, 2015.
- [34] R. Ahmad and S. Kamaruddin, "An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 63, no. 1, pp. 135–149, 2012.
- [35] A. Alrabghi and A. Tiwari, "A novel framework for simulation-based optimisation of maintenance systems," *Int. J. Simul. Model.*, vol. 15, no. 1, pp. 16–28, 2016.
- [36] A. Abreu, "Apontamentos da Unidade Curricular Manutenção Produtiva Total e Gestão Lean," Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2016.
- [37] IPQ, "NP EN 13306:2007 - Terminologia da manutenção." pp. 1–37, 2007.
- [38] J. Sobral, "Apontamentos da Unidade Curricular Gestão da Manutenção," Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013.
- [39] National Aeronautics and Space Administration, "Reliability-Centered Maintenance Guide: For Facilities and Collateral Equipment," Washington, D.C., 2008.
- [40] Prüftechnik, "An Engineers Guide to Shaft Alignment, Vibration Analysis, Dynamic Balancing & Wear Debris Analysis," Ismaning, 2002.
- [41] R. S. Beebe, *Predictive Maintenance of Pumps Using Condition Monitoring*, First. Elsevier, 2004.
- [42] C. Sequeira, "Sensores para medições de Vibrações Mecânicas – Acelerómetros," *Revista Manutenção*, vol. 116, Lisbon, p. 4, 2013.
- [43] R. K. Mobley, *An Introduction to Predictive Maintenance*, Second Edi. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2002.

- [44] P. K. Behera and B. S. Sahoo, "Leverage of Multiple Predictive Maintenance Technologies in Root Cause failure analysis of Critical Machineries," *Procedia Eng.*, vol. 144, pp. 351–359, 2016.
- [45] API - American Petroleum Institute, *Risk-Based Inspection: API Recommended Practice 580*, Second Edi., no. November. 2009.
- [46] Instituto Português da Qualidade, "NP EN 4410 (2004)– Sistemas de Gestão da Segurança e Saúde do Trabalho," *Doc. impressos*, vol. 2001, pp. 1–7, 2008.
- [47] R. Kauer, L. Fabbri, R. Giribone, and J. Heerings, "Risk Acceptance Criteria and Regulatory Aspects," *Omni*, vol. 1, no. 2, pp. 1–11, 2002.
- [48] S. Borris, *Total Productive Maintenance: Proven strategies and techniques to keep equipment running at peak efficiency*, First. McGraw-Hill Education: New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto, 2005.
- [49] M. Gopalakrishnan, J. Bokrantz, T. Ylipaa, and A. Skoogh, "Planning of maintenance activities - A current state mapping in industry," *Procedia CIRP*, vol. 30, pp. 480–485, 2015.
- [50] IPQ, "NP EN 15341 Manutenção: Indicadores de desempenho da manutenção (KPI)," p. 30, 2009.
- [51] Bosch Software Innovations, "Industrial Internet: Putting the vision into practice," pp. 1–14, 2015.
- [52] MathWorks, "Introducing Machine Learning," Natick, 2008.
- [53] MathWorks, "Getting Started with Machine Learning," Natick, 2008.
- [54] MathWorks, "Applying Supervised Learning," Natick, 2008.
- [55] MathWorks, "Applying Unsupervised Learning," Natick, 2008.
- [56] MathWorks, "Artificial Neural Network and Supervised," Natick, 2008.

- [57] Y.-S. Park and S. Lek, "Developments in Environmental Modelling," in *Ecological Model Types*, vol. 79, Amsterdam: Elsevier B.V, 2016, pp. 123–140.
- [58] R. Roy, R. Stark, K. Tracht, S. Takata, and M. Mori, "Continuous maintenance and the future - Foundations and technological challenges," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 65, no. 2, pp. 667–688, 2016.
- [59] M. Antoine and G. Nani, "Improving operations and maintenance with remote optimization," *Remote. but close. ABB*, pp. 2–7, 2017.
- [60] A. Costa and F. Mendes, "Impressão 3D - Processos , Industria e Educação," *Cenfim*, pp. 1–3.
- [61] J. Zhu, S. K. Ong, & A. Y. C. Nee, and A. Y. C. Nee, "A context-aware augmented reality assisted maintenance system," *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 28, no. 2, pp. 213–225, 2015.
- [62] L. E. Garza *et al.*, "Augmented reality application for the maintenance of a flapper valve of a fuller-kynion type m pump," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 25, pp. 154–160, 2013.
- [63] M. Xia, T. Li, Y. Zhang, and C. W. de Silva, "Closed-loop design evolution of engineering system using condition monitoring through internet of things and cloud computing," *Comput. Networks*, vol. 101, pp. 5–18, 2015.
- [64] G. Reinhart and F. Geiger, "Adaptive scheduling by means of product-specific emergence data," *IEEE Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manag.*, pp. 347–351, 2011.
- [65] J. Soder, T. Bauernhansl, and M. Fass, "A White Paper by: SEW-EURODRIVE," 2006.
- [66] P. Hehenberger, B. Vogel-heuser, D. Bradley, B. Eynard, T. Tomiyama, and S. Achiche, "Computers in Industry Design , modelling , simulation and integration of cyber physical systems : Methods and applications," *Comput. Ind.*, vol. 82, pp. 273–289, 2016.

- [67] J. Lee, F. Wu, W. Zhao, M. Ghaffari, L. Liao, and D. Siegel, "Prognostics and health management design for rotary machinery systems — Reviews , methodology and applications," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 42, no. 1–2, pp. 314–334, 2014.
- [68] C. Li, "Fuzzy determination of informative frequency band for bearing fault detection," vol. 30, pp. 3513–3525, 2016.
- [69] M. D. Anis, "A Defect Diagnosis in Bearings of a Centrifugal Pump using Vibration Analysis," pp. 1–4, 2017.
- [70] Z. Shi and J. Lee, "Prognostics and Health Management Solution Development in LabVIEW : Watchdog Agent ® Toolkit and Case Study," pp. 1–6, 2016.
- [71] R. H. I. (U. S. . Ferman, "Optimizing Pumping Systems: A Guide to Improved Energy Efficiency, Reliability, and Profitability," *Pump Syst. Matter™ Hydraul. Inst.*, vol. 5, no. 3, p. 254, 2008.
- [72] Bombas Grundfos Portugal, "Manual de Engenharia - GRUNDFOS SISTEMAS DE PRESSURIZAÇÃO," 1986.
- [73] EFAFLU, "Catálogo Bombas EN733 NNJ - EFAFLU." Efaflu - Bombas e Ventiladores, Póvoa do Varzim, p. 24, 2008.
- [74] Bombas GRUNDFOS Portugal, "Instruções de manutenção: Eletrobombas NB, NK." Grundfos, Lisbon, p. 32, 2004.
- [75] PRUFTECHNIK, "ROTALIGN® touch: Precision Meets Connectivity," no. September. PRUFTECHNIK Condition Monitoring GmbH, Ismaning, p. 8, 2015.
- [76] S. Mills, "A new standard for Condition Monitoring," *Plant Maint.*, no. June, pp. 13–14, 2011.
- [77] International Organization for Standardization, "ISO 17359:2002 - Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines," *Int. Organ. Stand.*, vol. 2002, no. 50, 2002.
- [78] I. O. for Standardization, "ISO 10816-2:2001 - Mechanical vibration—Evaluation

of machine vibration by measurements on non-rotating parts," *Int. Organ. Stand.*, vol. 2001, 2001.

- [79] International Organization for Standardization, "ISO 10816-7:2009 - Rotodynamic pumps for industrial applications, including measurements on rotating shafts," no. 138227, 2009.
- [80] Grundfos, "Remote monitoring for pressure boosting MPC and Grundfos Remote Management." Grundfos, Bjerringbro, p. 2, 2012.
- [81] KSB, "Industry 4 .0: KSB takes on the production of the future." KSB Aktiengesellschaft, Frankenthal, p. 8, 2017.
- [82] S. Karmakar, S. Chattopadhyay, M. Mitra, and S. Sengupta, "Induction Motor Fault Diagnosis," no. i, 2016.
- [83] A. B. B. Ability and S. Sensor, "ABB Ability™ Smart Sensor Condition monitoring solution for low voltage motors."
- [84] O. Tonks and Q. Wang, "The detection of wind turbine shaft misalignment using temperature monitoring," *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 71–79, 2017.
- [85] D. Kernan, "Pumps 101 : Operation , Maintenance and Monitoring Basics," *ITT White Pap.*, pp. 1–10, 2009.
- [86] M. J. Daigle, A. Bregon, and I. Roychoudhury, "Distributed Prognostics Based on Structural Model Decomposition," vol. 63, no. 2, pp. 495–510, 2014.
- [87] FLOWSERVE, "Predictive Analytics for Pumps, Valves and Seals," *Intelligent Performance Solutions*, 2017.