

**Análise Modal de Falha e Efeitos num contexto de Indústria  
4.0 – caso de estudo *The Navigator Company***

**António Macedo Paz Ferreira**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Mecânica**

Orientador: Prof. Paulo Miguel Nogueira Peças

**Júri**

Presidente: Prof. Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista

Orientador: Prof. Paulo Miguel Nogueira Peças

Vogais: Prof.<sup>a</sup> Virgínia Isabel Monteiro Nabais Infante

Eng. Duarte Miguel Pinho da Silva Lelo Filipe

**Julho 2020**



## Agradecimentos

Este espaço é dedicado às pessoas que contribuíram para que concluísse esta importante etapa do meu percurso académico.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à *The Navigator Company* e ao Instituto Superior Técnico pela oportunidade de realizar esta dissertação.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Paulo Peças, pela disponibilidade demonstrada ao longo destes meses e partilha de conhecimento ao longo da dissertação

Um especial agradecimento ao Eng. Duarte Filipe por todo o apoio e colaboração demonstrados, por toda a informação disponibilizada que tornou possível a realização deste trabalho, pela ajuda na integração na empresa e pela aprendizagem que me proporcionou.

Agradeço aos meus pais, Paula e Virgílio, por tudo o que me proporcionaram ao longo da minha vida, pois foi através do apoio e carinho demonstrado por eles que me tornei na pessoa que sou hoje. Agradeço também aos meus irmãos e avó, Maria, Virgílio e Mariana que estiveram presentes em todos os momentos difíceis da minha vida.

Agradeço também aos Engenheiros da área da Manutenção da *Navigator*, Manuel Cipriano, Hugo Oliveira, Filipe Caixinha, Hugo Frade e Jorge Almeida, pela integração na empresa e apoio prestado.

Por fim, quero agradecer à minha família em geral e amigos, que sempre me apoiaram e encorajaram ao longo da realização desta dissertação.

## Resumo

O conceito “Manutenção” tem vindo a alterar-se nos últimos anos, impondo-se como uma área fundamental em muitas empresas e indústrias. Com o crescente aumento do consumismo, da produtividade das indústrias e da complexidade dos equipamentos, é crucial que as organizações consigam um desempenho eficaz e eficiente da sua atividade com o menor custo possível. Desta forma, é essencial o uso de metodologias de manutenção que permitam a otimização de processos e implementação de boas práticas.

Assim, no âmbito da gestão da manutenção, a presente dissertação pretende promover uma melhoria na gestão das ações de manutenção preventiva dos equipamentos do grupo *The Navigator Company*. Esta ação tem como objetivo a futura transição da lógica preventiva atualmente utilizada para uma lógica preditiva.

Destacam-se ainda soluções que permitam uma melhor monitorização e análise do desempenho da manutenção preventiva nos equipamentos de bombeamento de média consistência. Estas irão ainda servir de apoio para a construção de um *Digital Twin* do equipamento de estudo e, futuramente, para a catalogação dos alarmes de falha do equipamento.

No caso do estudo realizado, é feita uma análise FMECA (análise dos modos e efeitos de falha críticos), tendo em conta fatores como a frequência de ocorrência, a detetabilidade e a gravidade que permitirão uma análise crítica às falhas dos ativos e a respetiva priorização. Da análise efetuada resultou uma tabela FMECA para uma bomba de média consistência, juntamente com as propostas de ação preventivas com o objetivo da restituição da fiabilidade e disponibilidade dos equipamentos desta tipologia.

**Palavras-chave:** Gestão de Ativos, Manutenção, FMECA, Indústria 4.0, *Digital Twin*

## **Abstract**

The “Maintenance” concept has been evolving throughout the years, standing as a fundamental area in industrial companies. Considering the consumerism exponential increase, the industries productivity and the equipment complexity, it is of great importance that organizations achieve effective and efficient performance of their activity at the lowest attainable cost. Therefore, it is essential to apply maintenance methodologies to optimize processes and implement good practices.

In the scope of maintenance management, the goal of this dissertation is to improve the preventive maintenance management of The Navigator Company Group’s equipment. This will ease the transition from the currently used preventive to a predictive methodology.

It is also important to highlight solutions for better monitoring and analysis of the preventive maintenance performance in pumping equipment of medium consistency. These will support the implementation of a Digital Twin on the discussed equipment and the upcoming categorization of equipment failure alarms.

In this case study, a Failure Mode Effects and Criticality Analysis (FMECA) is performed considering several factors such as the frequency of occurrence, detectability, and severity. This analysis allows a critical evaluation on asset failures and their respective prioritization. From the results obtained, a FMECA table for a medium consistency pump is created along with preventive action proposals aiming to restore the reliability and availability of this type of equipment.

**Keywords:** Asset Management, Maintenance, FMECA, Industry 4.0, Digital Twin



# Índice

AGRADECIMENTOS.....	III
RESUMO.....	IV
ABSTRACT.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	X
NOMENCLATURA.....	XI
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	1
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	2
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
2.1. GESTÃO DE ATIVOS FÍSICOS.....	3
2.1.1. <i>Conceito e Evolução</i> .....	3
2.1.2. <i>Ciclo de vida de um ativo</i> .....	3
2.2. MANUTENÇÃO.....	4
2.2.1. <i>Evolução da Função Manutenção</i> .....	5
2.2.2. <i>Conceito Manutenção</i> .....	6
2.2.3. <i>Objetivos Manutenção</i> .....	6
2.2.4. <i>Tipos de Manutenção</i> .....	7
2.3. ANÁLISE FMECA.....	9
2.3.1. <i>Análise FMEA</i> .....	9
2.3.2. <i>Análise de criticidade</i> .....	10
2.4. INDÚSTRIA 4.0.....	16
2.4.1. <i>Visão I4.0</i> .....	16
2.4.2. <i>Pilares da I4.0</i> .....	17
2.4.3. <i>Perspetiva Nacional e Global</i> .....	21
2.4.4. <i>Perspetiva futura</i> .....	22
2.5. <i>DIGITAL TWIN</i> .....	22
2.5.1. <i>Conceito DT</i> .....	23
2.5.2. <i>Níveis de Integração</i> .....	23
2.5.3. <i>Mapeamento físico-digital e modelo de hierarquização em DTs</i> .....	25
2.5.4. <i>Modelação de DT – Gestão de Ativos</i> .....	25
<b>3. CASO DE ESTUDO A ABORDAGEM UTILIZADA.....</b>	<b>26</b>
3.1. APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO.....	26
3.2. <i>THE NAVIGATOR COMPANY</i> .....	28
3.3. CONTEXTO OPERACIONAL.....	28

3.4. ANÁLISE FUNCIONAL .....	30
3.5. ANÁLISE DO HISTÓRICO EXISTENTE .....	31
3.5.1. <i>Ordens e Notas de Trabalho</i> .....	31
3.5.2. <i>Downtimes</i> .....	33
3.5.3. <i>Process Flow Diagram</i> .....	33
3.6. VERIFICAÇÃO DO PLANO DE MANUTENÇÃO EXISTENTE .....	35
<b>4. ANÁLISE FMECA .....</b>	<b>37</b>
4.1. ANÁLISE FMEA .....	37
4.2. TAREFAS EXISTENTES .....	40
4.3. ANÁLISE DE CRITICIDADE .....	41
4.4. PROPOSTA DE MITIGAÇÃO DE FALHAS .....	44
<b>5. DIGITAL TWIN .....</b>	<b>47</b>
5.1. SIMULAÇÃO .....	47
5.2. RESULTADOS .....	49
<b>6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>51</b>
6.1. CONCLUSÕES .....	51
6.2. LIMITAÇÕES DESTE TRABALHO .....	53
6.3. PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....	53
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>55</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>58</b>
ANEXO A – INFORMAÇÃO ADICIONAL DA BOMBA P049 .....	58
ANEXO B – ORDENS DE TRABALHO DA BOMBA P049 .....	60
ANEXO C – NOTAS DE TRABALHO DA BOMBA P049 .....	63
ANEXO D – <i>DOWNTIMES</i> DA BOMBA P049 .....	66
ANEXO E – PLANO DE MANUTENÇÃO EXISTENTE DA BOMBA P049 .....	67
ANEXO F – PONTOS DE LUBRIFICAÇÃO DA BOMBA P049 .....	68
ANEXO G – ROTINAS DE VIBRAÇÃO .....	69
ANEXO H – PONTOS DE VIBRAÇÃO DA BOMBA P049 .....	71
ANEXO I – TABELA FMECA .....	72



## Lista de Figuras

Figura 1 - Gestão do ciclo de vida de um ativo, adaptado de [4].....	4
Figura 2 - Manutenção em contexto, adaptado de [14] .....	7
Figura 3 - Tipos de Manutenção, adaptado e elaborado a partir de [5] [11] [13].....	8
Figura 4 - Fluxograma da análise FME(C)A, adaptado de [19] .....	12
Figura 5 - Carta FME(C)A, adaptado de [5] .....	15
Figura 6 - As 4 etapas da Industrialização, adaptado de [27].....	17
Figura 7 - Os 9 pilares do avanço tecnológico, adaptado de [28].....	18
Figura 8 - Perspetiva global e nacional da I4.0 [32].....	22
Figura 9 - Fluxo de dados em Digital Model, adaptado de [34] .....	24
Figura 10 - Fluxo de dados em Digital Shadow, adaptado de [34] .....	24
Figura 11 - Fluxo de dados em Digital Twin, adaptado de [34].....	25
Figura 12 - Esquema da estrutura da dissertação .....	27
Figura 13 - Circuito de Produção de pasta de papel.....	28
Figura 14 - Exemplo do estado físico da madeira na fase Branqueamento [41] .....	29
Figura 15 - Circuito de pasta e filtrados da Prensa 2 [41].....	30
Figura 16 - Bomba centrífuga de média consistência .....	31
Figura 17 - Screenshot da linha de processo da Prensa 2 através do DCS .....	34
Figura 18 - Fases do projeto DT .....	47
Figura 19 - Diagrama DT P049 .....	48
Figura 20 - Trabalho futuro DT .....	50

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Classificação do índice de gravidade, adaptado de [19] .....	13
Tabela 2 - Classificação do índice de ocorrência, adaptado de [19] .....	13
Tabela 3 - Classificação do índice de detetabilidade, adaptado de [19].....	14
Tabela 4 - Matriz de Risco adaptado de [18] .....	15
Tabela 5 – Listagem das ordens de trabalho .....	32
Tabela 6 – Listagem das notas de trabalho .....	32
Tabela 7 - Excerto do dado histórico das variáveis operacionais medidas no contexto operacional da bomba P049 .....	35
Tabela 8 – Modos de Falha dos componentes da bomba P049.....	39
Tabela 9 – Tarefas existentes dos componentes da bomba P049 .....	41
Tabela 10 - Parametrização do índice de gravidade .....	41
Tabela 11 - Parametrização do índice de ocorrência .....	42
Tabela 12 - Parametrização do índice de detetabilidade .....	42
Tabela 13 - Análise de criticidade dos modos de falha da bomba P049 .....	43
Tabela 14 - Tarefas de manutenção propostas para a bomba P049 .....	45

# Nomenclatura

**AMS** – Ação Manutenção Sistemática

**AMS-PA** – Ação Manutenção Sistemática na Paragem Anual

**ASG** – Ação Sensorial Genérica

**CPPS** – *Cyber Physical Production System*

**CPS** – *Cyber Physical System*

**CT** – Custo Total falhas

**DCS** – *Distributed Control System*

**DT** – *Digital Twin*

**END** – Ensaio Não Destrutivo

**FDM** – *Fused Deposition Method*

**FMEA** – *Failure Mode and Effects Analysis*

**FMECA** – *Failure Mode Effects and Criticality Analysis*

**I4.0** – Indústria 4.0

**IAM** – *The Institute of Asset Management*

**IEC** – *International Electrotechnical Commission*

**IoT** – *Internet of Things*

**IT** – *Information Technology*

**KPI** – *Key Performance Indicator*

**PB** – Produção Branqueamento

**PFD** – *Process Flow Diagram*

**PP** – Perdas Produção

**RPN** – *Risk Priority Number*

**SLM** – *Selective Laser Melting*

**SLS** – *Selective Laser Sintering*

**tAD** – Toneladas de celulose seca ao ar

# 1. Introdução

## 1.1 Enquadramento e Motivação

Com uma posição de grande relevo no mercado internacional da pasta e do papel, a *The Navigator Company* é uma das mais fortes marcas de Portugal no mundo. Tem vindo a sobressair pela aposta em processos e aplicações mais tecnológicas em algumas linhas de produção e outros equipamentos mais nucleares, de forma a otimizar a sua produção. Essa transformação tecnológica implica a existência de metodologias para a sua aplicação e posterior manutenção dos ativos.

O setor onde a empresa se insere caracteriza-se por ser de laboração contínua (24/7) onde a disponibilidade das infraestruturas do processo produtivo é crucial, levando a entidade responsável pela gestão da manutenção a concentrar esforços na adoção de boas práticas que permitam assegurar um bom desempenho dos seus ativos, ao mais baixo custo e com riscos controlados, sendo fundamental não comprometer os níveis de qualidade de serviço exigidos. Esta utilização contínua faz com que a gestão da manutenção seja encarada como um fator de grande importância e contributo crítico para o funcionamento contínuo das instalações.

Este trabalho surge no âmbito da gestão de ativos e manutenção, pretendendo verificar se o plano de manutenção preventivo existente para equipamentos de bombeamento visa mitigar os seus modos de falha mais críticos. O desenvolvimento serviu de base de conhecimento para a construção, em curso na empresa, de um *Digital Twin* do equipamento (representação digital de um meio físico que tem como objetivo uma analítica avançada) e catalogação dos alarmes de falha do equipamento.

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho é dedicado ao desenvolvimento de uma ferramenta para auxiliar a tomada de decisões do ponto de vista de manutenção da empresa *The Navigator Company*, tendo sido escolhida uma bomba de média consistência no presente caso de estudo, com o objetivo de replicação futura para equipamentos da mesma tipologia. O desenvolvimento deste é baseado num método de gestão, que visa assegurar a fiabilidade do equipamento através da análise dos modos e efeitos de falha críticos (FMECA – *Failure Mode Effects and Criticality Analysis*). Deste modo, os objetivos do presente trabalho são:

- Analisar o estado de manutenção do equipamento de bombeamento em estudo (notas e ordens de trabalho);
- Estudar as condições operativas do circuito de pasta de papel e as variáveis de controlo de processo do equipamento;
- Estudar o método de análise FMECA;
- Analisar, identificar e elaborar uma lista dos potenciais modos de falha em equipamentos de bombeamento;

- Quantificar a criticidade dos potenciais modos de falha;
- Analisar o plano de manutenção existente e propor alterações que visem mitigar os modos de falha mais críticos identificados no estudo realizado.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

A estrutura da dissertação conta com seis capítulos. O primeiro capítulo, Introdução, contém a necessidade da presente dissertação, que reflete a vontade do grupo *The Navigator Company* melhorar a sua estratégia e processos de Manutenção, baseados no conhecimento empírico e fortalecidos pela utilização das mais recentes tecnologias.

O segundo capítulo constitui a revisão bibliográfica, onde são apresentados os conceitos de Gestão de Ativos, Manutenção e Análise FMECA. São ainda abordados os temas Indústria 4.0 e *Digital Twin*, passos subsequentes do estudo realizado e que se tornam pertinentes de apresentar, atendendo ao seu grau de inovação e potencial de aplicação no meio industrial.

No terceiro capítulo é apresentado o desenvolvimento do caso de estudo, sendo feita a descrição do trabalho prático efetuado sobre a bomba de média consistência e a recolha de dados sobre o mesmo.

No quarto capítulo é apresentada a análise FMECA com a identificação dos modos, causas e efeitos de falha, a análise de criticidade e por fim, uma proposta de melhoria do plano de Manutenção, que vise a mitigação de falhas potenciais mais críticas, identificadas pela análise.

No quinto capítulo é descrita a contribuição do caso de estudo para a construção do *Digital Twin* e posterior catalogação dos alarmes de falha provenientes do *Digital Twin*, indicando o contributo desta dissertação para a construção de um modelo preditivo.

O sexto capítulo expõe as conclusões do trabalho e apresenta recomendações para trabalhos futuros.

## 2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são abordados conceitos teóricos que serviram de suporte ao desenvolvimento da dissertação, bem como de possíveis futuros trabalhos. Numa primeira parte definem-se conceitos como Gestão de Ativos, Manutenção, Fiabilidade, Análise FMECA, sendo por fim apresentados os conceitos Indústria 4.0 e *Digital Twin*.

### 2.1. Gestão de Ativos Físicos

A cada ano, biliões de euros são gastos em manutenção de equipamentos de engenharia por todo o mundo, e isso significa que existe de facto uma necessidade definitiva de práticas eficazes de gestão e manutenção de ativos físicos que possam influenciar positivamente os fatores de sucesso de uma empresa [1].

#### 2.1.1. Conceito e Evolução

Um ativo é definido como “um bem, uma coisa ou uma entidade, que tem valor potencial ou real para uma organização, podendo este valor, para a mesma organização, variar ao longo da vida do ativo” [2].

Por sua vez, a Gestão de Ativos é definida como a “atividade coordenada de uma organização para perceber e produzir valor a partir dos ativos. A percepção e produção do valor envolvem normalmente o balanço dos custos, riscos, oportunidades e benefícios de desempenho e a atividade pode incluir a abordagem, o planeamento, os planos e a sua implementação” [2].

No entanto, de entre as várias definições existentes do conceito Gestão de Ativos, a que mais se adequa à presente dissertação será a definição feita pelo *Institute of Asset Management (IAM)* [3], traduzindo-se na “arte e a ciência de tomar decisões acertadas e otimizar a entrega de valor pois envolve o balanço entre custos, oportunidades e riscos tendo em conta o desempenho desejado desses mesmos ativos, de forma a atingir os objetivos organizacionais. Esta gestão permite uma organização e análise das necessidades e o desempenho dos seus ativos em diferentes níveis, permitindo ainda a aplicação de abordagens analíticas ao longo do ciclo de vida dos seus ativos”.

#### 2.1.2. Ciclo de vida de um ativo

A maximização do desempenho de um ativo é atingida tendo em conta todo o seu ciclo de vida. Este ciclo compreende as seguintes fases, representadas na Figura 1 [4]:

- **Fase de projeto** – Planeamento e conceção do ativo. Análise dos possíveis modos de falha, decisão da fiabilidade requerida através da definição dos requisitos funcionais, políticas de desempenho e manutenção do ativo com os custos admitidos e com o nível de segurança desejado.

- **Fase de fabricação** – Construção ou aquisição do ativo. As considerações de fiabilidade encontram-se interligadas com o Controlo de Qualidade, de modo a assegurar que o ativo cumpre os requisitos definidos na fase anterior.
- **Fase de operação** – Período de vida útil em serviço do ativo. Observação do comportamento real do ativo, permitindo nesta fase assegurar a operacionalidade eficaz das funções destinadas do ativo. Ajustamento do programa de manutenção preventiva e dos tempos de intervenção, introdução de melhorias no projeto ou fabricação de próximos ativos e estabelecimento de políticas de gestão de stocks.
- **Fase de desativação** – Fim do período de vida útil do ativo. Desativação, substituição ou alocação do ativo noutra fim, tendo qualquer destas ações variados custos e consequências, que devem ser ponderados.

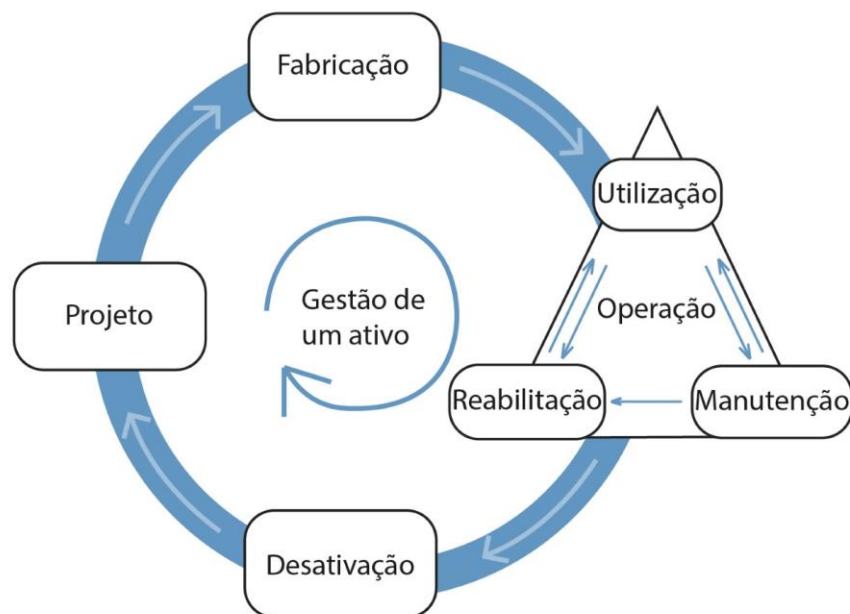


Figura 1 - Gestão do ciclo de vida de um ativo, adaptado de [4]

## 2.2. Manutenção

A manutenção não pode ser dissociada da Gestão de Ativos, visto que se enquadra na fase de operação do ciclo de vida de um ativo, e a sua necessidade resulta da fase de projeto do equipamento. Assim, o entendimento da manutenção é visto em várias referências como uma estratégia global de gestão de ativos que é responsável pela manutenção do estado de condição de um ativo dentro dos valores requeridos pelo utilizador [4] [5] [6].

Ao longo do tempo, a manutenção tem vindo a evoluir no sentido de acompanhar o desenvolvimento científico e tecnológico da nossa sociedade. Com a crescente necessidade de aumentar a segurança de produção de produtos ou serviços com tecnologias mais sofisticadas e com tempos de vida mais curtos, surgiu a obrigação da utilização de sistemas produtivos mais fiáveis para assegurar uma boa

manutenção com a diminuição dos riscos presentes, traduzindo-se assim numa maior disponibilidade e fiabilidade de produção por parte do sistema [5].

A manutenção é uma função de apoio altamente progressiva cujos “clientes” são internos. É um fator importante de resposta, qualidade, segurança, produtividade e cumprimento de prazos, sendo assim um setor-chave para o sucesso competitivo da área de produção [7].

Atualmente, os equipamentos são cada vez mais complexos e sofisticados. Abrangem conhecimentos de áreas desde a mecânica e eletrónica até à biologia, dificultando assim as tarefas de manutenção de quem as opera. Posto isto, o responsável da manutenção é obrigado a ter ao seu dispor um conjunto de instrumentos e conhecimentos que lhe permita a execução das tarefas que asseguram a disponibilidade necessária dos equipamentos à sua responsabilidade. Sem a manutenção dos equipamentos utilizados diariamente, não seria possível ter a capacidade de produção e de criação de valor sustentado [5].

### **2.2.1. Evolução da Função Manutenção**

Nos últimos 50 anos, a função manutenção tem vindo a evoluir de forma consistente e exponencial.

Até ao início do século XX, “avaria” significava “paragem dos equipamentos”. Durante esse período, o conceito “manutenção” era aplicado à operação associada à reparação das avarias dos equipamentos [5], tendo assim ganho o nome de manutenção corretiva.

O aparecimento de um número elevado de avarias e a pressão das companhias de seguros sobre as empresas no sentido de as obrigarem a reduzir o número de avarias através de uma melhor estruturação da tarefa de manutenção, levou à autonomia da função manutenção no seio das empresas. A década de 1920, caracterizada por uma intensa atividade industrial devido à implementação da produção em série na indústria automóvel (Revolução Tecnológica), e a Segunda Guerra Mundial, com a necessidade de manter os níveis de produção elevados, mostraram a importância que a função manutenção tem no sucesso produtivo das indústrias [5].

O pós-guerra acompanhado do desenvolvimento industrial e da evolução da aviação comercial e da indústria eletrónica descurou o tempo excessivo para diagnóstico de falhas, expressando a necessidade da composição de uma equipa, Engenharia da Manutenção, com o objetivo de planeamento e controlo de manutenção e análises causa-efeito, confirmando assim o peso que a manutenção tem no interior de uma empresa [5]. Dando continuidade ao espaço temporal, em 1970 surge a terceira revolução industrial, a Revolução Digital, com a tecnologia a tornar-se cada vez mais importante para a indústria, criando linhas de produção automatizadas e indústrias de processamento controladas principalmente pela tecnologia digital [8].

Depois de três grandes revoluções industriais, a primeira, Revolução Industrial, onde foi trocado o trabalho manual pela maquinaria a vapor para produção, a Revolução Tecnológica e a Revolução Digital, em 2013 foi apresentada pela Alemanha uma visão para a próxima revolução industrial, Indústria 4.0. O conceito base desta próxima revolução passa por tornar a fábrica numa “fábrica inteligente”, isto é, com toda a cadeia de fornecimento e estrutura acessível e controlada pela Internet



[8]. Com isto, a manutenção mais uma vez irá ter que inovar, no sentido de acompanhar esta próxima revolução industrial, vindo talvez a ramificar mais um tipo de manutenção à luz da Indústria 4.0.

### **2.2.2. Conceito Manutenção**

A palavra “manutenção” é definida pelo dicionário como sendo o “ato ou efeito de manter”. No entanto têm-se encontrado diferentes significados provenientes de diferentes autores especializados na área, mas sendo o propósito final transversal.

De uma forma abrangente, Moubray [9] define a manutenção como sendo a área que “assegura que os ativos físicos continuem a fazer aquilo que os seus utilizadores querem que eles façam”. De forma similar, Blischke e Murthy [10] definem a manutenção como “quaisquer ações que alterem um produto ou sistema de modo a mantê-lo em condições operacionais ou devolvê-lo a uma condição operacional, se estiver em condição de falha”. Por sua vez, em conformidade com a norma europeia EN 13306 [11], “manutenção é a combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão aplicadas durante o ciclo de vida de um bem destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que pode desempenhar a função requerida”, sendo assim uma definição mais concreta e específica. Pinto [12] partilha da mesma visão, mas abrangendo também uma vertente económica-financeira, sendo assim a manutenção o “combinar ações de gestão, técnicas e económicas, aplicadas aos bens para otimização do seu ciclo de vida”. Já Cabral [13] afirma que a manutenção é o “conjunto das ações destinadas a assegurar o bom funcionamento das máquinas e das instalações, garantindo que estas são intervencionadas nas oportunidades e com o alcance certo por forma a evitar que avariem ou baixem de rendimento e, no caso de tal acontecer, que sejam repostas em boas condições de operacionalidade com a maior brevidade, tudo a um custo global otimizado”.

Em termos genéricos, pode-se considerar então que a manutenção é o conjunto de ações diretas ou indiretas sobre um sistema ou unidade de forma a preservar a continuidade do funcionamento pretendido pelo utilizador.

Independentemente da definição, a manutenção industrial é fundamental para o sucesso competitivo de qualquer empresa na sua área de negócio. Por isso, a gestão da manutenção é necessária para a obtenção de uma prática de manutenção num contexto complexo e dinâmico. Segundo a norma europeia EN 13306 [11], Gestão da Manutenção são “todas as atividades de gestão que determinam os objetivos, a estratégia e as responsabilidades respeitantes à manutenção e que os implementam por meios, tais como o planeamento, o controlo e supervisão da manutenção e a melhoria de métodos na organização, incluindo os aspetos económicos”. De outro modo, podemos afirmar que a gestão da manutenção é o conjunto de ações de gestão sobre o equipamento, com vista à otimização do custo global do ativo.

### **2.2.3. Objetivos Manutenção**

De uma visão pragmática, o principal objetivo da manutenção é a “otimização do ciclo de vida total do ativo” (Figura 2) que significa maximizar a disponibilidade e fiabilidade dos ativos físicos e dos

equipamentos, de modo a produzirem a quantidade desejada de produtos ou resultados de uma forma atempada e com o mínimo de custo [14].

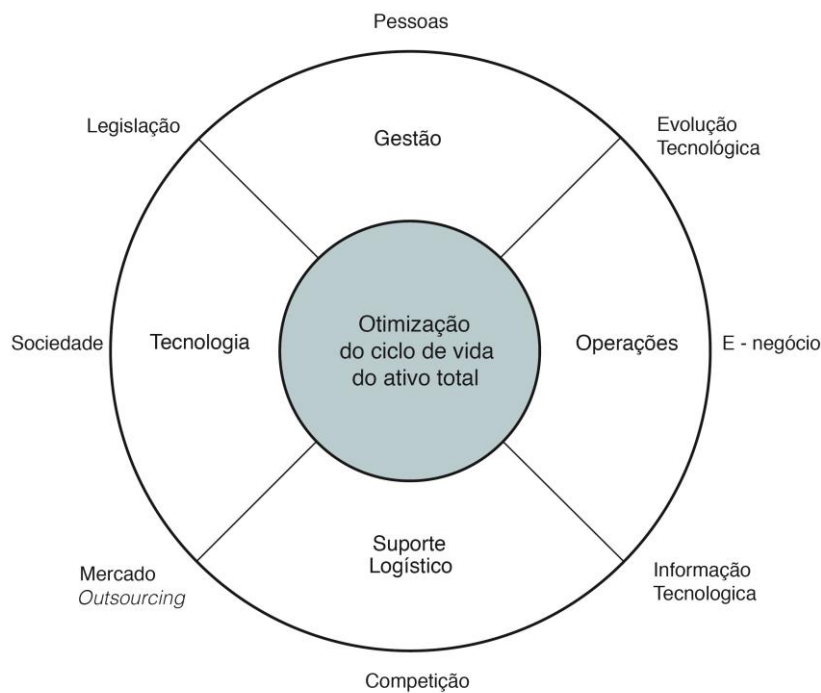


Figura 2 - Manutenção em contexto, adaptado de [14]

Os objetivos da manutenção são definidos pelas funções e expectativas de desempenho associadas ao ativo em consideração [9]. De uma forma geral, os objetivos passam por [15]:

- **Segurança** - Garantir a segurança das pessoas e dos bens, e preservar o meio ambiente;
- **Disponibilidade e Fiabilidade** - Assegurar os níveis de qualidade nos meios de produção e no produto, mantendo os equipamentos em condições de pleno funcionamento;
- **Custo** - Minimização do custo global da manutenção, de forma a permitir à empresa a rentabilidade do investimento.

Estes objetivos são gerais, mas dependendo do tipo de manutenção aplicada, existem objetivos mais específicos. Os objetivos da manutenção devem ser mensuráveis e consistentes com a política da manutenção [16].

#### 2.2.4. Tipos de Manutenção

Os vários critérios adotados para intervir na manutenção são, normalmente, designados por “tipos de manutenção” [5]. Podem ser classificados e/ou subdivididos de diversas formas consoante a norma utilizada ou o autor seguido. A classificação adotada nesta dissertação é baseada na norma europeia EN 13306 [11] e complementada com informação retirada de outras fontes bibliográficas [5] [13].

O diagrama da classificação dos vários tipos de manutenção com base nas fontes bibliográficas acima mencionadas está representado na Figura 3:

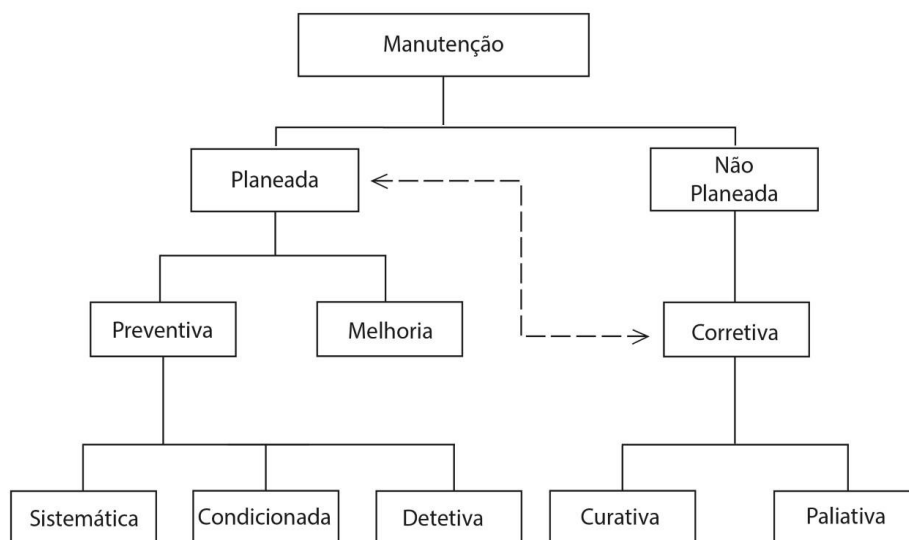


Figura 3 - Tipos de Manutenção, adaptado e elaborado a partir de [5] [11] [13]

Numa primeira divisão, podemos classificar a manutenção em dois grupos, planeada e não planeada. Entende-se por **manutenção planeada** a manutenção executada antes da ocorrência de uma avaria. Por **manutenção não planeada**, entende-se a manutenção que é efetuada após a ocorrência de uma avaria.

A manutenção não planeada é definida apenas pela **manutenção corretiva**, manutenção efetuada após avaria. Se a intervenção corretiva for definitiva, diz-se **manutenção curativa**. Se, por sua vez, a intervenção tiver um carácter provisório, denomina-se por **manutenção paliativa**. No entanto, este tipo de manutenção poderá ter algum tipo de planeamento residual (representado na Figura 4 por uma linha tracejada) [5].

Por outro lado, a manutenção planeada é repartida em manutenção preventiva e manutenção de melhoria. A **manutenção preventiva** é a “manutenção efetuada a intervalos de tempo predeterminados ou de acordo com critérios prescritos com a finalidade de reduzir a probabilidade de avaria ou de degradação do funcionamento de um bem” [13]. Esta subdivide-se em três tipos: sistemática, condicionada e detetiva.

- A **manutenção preventiva sistemática** é a “manutenção preventiva executada a intervalos de tempo pré-estabelecidos ou segundo um número definido de unidades de funcionamento, sem controlo prévio do estado do item” [13].
- A **manutenção preventiva condicionada** é a “manutenção preventiva baseada na vigilância do funcionamento do bem e/ou dos parâmetros significativos desse funcionamento, integrando as ações daí decorrentes” [13].
- A **manutenção preventiva detetiva** é a manutenção que visa verificar o estado de funcionalidade de componentes a que estão associadas falhas ocultas [5].

A **manutenção de melhoria** “é um estilo de manutenção assumido e estimulado nos tempos de hoje, destinado a melhorar o desempenho do equipamento no seu contexto” [13].

## 2.3. Análise FMECA

No mundo da indústria, as boas práticas aconselham a utilização e a aplicação de metodologias de análise de equipamentos industriais, quer como ferramentas de apoio à tomada de decisão, quer como metodologias de estudo da fiabilidade previsional, quer como modelos de análise e de prevenção de riscos [5]. A engenharia moderna utiliza um conjunto de métodos e procedimentos normalizados para a análise de falhas de equipamentos industriais, conhecidos como a Análise dos Modos e Efeitos de Falha Críticos (FMECA, do inglês *Failure Mode Effects and Criticality Analysis*).

A metodologia FMECA é “um procedimento através do qual se analisam os potenciais modos de falha de um sistema para determinar os seus resultados ou efeitos no sistema, para os classificar de acordo com a sua gravidade e ordenar de acordo com a influência combinada da gravidade com a sua probabilidade de ocorrência” [17].

Esta metodologia pode ser vista como uma extensão da Análise dos Modos e Efeitos de Falha (FMEA, do inglês *Failure Mode and Effects Analysis*), através da inclusão de uma análise de criticidade que é usada para calcular a probabilidade de ocorrência dos modos de falha, considerando a gravidade e detetabilidade das suas consequências. Desta forma, a prioridade recai sobre os modos de falha com probabilidade de ocorrência mais elevada e com consequências mais gravosas, permitindo assim a execução da análise no sentido de reduzir as consequências de falhas críticas [18].

### 2.3.1. Análise FMEA

A análise FMEA é uma técnica de análise sistemática de produtos ou processos para identificar e minimizar falhas potenciais e os seus efeitos ainda na sua fase de conceção, sendo o seu principal objetivo a prevenção de problemas, eliminando a insatisfação do “cliente” [5].

As fases de desenvolvimento de uma análise FMEA são tipicamente as seguintes [19]:

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

Na análise e hierarquização do sistema (Fases 1 e 2), seguido da seleção do subsistema a analisar, é conveniente representar o sistema através de diagramas simples ou fluxogramas, realçando todas as funções essenciais do sistema [19]. É muito importante definir o limite do sistema, os critérios que vão ser utilizados para dividir o sistema para a análise e o nível de análise pretendido, pois o limite do

sistema constitui a interface física e funcional entre o sistema e o que o rodeia e engloba, especificamente, os outros sistemas com os quais o sistema analisado interage [17].

A análise funcional (Fase 3) do subsistema ou equipamento em estudo passa pela identificação dos seus principais componentes e suas respectivas funções, funções indispensáveis ao seu funcionamento [20]. Após essa identificação, faz-se também uma classificação do nível de importância de cada uma das funções desses componentes, cuja importância é dada segundo a maneira como uma cessação dessa função condicionaria a realização do seu objetivo operacional [5]. Esta ferramenta é concretizada numa tabela onde se listam as subfunções principais bem como os componentes responsáveis pelo desempenho dessas mesmas funções, onde se destaca a possibilidade de um componente poder desempenhar mais do que uma função.

Após a análise funcional do subsistema ou equipamento, é feita uma listagem dos modos de falha possíveis para cada equipamento associado à função definida previamente na análise funcional (Fase 4). Um modo de falha é a condição física específica que pode levar à ocorrência de uma falha funcional [21]. Alguns dos modos de falha mais comuns são a falha por corrosão, fadiga, fuga, rutura, curto-circuito, desalinhamento [5].

De seguida, identificação de causas potenciais de falha (Fase 5). Uma causa potencial de falha é a causa que levou à perda de funcionalidade, geralmente por falha de um equipamento ou trabalho em condição deficiente do mesmo [20]. Para cada modo de falha devem ser identificadas as suas causas potenciais, estando entre as mais comuns, fissuração, porosidade, sobrecarga, falta de lubrificação ou erro de montagem [5].

Associado ao modo de falha, temos também o efeito potencial de falha. A identificação dos efeitos potenciais de falha (Fase 6), também conhecidos como consequências de falha, são importantes para a análise, de forma a haver uma distinção entre a causa e o “sintoma” da falha. São o resultado da perda de funcionalidade daquela função e das consequências que terá na função principal ou nas restantes subfunções [21]. Como exemplos, temos o ruído excessivo, paragem do equipamento, redução de velocidade, agressão ambiental e segurança de pessoas [5].

Na fase final da análise FMEA, determina-se para cada modo de falha, a forma como esta é detetada e os meios através dos quais o utilizador ou o responsável pela manutenção identifica a ocorrência da falha (Fase 7). É conveniente que esta identificação dos métodos de deteção e prevenção elimine a ocorrência de modos de falha que possam pôr em causa a segurança de pessoas e bens (funcionamento perigoso) [20].

### **2.3.2. Análise de criticidade**

A avaliação de risco da FMECA (risco associado aos potenciais problemas identificados) pode ser realizada através de dois métodos:

- Índice de criticidade ou Número de Prioridade de Risco (RPN, do inglês *Risk Priority Number*) [19], que corresponde à norma IEC 60812;
- Análise de Criticidade [17] que corresponde à norma MIL-STD-1629A.

Um dos métodos para a determinação quantitativa da criticidade consiste no cálculo de um índice de criticidade ou do RPN de cada equipamento referente a cada função e o seu modo de falha. Para analisar o RPN, os modos de falhas anteriormente referidos são associados a uma função da sua probabilidade de ocorrência, gravidade e detetabilidade. Esta associação, pretende hierarquizar as causas potenciais de falha através do seu grau de risco, para planear de forma mais eficaz as respetivas ações preventivas e corretivas [22].

Para completar uma análise FMECA, desenvolvem-se as seguintes fases adicionais [19]:

8. Estimar a gravidade do modo de falha em estudo (S);
9. Estimar a probabilidade de ocorrência do modo de falha – (O);
10. Estimar a probabilidade de deteção do modo de falha – (D);
11. Análise de criticidade.

As fases acima referidas encontram-se sumariadas sob a forma do fluxograma representado na Figura 4.

A gravidade de um modo de falha (Fase 8), S, traduz o potencial efeito de falha mais gravoso considerado no sistema, podendo ser classificada em função do impacto deste em vários fatores, como por exemplo, segurança e ambiente, produção ou manutibilidade. A probabilidade de ocorrência de um modo de falha (Fase 9), O, avalia a probabilidade da falha na unidade funcional e/ou função. Por fim, o fator detetabilidade (Fase 10), D, refere a probabilidade da falha não ser detetada pelo processo de conceção antes do equipamento ou sistema a ser utilizado pelo cliente [23]. Estes três índices são determinados consoante os critérios estabelecidos pela norma/modelo FMECA adotada dentro da empresa.

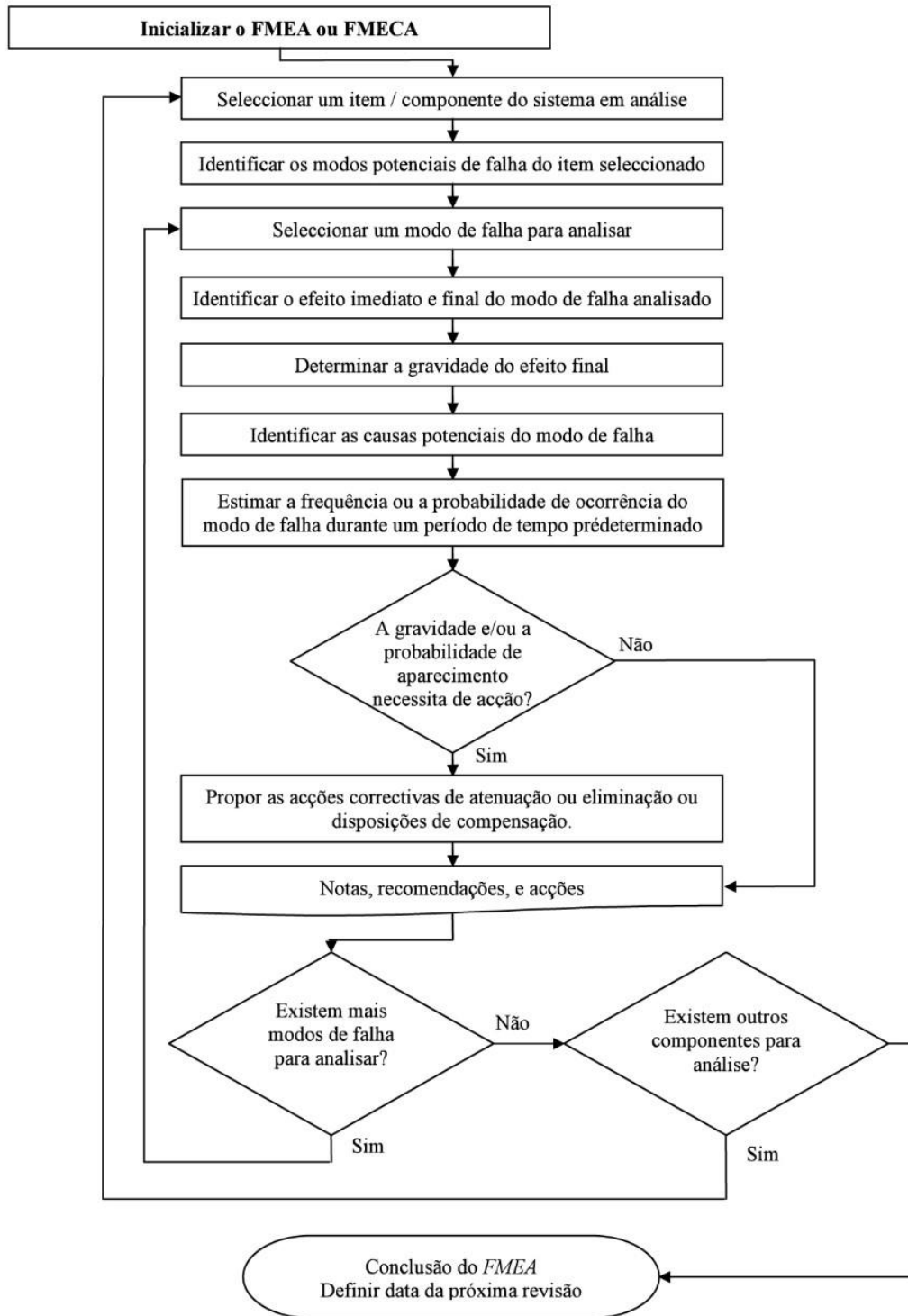


Figura 4 - Fluxograma da análise FME(C)A, adaptado de [19]

O RPN (Fase 11) calcula-se de acordo com a expressão abaixo indicada, fazendo-se o produto dos três índices [22]:

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

Quanto maior o índice de criticidade, maior a urgência em encontrar uma tarefa preventiva ou corretiva [22]. É importante referir que a classificação dos índices O, S e D, assim como a interpretação do RPN, pode variar consoante a norma/modelo FMECA em uso; assim, a partilha destes resultados quantitativos entre empresas é muito difícil [18].

A norma IEC 60812 [19] descreve a análise FMEA, bem como a análise FMECA. Sistematiza o processo de conceção desenvolvido pelas equipas de engenharia, no sentido de encontrar possíveis problemas e respetivas soluções, priorizadas em função das hipóteses de falha e da sua criticidade. Portanto, o cálculo dos índices de gravidade, ocorrência e detetabilidade de um modo de falha é feito com base na classificação desta norma, onde para cada índice existe uma tabela com uma escala de amplitude variável [20]. As tabelas para cálculo dos referidos índices estão representadas respetivamente nas Tabelas 1, 2 e 3.

*Tabela 1 - Classificação do índice de gravidade, adaptado de [19]*

SEV Severidade	Factor	Efeito(s) da(s) Falha(s)
<b>Grave</b>	9-10	Potenciais problemas de segurança
<b>Elevada</b>	7-8	Grande descontentamento do Cliente
<b>Moderada</b>	4-6	Certo descontentamento do Cliente
<b>Ligeira</b>	2-3	Ligeiro inconveniente no Cliente
<b>Nula</b>	1	O Cliente não detecta a falha

*Tabela 2 - Classificação do índice de ocorrência, adaptado de [19]*

Probabilidade de Ocorrência de Modo de Falha (eventos/h)	OCO Ocorrência	Critério
<b>Remota</b> (1 em 1.500.000)	1	Falha improvável. Processo sem falhas
<b>Muito Baixa</b> (1 em 15.000)	2-3	Probabilidade muito baixa de falhas
<b>Baixa</b> (1 em 2.000; 1 em 400)	4-5	Probabilidade baixa de falhas
<b>Moderada</b> (1 em 80; 1 em 20)	6-7	Probabilidade moderada de falhas
<b>Alta</b> (1 em 8; 1 em 3)	8-9	Probabilidade alta de falha
<b>Muito alta</b> (1 em 2)	10	Probabilidade muito alta de falha



Tabela 3 - Classificação do Índice de detetabilidade, adaptado de [19]

DET Detectabilidade	Factor	Probabilidade de Detecção
<b>Muito Alta</b>	1	O controlo definido na concepção consegue, com quase toda a certeza, detectar a potencial causa/mecanismo e subsequente modo de falha
<b>Alta</b>	2-4	Muito alta probabilidade de o controlo definido na concepção detectar a potencial causa/ mecanismo e subsequente modo de falha
<b>Moderada</b>	5-7	Probabilidade moderada alta de o controlo definido na concepção conseguir detectar a potencial causa/ mecanismo e subsequente modo de falha
<b>Remota</b>	8-9	Baixa probabilidade de o controlo definido na concepção conseguir detectar a potencial causa/ mecanismo e subsequente modo de falha
<b>Quase Impossível</b>	10	O controlo da concepção não consegue detectar a potencial causa/ mecanismo e subsequente modo de falha; ou não existe controlo

Além do método anteriormente apresentado para o cálculo de criticidade, denominado RPN, destaca-se o procedimento proposto pela norma militar americana MIL-STD-1629A – Análise de Criticidade. Segundo o documento MIL-STD-1629A, a Análise de Criticidade pode ser quantitativa ou qualitativa, sendo que a primeira encarrega os seguintes passos [17]:

1. Definir a fiabilidade para cada equipamento, num dado momento de operação;
2. Identificar a porção da falta de fiabilidade de cada equipamento que pode ser atribuída a cada modo de falha potencial;
3. Classificar a gravidade que irá resultar da ocorrência de cada modo de falha;
4. Calcular a criticidade para cada potencial modo de falha da seguinte forma:

$$\text{Criticidade do modo de falha} = \beta' \times \alpha \times \lambda \times t \quad (2)$$

$\beta'$  representa a probabilidade de ocorrência do modo de falha,  $\alpha$ , a contribuição deste modo para a falha,  $\lambda$ , a taxa de falhas e  $t$  o tempo de operação (em horas);

5. Calcular a criticidade de cada equipamento, somando-se a criticidade de todos os modos de falha associados a esse equipamento.

Por sua vez, o método de análise qualitativa de criticidade deve ser aplicado quando não são conhecidos os requisitos referidos anteriormente e envolve as seguintes fases [17]:

1. Classificar a gravidade dos efeitos potenciais de falha, de acordo com as categorias presentes na Tabela 4;
2. Classificar a probabilidade de ocorrência de cada modo de falha potencial, de acordo com as categorias presentes na Tabela 4;
3. Comparar e priorizar a eliminação dos modos de falha por meio de uma matriz de criticidade, representada na Tabela 4, na qual o risco é função da frequência e dos potenciais efeitos (gravidade) dos modos de falha.

A matriz da criticidade em questão é representada com três cores por forma a facilitar a sua interpretação, sendo que a localização na zona verde significa que o risco é desprezável, na zona amarela o risco é aceitável/tolerável, e por fim, na zona vermelha significa que os subsistemas identificados e respetivos componentes devem ser analisados urgentemente, considerando que o risco é intolerável e deve ser eliminado [18].

Tabela 4 - Matriz de Risco adaptado de [18]

Matriz de Risco					
Gravidade	Frequência de ocorrência				
	Muito Improvável 1	Remota 2	Ocasional 3	Provável 4	Frequente 5
Catastrófica					
Crítica					
Maior					
Menor					

A análise FMECA termina com a execução de uma carta/tabela de Análise dos Modos e Efeitos de Falha Críticos, como um documento sumariado de todos os procedimentos feitos para a sua realização e supostas tarefas a efetuar. Estas tabelas não têm um desenho único, havendo alguma liberdade na sua apresentação [5]. Na Figura 5, é mostrado um exemplo de uma carta FME(C)A sugerida na norma IEC 60812:2018 [19], elaborada pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC, do inglês *International Electrotechnical Commission*).

Sistema: 1			Grupo de Trabalho: 2								Número de folha:				
											Data original: 3				
											Data de revisão: 3				
Componente	Função	Modo Potencial de falha	Efeito Potencial de falha	Índice de Severidade	Causas Potenciais de falha	Índice de Ocorrência	Tarefas Existentes	Índice de Detecção	NPR	Ações Recomendadas	Responsável de Data de Conclusão Limite	Resultados das Ações			
												Ações Tomadas	Severidade Ocorrência	Detecção	NPR
4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
1- Caracterização do Sistema 2- Nome das pessoas que participam no grupo de trabalho 3- Número de carta e datas de execução e de revisão 4- Nome do componente 5- Função que o componente desempenha 6- Possíveis modos de falha 7- Possíveis efeitos que podem ser causados no sistema 8- Valor de 1 a 10 do índice de severidade dos efeitos 9- As causas que podem ter desencadeado o modo de falha						10 - Valor de 1 a 10 do índice de ocorrência da falha 11 - Método para identificar e controlar as falhas 12 - Valor de 1 a 10 no índice de deteção da falha 13 - Número de prioridade de risco 14 - Ações recomendadas pelo grupo de trabalho 15 - Responsáveis pela implementação e datas limite 16 - Ações corretivas realizadas 17 - Reavaliação dos índices e cálculo de novo NPR									

Figura 5 - Carta FME(C)A, adaptado de [5]

Uma carta FME(C)A deve ser desenvolvida por uma equipa multidisciplinar, que envolva nomeadamente as áreas de projeto, produção, manutenção, qualidade, logística e ambiente [20].

Ao longo dos anos, a aplicação da análise FMECA tem demonstrado prolongar a vida útil do equipamento em análise e melhorar a sua fiabilidade operacional, provando assim que é correto aplicar este método à análise de fiabilidade operacional de um produto. Acima de tudo, uma carta FMECA é um documento vivo, e não um mero exercício no papel; é uma fonte importante de informação, especialmente na introdução de um novo modelo/sistema/subsistema/componente [5].

## **2.4. Indústria 4.0**

A digitalização e inteligência do processo de produção é uma necessidade atual da indústria. Atualmente, a indústria de produção está a adaptar o seu modo de visão e operação à necessidade do mercado, passando da produção em massa para uma produção em massa personalizada, com melhor qualidade e maior produtividade. Os rápidos avanços tecnológicos na tecnologia de produção e na sua aplicação têm vindo a ajudar nesse sentido, permitindo às empresas lidar com os desafios de produzir produtos cada vez mais individualizados [24]. Portanto, a gestão da manutenção dos ativos será afetada diretamente, necessitando de alguma mudança e adaptação para ser eficiente com todos os dados e informação provenientes dos novos avanços tecnológicos [25].

A criação de valor industrial é moldada pelo desenvolvimento e sustentabilidade em direção à quarta etapa da industrialização, designada por Indústria 4.0 (I4.0). O objetivo desta revolução é converter máquinas comuns em máquinas autoconscientes e de autoaprendizagem, capazes de melhorar o seu desempenho global e gerir a sua manutenção com a interação de vizinhança [24]. A I4.0 tem como objetivo a construção de uma plataforma de produção inteligente e aberta para a aplicação de informação em rede industrial. É melhor definida pela “*smart factory*” (fábrica inteligente) resultante da fusão dos mundos virtual e físico através dos *Cyber Physical Systems* (CPS) e a fusão resultante dos processos técnicos e comerciais [25].

### **2.4.1. Visão I4.0**

Após a primeira Revolução Industrial, revoluções subsequentes resultaram na indústria de produção, desde máquinas de água e vapor até à produção automatizada elétrica e digital, o que tornou o processo de produção mais sustentável e automático para que o humano pudesse operar as máquinas de forma simples e eficiente [24].

Este conceito ficou conhecido publicamente em 2011, quando uma iniciativa chamada “Indústria 4.0”, organizada por representantes de empresas, da política e de academias, promoveu uma ideologia como uma abordagem para fortalecimento da competitividade da indústria de produção alemã [26]. Adotaram esta nova iniciativa como a próxima revolução industrial, da qual representa a transição para uma indústria “inteligente”, onde toda a cadeia de fornecimento é acessível e controlável pela Internet desde os mais pequenos aos maiores equipamentos, bem como a comunicação com o ambiente externo e outros ativos no comércio [8].

Em 2013, esta ideia ficou fundamentada na publicação feita por Kagermann *et al.* [27], onde são introduzidos alguns conceitos-chave na visão da I4.0, descritos da seguinte forma:

“No futuro, as empresas estabelecerão redes globais que incorporarão as suas máquinas, sistemas de armazenamento e instalações de produção na forma de CPS. No ambiente de fabricação, esses CPS compreendem máquinas inteligentes, sistemas de armazenamento e instalações de produção capazes de trocar informações de forma autónoma, desencadeando ações e controlando umas às outras de forma independente. Isso facilita melhorias fundamentais nos processos industriais envolvidos na produção, engenharia, uso de material e cadeia de fornecimento e gestão do ciclo de vida. As *Smart Factories* que estão a começar a aparecer empregam uma abordagem completamente nova para a produção. Os produtos inteligentes são unicamente identificáveis, podendo estar sempre localizados e conhecerem o seu próprio histórico, estado atual e rotas alternativas para alcançar o seu estado-alvo. Os sistemas de produção incorporados são conectados verticalmente com processos de negócios dentro de fábricas e empresas, e conectados horizontalmente a redes de valor dispersas que podem ser geridas em tempo real - desde o momento em que um pedido é colocado à logística de saída.”

O termo “Indústria 4.0” é, portanto, visto como a quarta etapa da industrialização (Figura 6), do qual é definida por um novo nível de organização e controlo sobre toda a cadeia de valor do ciclo de vida útil dos produtos, e cada vez mais voltada para os requisitos dos clientes [24]. No entanto, apesar de ser atualmente uma prioridade para muitas empresas, uma definição concreta do termo não existe de momento, deixando o já acima referido [27], a visão do grande dinamizador do conceito I4.0.

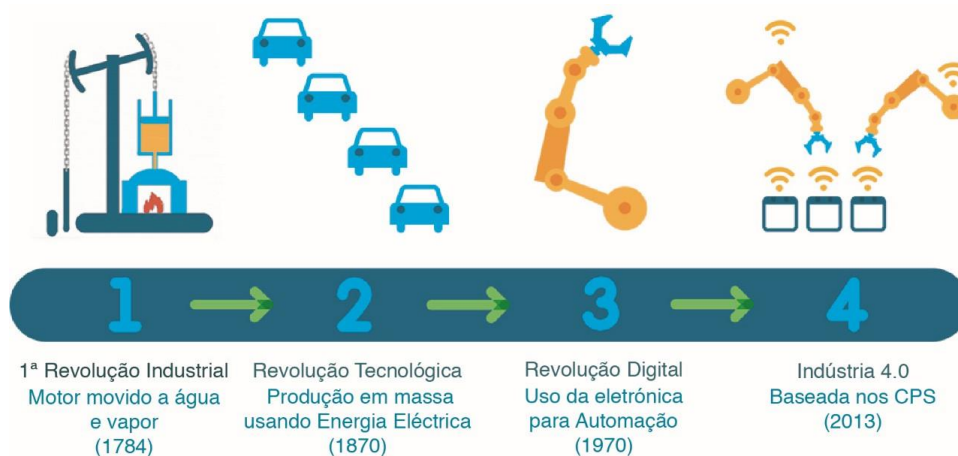


Figura 6 - As 4 etapas da Industrialização, adaptado de [27]

## 2.4.2. Pilares da I4.0

O Governo Federal da Alemanha, através da visão da I4.0 feita por Kagermann *et al.*, apresenta de forma resumida a I4.0 como sendo uma estrutura emergente, na qual a produção e os sistemas

logísticos, na forma de *Cyber Physical Production System* (CPPS), utilizam intensivamente a rede de informação e comunicações mundialmente disponível para uma troca de informações amplamente automatizada, onde os processos de produção e de negócios são combinados [25]. Esta quarta revolução industrial é alimentada por nove avanços tecnológicos fundamentais (Figura 7) que transformarão células isoladas e otimizadas num fluxo de produção totalmente integrado, automatizado e otimizado, levando a uma maior eficiência e mudança nas relações tradicionais de produção entre fornecedores, produtores e clientes, bem como entre humanos e máquinas [28].



Figura 7 - Os 9 pilares do avanço tecnológico, adaptado de [28]

- **Big Data and Analytics**

A recolha e análise abrangente de dados de muitas fontes diferentes de equipamentos de produção e sistemas, bem como de sistemas corporativos e de gestão de clientes, irão tornar-se num padrão para apoiar a tomada de decisões em tempo real, de modo a otimizar a qualidade da produção, economizar energia e melhorar o serviço de equipamentos [28].

O *Big Data* consiste em quatro componentes: volume de dados, variedade de dados, velocidade de geração de novos dados e análise, e valor dos dados. Possibilita a análise dos dados (*analytics*) previamente gravados para identificação de possíveis ameaças ocorridas nos diferentes processos de produção em toda a cadeia de valor e também a previsão de novos problemas que possam estar a ocorrer, bem como várias soluções para impedir que ocorram novamente na indústria, fornecendo assim uma visão clara da situação atual de uma específica empresa [29].

- **Robôs Autônomos**

Dia após dia, os robôs estão a ficar cada vez mais autônomos, flexíveis e cooperativos; futuramente poderão vir a interagir uns com os outros, trabalhar de forma segura com os humanos e aprender com eles [28]. Um robô autônomo é usado para executar métodos de produção autônomos de forma mais precisa e também para operar em zonas restritas aos trabalhadores humanos, podendo completar as suas tarefas de forma precisa e inteligente num breve intervalo de tempo, sem descurar o foco na segurança, flexibilidade, versatilidade e colaboração. Cada vez mais robôs industriais estão a evoluir com as novas inovações tecnológicas, promovendo a revolução industrial. Na I4.0, robôs e humanos irão trabalhar lado a lado, por assim dizer, em tarefas de interligação e usando interfaces inteligentes de sensor humano-máquina [25].

- **Simulação**

As simulações irão ser usadas mais extensivamente nas operações da fábrica para promover dados em tempo real como espelho do mundo físico num modelo virtual que pode incluir máquinas, produtos e seres humanos, traduzindo-se assim na redução do tempo de configuração das máquinas e no aumento da qualidade. Através destas simulações, em específico no *Digital Twin*, é recriada toda a cadeia de produção de um produto, permitindo aos operadores aperfeiçoar as configurações das máquinas para o próximo produto na linha, mas também simular tempos de ciclo, consumo de energia ou aspetos ergonómicos de uma dada instalação ou equipamento de produção [28]. A qualidade da tomada de decisões pode ser melhorada de maneira fácil e rápida com a ajuda das simulações. A cópia virtual de toda a cadeia de valor permite o uso de simulações como um suporte de decisão [30].

- **Sistema de integração vertical e horizontal**

A grande maioria dos sistemas de Tecnologias de Informação (IT, do inglês *Information Technology*) não estão completamente interligados com os agentes envolvidos num processo, nomeadamente os fornecedores, colaboradores e consumidores [28].

A integração e auto-otimização são os dois principais mecanismos usados na organização industrial [30]. O paradigma da I4.0 é essencialmente delineado por três dimensões de integração [24]:

- Integração horizontal em toda a rede de criação de valor
- Integração vertical e sistemas de produção em rede
- Integração em todo o ciclo de vida útil do produto

A integração digital completa e automação de processos de produção na dimensão vertical e horizontal inclui também uma automação de comunicação e cooperação, especialmente ao longo de processos padronizados [24].

- **Internet das Coisas**

A Internet das Coisas (IoT do inglês *Internet of Things*) é uma rede mundial de objetos físicos, ambientes, veículos e máquinas interconectados e uniformemente endereçados que se comunicam através de protocolos padrão, permitindo a recolha e troca de dados [24]. Contexto, omnipresença e

otimização são os três principais conceitos da *IoT*: no qual o contexto refere-se à possibilidade de interação avançada entre objetos com um ambiente existente e com resposta imediata a qualquer mudança, a omnipresença fornece informação sobre o local e condição física ou atmosférica do equipamento, e a otimização ilustra o facto de que os objetos de hoje em dia são mais do que apenas a conexão à rede de operadores humanos na interface humano-máquina [29]. A cadeia de valor deve ser inteligente, ágil e conectada em rede, integrando objetos físicos, fatores humanos, máquinas inteligentes, sensores inteligentes, processos de produção e linhas de produção juntos através dos limites da organização. *Software* e *Data* são os elementos-chave para o planeamento inteligente e controlo das máquinas e fábricas do futuro [24].

- **CPS e Cyber Security**

Os CPS são sistemas feitos pelo homem (espaços físicos) mas com uma forte integração na computação, comunicação e controlo de sistemas (espaço *cyber*). A descentralização e comportamento autónomo do processo de produção são as principais características dos CPS. A sua evolução depende, principalmente, da adoção e reconfiguração da estrutura da rede de fornecimento do produto, designada por *Collaborative CPS* (sistemas colaborativos), que são usados nos sistemas de produção, bem como em diferentes CPS, como o controlo de tráfego citadino e controlo de sistemas. O uso de sensores apropriados nos CPS permite descobrir a ocorrência de falhas e o tipo de falha nas máquinas, e automaticamente preparar ações de reparação dessas mesmas falhas. Pode igualmente estabelecer a utilização ideal de cada estação de trabalho com a ajuda do tempo de ciclo necessário para a operação realizada nessa estação [24].

A forte ligação entre o mundo físico, o serviço e o mundo digital pode melhorar a qualidade de informação requerida para o planeamento, otimização e operação dos sistemas de produção. Portanto, os CPS podem ser usados na indústria de produção para perseguir o objetivo produzir produtos personalizados em larga escala [31]. Sendo assim, surge a necessidade de proteger os sistemas industriais críticos e as linhas de produção de ameaças de segurança de rede. Como resultado, a *Cyber Security* é essencial para que haja comunicações seguras e confiáveis, bem como uma identidade sofisticada e gestão de acesso às máquinas e utilizadores [28].

- **The Cloud**

O aumento da partilha de informação em rede para o desenvolvimento de um produto implica o recurso a aplicações e partilha de dados para além dos servidores da empresa. Com a *I4.0*, a organização tem a necessidade de aumentar a partilha de dados entre os *sites* e as empresas, ou seja, alcançar tempos de reação em milissegundos ou até mais rápido [28]. “Produção digital” é um conceito que consiste na conexão a diferentes aparelhos da mesma *Cloud* para partilhar informação entre si, que pode ser alargada tanto a um conjunto de máquinas de uma fábrica como a toda a fábrica. A alta tecnologia ajuda a reunir e a centralizar a informação ao mesmo tempo que oferece uma plataforma de colaboração de código aberto para acelerar e refinar as pesquisas para ganho de toda a indústria [24].

- **Processos aditivos**

O fabrico aditivo ou impressão 3D serão amplamente utilizados para produzir pequenos lotes de produtos personalizados que ofereçam vantagens de construção, como *design* complexo e leve. O fabrico aditivo descentralizado e de alto rendimento reduz a distância do transporte e o *stock* disponível [28]. A produção deve ser rápida e barata, com o uso de tecnologias de fabrico aditivo como o método de deposição fundida (FDM), a fusão seletiva por laser (SLM), e a sinterização seletiva por laser (SLS) [31]. Com a mudança contínua da necessidade do cliente, o desafio de aumentar a individualização dos produtos e reduzir o tempo de comercialização é vivenciado por muitas empresas. A estes desafios responde-se, nomeadamente, com o aumento da digitalização, da penetração do IT e da rede de produtos, recursos de produção e processos. A diminuição do ciclo de vida dos produtos em combinação com a crescente procura de produtos personalizados requer uma maior transformação na estrutura organizacional que leve a um aumento da complexidade [24].

- **Realidade Aumentada**

Os sistemas baseados em realidade aumentada suportam uma variedade de serviços, como a seleção de peças num armazém e o envio de instruções de reparação para dispositivos móveis. A indústria pode usar a realidade aumentada para fornecer aos funcionários informações ou instruções em tempo real para melhoria da tomada de decisões e dos procedimentos de trabalho [28].

### **2.4.3. Perspetiva Nacional e Global**

Atualmente, as principais empresas industriais vivem uma profunda transformação digital. As empresas têm vindo a digitalizar algumas das suas funções internas essenciais na cadeia de valor vertical, bem como outras, externas, com os seus parceiros da cadeia de valor horizontal. Adicionalmente, estão a melhorar os seus portfólios de produtos com funcionalidades digitais e serviços inovadores de bases de dados. Em 2014, na Alemanha, a *PwC* desenvolveu um estudo sobre a I4.0 onde verificaram que o tema em questão não estava no radar de muitas empresas. no entanto, algumas estavam realmente em processo de implementação. Esta situação mudou radicalmente nos anos seguintes, mostrando, em 2016, através de novo estudo, valores completamente diferentes daqueles que se tinham constatado dois anos antes [32].

No trabalho realizado pela *PwC 2016* [32], os resultados mostram que até ao ano 2021 (Figura 8), 86% das empresas em Portugal esperam ver os seus processos, das cadeias de valor horizontal e vertical, altamente digitalizados. Globalmente, o valor esperado é de 72%. Estes valores têm em conta que um elevado nível de digitalização é para empresas que estão acima do valor 3,5 de uma escala de 1 a 5, sendo o 1 um nível de digitalização “muito baixo”, e o 5 um nível de digitalização “muito avançado”.



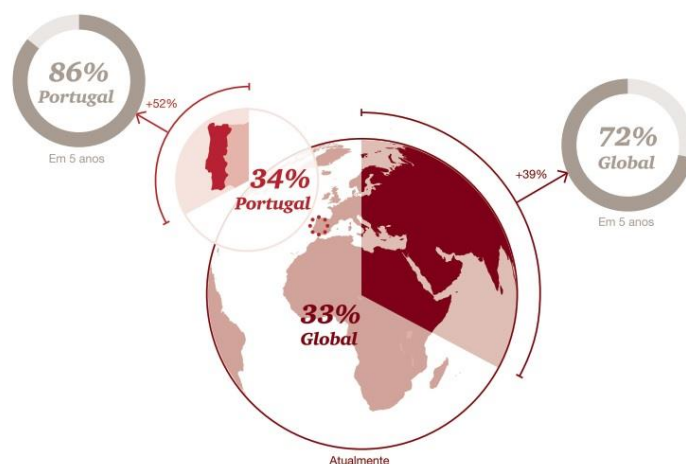


Figura 8 - Perspetiva global e nacional da I4.0 [32]

Os valores demonstrados mostram que existe uma preocupação das empresas em Portugal em aceitar que um setor industrial dinâmico e moderno é um fator essencial para o crescimento da economia, e que a digitalização é realmente um fator incontornável para o setor. Além disso, o facto de toda a envolvente humana (pessoas, fornecedores ou outros *stakeholders*) estar a adaptar-se à mudança, indica que o desafio não está só na tecnologia, mas também na identificação das plataformas e processos à disposição da empresa para que num futuro próximo haja integração de todos esses interlocutores [32].

#### 2.4.4. Perspetiva futura

O conceito da I4.0 representa uma nova orientação das empresas de produção mundiais. Os seus nove pilares foram explicados para entendimento da sua aplicação, bem como para identificação dos desafios e problemas da a sua implementação. À medida que a sua implementação aumenta, a investigação e procura de máquinas eficazes irá continuar a aumentar, no sentido de uma programação otimizada da manutenção [24]. Embora a sua implementação ainda esteja a enfrentar alguns desafios técnicos, a sua linha de pensamento e ação estão no caminho certo, aplicando simultaneamente as tecnologias existentes e promovendo avanços técnicos. Portanto, a I4.0 e a *Smart Factory* podem ser implementadas de uma forma progressiva, com o aparecimento de constantes avanços tecnológicos [33].

O termo Indústria 5.0 já se encontra introduzido nas áreas de pesquisa, que o vêem como a próxima revolução industrial, mas será mais uma transformação sistemática, que inclui impacto na sociedade civil, governo e estruturas, e na própria identidade humana, além das ramificações económicas e industriais [24].

## 2.5. Digital Twin

A I4.0 evidencia-se pela total digitalização dos ativos físicos e sua integração em ecossistemas digitais com os diversos parceiros da cadeia de valor. Gerar, analisar e comunicar a informação é indispensável

para fundamentar os ganhos que advêm da I4.0, que alia uma vasta variedade de novas tecnologias na procura da criação de valor às empresas [32].

O uso de tecnologias de digitalização permitiu o planeamento de produtos e processos virtuais. As grandes quantidades resultantes de informação são processadas, analisadas e avaliadas por ferramentas de simulação e otimização com vista à disponibilidade do planeamento em tempo real. A simulação, um dos pilares da I4.0, é baseada no planeamento e otimização da cadeia de processo através da sua cópia virtual, tendo *Digital Twin* (DT) um tipo de simulação com grande potencial em vários campos industriais [34].

Nesta dissertação dar-se-á ênfase e destaque ao conceito DT por este constitui uma parte fundamental do trabalho, pelo que lhe é dedicado um subcapítulo.

### **2.5.1. Conceito DT**

O DT foi originalmente apresentado por Michael Grieves em 2002, no contexto de uma apresentação da indústria sobre o ciclo de vida útil de um produto. Na sua forma original, é descrito como uma construção informacional digital sobre um sistema físico, criado como uma entidade por si só e ligado ao sistema físico em questão. A representação digital deve incluir toda a informação relativa ao ativo do sistema, que pode potencialmente ser obtida a partir da sua inspeção no mundo real [35].

Um aspeto central do DT é a capacidade de fornecimento de informação diferente num formato consistente. Inclui algoritmos que descrevem a sua parte real e decidem sobre a ação no sistema de produção com base nos dados processados [34].

Nos termos da indústria de produção, a definição de DT consiste na representação virtual/digital de um sistema de produção capaz de operar em diferentes disciplinas de simulação caracterizada pela sincronização entre o sistema virtual e real, graças a dados detetados e dispositivos inteligentes conectados, modelos matemáticos e elaboração de dados em tempo real. Isso permite que a representação reflita o estado atual do sistema e realize otimizações em tempo real, tomada de decisão e manutenção preditiva de acordo com as condições detetadas [36].

Devido aos vários conceitos existentes de um DT entre as várias indústrias, existe uma compreensão variada e incompleta desse conceito [34]. Para melhor compreensão, o nível de integração é discutido na secção seguinte.

### **2.5.2. Níveis de Integração**

Com base nas definições dadas de um DT em qualquer contexto, pode-se identificar um entendimento comum do termo como uma parte digital de um objeto físico. No entanto, dependendo do contexto, essas definições diferem no nível de informação integrada de ambas as partes, física e digital. Algumas representações digitais são modeladas manualmente e não estão conectadas a nenhum objeto físico existente, enquanto outras estão totalmente integradas com a troca de dados em tempo real [34]. Assim, Kritzinger *et al.* [34] propõem uma classificação dos DT em três subcategorias, de acordo com o seu nível de integração de dados: *Digital Model*, *Digital Shadow* e *Digital Twin*.

- **Digital Model**

*Digital Model* é uma representação digital de um objeto físico, existente ou planejado, que não utiliza nenhuma forma de troca de dados automatizada entre o objeto físico e o objeto digital. A representação digital pode incluir uma descrição abrangente do objeto físico; no entanto, a troca de dados é feita de forma manual. Uma mudança no objeto físico não tem efeito direto sobre o objeto digital e vice-versa. Na Figura 9 fica explícito que a troca de dados entre as representações é manual.

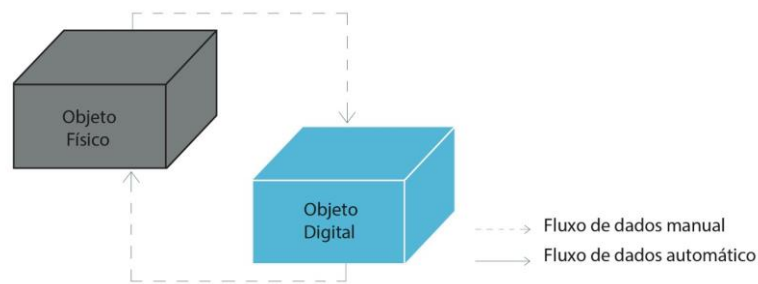


Figura 9 - Fluxo de dados em Digital Model, adaptado de [34]

- **Digital Shadow**

Com base na definição do *Digital Model*, se existir um fluxo de dados unidirecional automatizado entre o estado de um objeto físico existente e a sua representação digital, essa combinação designa-se *Digital Shadow*. Uma mudança no estado do objeto físico leva a uma mudança de estado no objeto digital, mas não vice-versa (Figura 10).

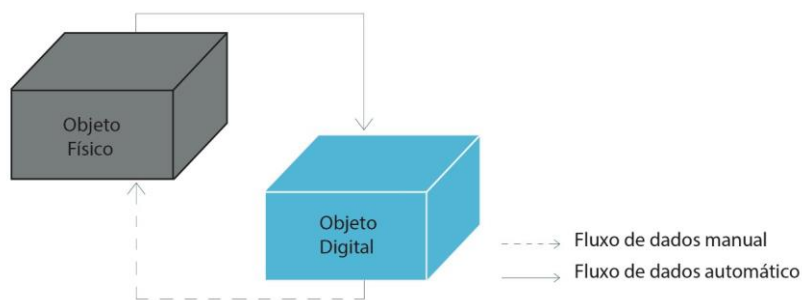


Figura 10 - Fluxo de dados em Digital Shadow, adaptado de [34]

- **Digital Twin**

O DT pode ser referido como a integração total de dados entre o objeto físico e o digital, em ambas as direções (Figura 11). Nessa combinação, o objeto digital também pode atuar como estação de controle do objeto físico. Uma mudança no estado do objeto físico leva diretamente a uma mudança de estado do objeto digital e vice-versa.

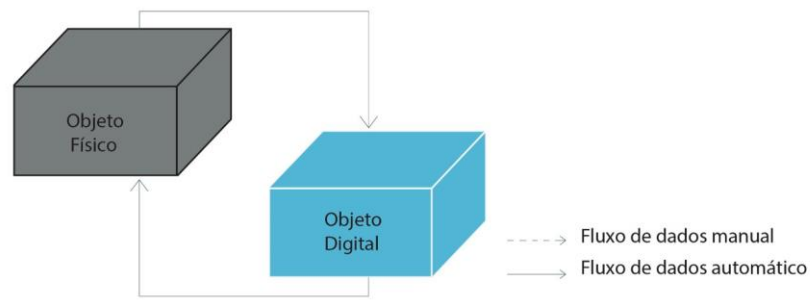


Figura 11 - Fluxo de dados em Digital Twin, adaptado de [34]

### 2.5.3. Mapeamento físico-digital

O objetivo dos DTs é o fornecimento de uma descrição física e funcional abrangente de um componente, produto ou sistema. A primeira e mais importante etapa é a criação de modelos virtuais de alta fidelidade para reprodução realística das geometrias, propriedades físicas, comportamentos e regras do mundo físico [37]. Esses modelos virtuais não são apenas altamente consistentes com as partes físicas em termos de geometria e estrutura, mas também têm a capacidade de simulação do seu estado, espaço temporal, comportamentos, funções e mais [38]. Por outras palavras, os modelos virtuais e as entidades físicas têm uma aparência semelhante, como fossem gémeos, com os mesmos comportamentos, funcionando como uma imagem espelhada. Além disso, os modelos no ambiente digital podem otimizar diretamente as operações e ajustar o processo físico por meio de troca de informação. Usando o mapeamento dinâmico bidirecional, a coevolução entre as entidades físicas e os modelos virtuais concretiza-se. Portanto, a relação de mapeamento entre os mundos físico e digital de um DT fornece uma correspondência de um para um. Um modelo virtual, que integra geometria, estrutura, comportamento, regras e propriedades funcionais, representa um objeto físico específico [37].

### 2.5.4. Modelação de DT – aplicação na Gestão de Ativos

A maior evidência que surge com o conceito do DT é que pode ser considerado como um conceito com grande potencial para a gestão do ciclo de vida de um ativo. A ampla variedade de decisões apoiadas por DTs em diferentes fases do ciclo de vida e níveis de controlo de ativos demonstrado através da realização de casos de estudo, evidencia variados benefícios: previsão de desempenhos e comportamento a longo prazo do sistema, segurança da continuidade digital de dados ao longo das diferentes fases do ciclo de vida do sistema e melhoria na tomada de decisões de manutenção [39]. A pesquisa sobre DTs ainda está no começo. Há uma necessidade de futuros trabalhos de pesquisa em aplicações industriais relevantes para investigação e demonstração da ampla gama de aplicações e benefícios onde o DT poderá demonstrar a sua potencialidade [36].

### 3. Caso de estudo e Abordagem Utilizada

No presente capítulo é apresentado o caso de estudo desta dissertação, centrado num equipamento de bombeamento de pasta, nomeadamente, uma bomba de média consistência.

Primeiramente, é apresentado o caso de estudo, com o objetivo de tornar mais explícito o motivo da realização desta dissertação e posteriores passos tomados. De seguida, descreve-se o tratamento de dados feito sobre a bomba como auxílio para a realização da análise FMECA. Por fim, verifica-se o plano de manutenção existente do equipamento e as propostas de melhoria apresentadas.

#### 3.1. Apresentação do caso de estudo

O caso de estudo que motiva a presente dissertação é centrado na aplicação de uma análise FMECA a uma bomba de média consistência da empresa *The Navigator Company*, cuja função é o transporte de pasta de celulose com um determinado nível de consistência, com o objetivo final de verificar se o plano de manutenção existente consegue mitigar os modos de falha mais críticos.

De acordo com o procedimento interno PG14, que medeia o processo de análise e classificação de importância dos ativos industriais, a bomba alvo do caso de estudo (bomba P049) foi considerada crítica por esta apresentar um número elevado de falhas de funcionamento, com altas perdas de produção associadas e um nível de detetabilidade baixo, acrescentando-se que ao estar inserida na área do Branqueamento, o valor objetivo da disponibilidade da área funcional é de 99,5%, o que justifica o interesse em aprofundar o conhecimento sobre o equipamento, o seu desempenho e possíveis comportamentos.

Foi reportada pela equipa de operações uma degradação do desempenho deste equipamento, bem como a existência de falhas que motivaram paragens não planeadas (35 horas nos últimos 3 anos), causando perdas de produção na ordem das 2275 toneladas de celulose seca ao ar, o que desde logo justifica uma reflexão sobre a performance deste equipamento, incidindo sobre a sua condição atual. Para auxiliar esta reflexão decidiu-se pela elaboração de uma análise FMECA para identificação dos modos de falha mais críticos e posteriores propostas de mitigação dos mesmos.

Para isso, fez-se um estudo exaustivo da bomba antes de se proceder à análise FMECA. Este estudo englobou etapas ao nível integral da bomba, tais como a avaliação das condições operativas e da função do equipamento e seus subcomponentes. Ao nível da manutenção, avaliaram-se ordens e notas de trabalho e verificou-se o plano de manutenção existente relativo à bomba. Ao nível da produção, procedeu-se à avaliação dos *downtimes* (perdas de produção associadas a paragens não planeadas) e das variáveis de controlo de processo existentes, bem como da sua variação ao longo do tempo.

Na Figura 12 pode observar-se o esquema da abordagem utilizada na dissertação.

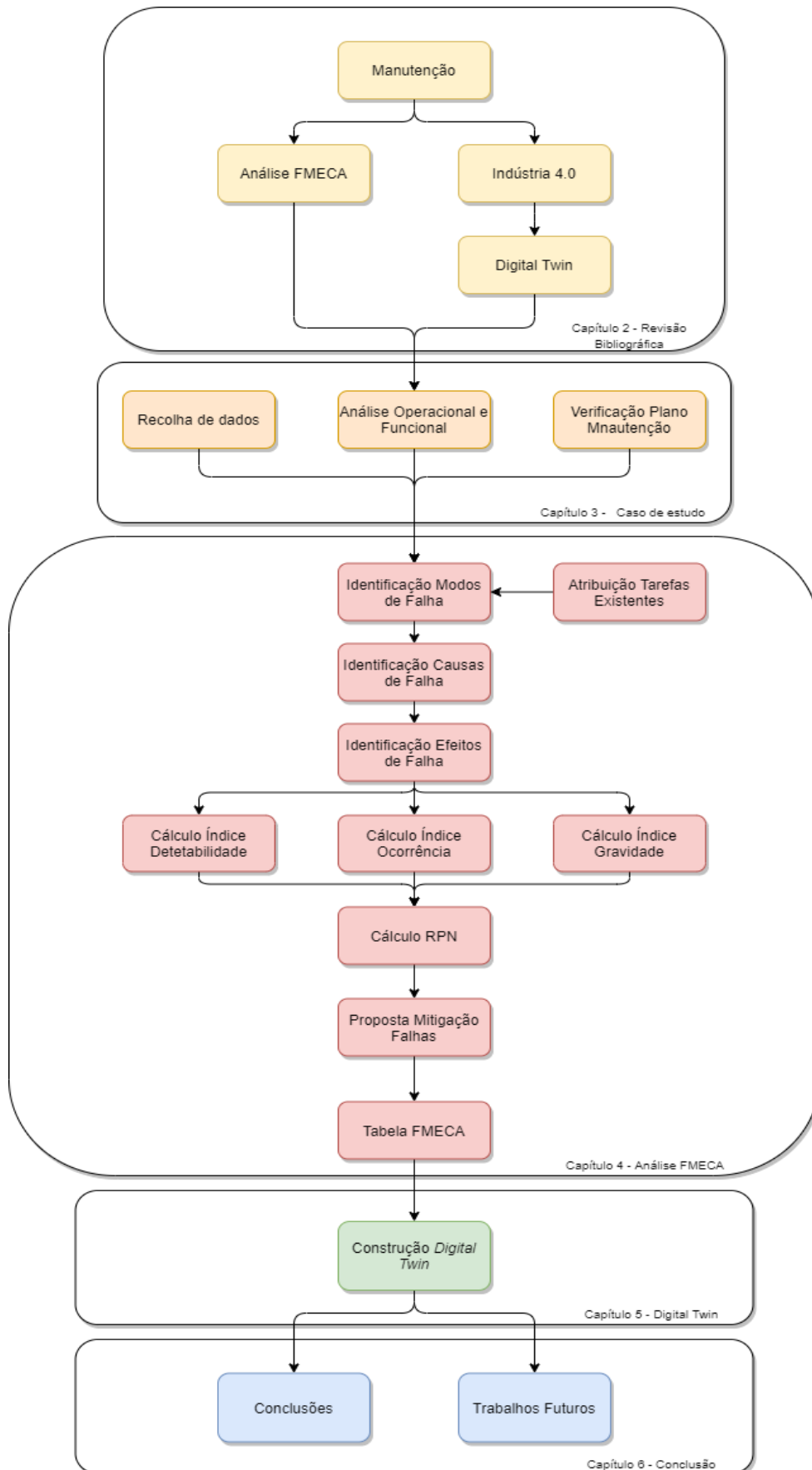


Figura 12 - Esquema da estrutura da dissertação

### 3.2. The Navigator Company

A presente dissertação foi realizada em parceria com a empresa nacional *The Navigator Company*, um produtor integrado de floresta, pasta de papel e papel, *tissue* e energia. A sua atividade é estruturada em fábricas modernas de grande escala com um modelo de negócio apoiado na investigação e inovação tecnológica, assumindo-se assim como uma incontornável referência mundial no seu setor de atividade [40].

A *The Navigator Company* atualmente é a terceira maior exportadora em Portugal e a maior geradora de Valor Acrescentado Nacional, representando 1% do PIB nacional, 3% das exportações nacionais de bens e 6% do total de carga contentorizada exportada pelos portos nacionais. Atualmente, detém uma capacidade instalada que ronda os 1,6 milhões de toneladas de papel e 1,5 milhões de toneladas de pasta [40].

### 3.3. Contexto Operacional

A bomba de média consistência P049 está localizada no circuito de Branqueamento. A sua escolha justifica-se por esta ser um equipamento crítico, o qual demonstrou alguma incapacidade e ineficiência de resposta aos *inputs* da Produção. Na Figura 13 [41] são apresentadas as unidades funcionais distintas necessárias para o processo de fabrico de pasta e papel.

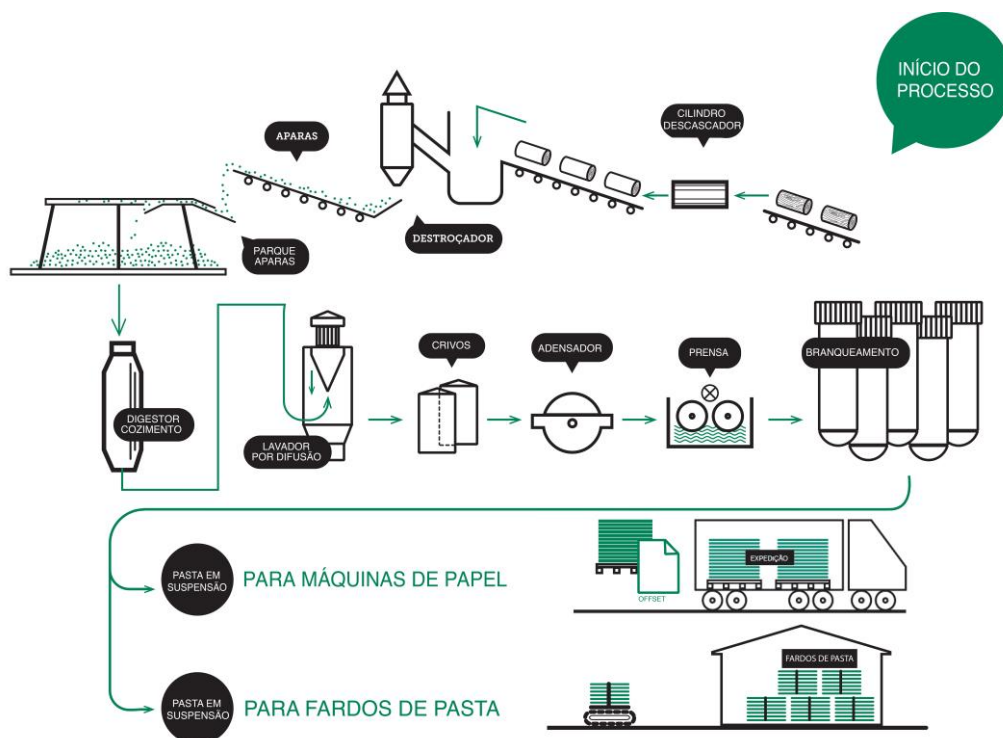


Figura 13 - Circuito de Produção de pasta de papel

O principal objetivo do branqueamento da pasta, a um nível de brancura elevado, é produzir pasta limpa e estável, apta para a produção de papéis brancos de impressão de elevada qualidade. Grande parte das vezes, a limpeza consegue ser mais importante que a brancura, dado que para se obter uma pasta com elevada brancura é necessária uma pasta limpa.

O branqueamento reparte-se em duas fases (Figura 14) [41]:

- 1ª Fase – Deslinhificação – Remoção da lenhina residual e dos produtos de degradação que permanecem na pasta após o cozimento e lavagem.
- 2ª Fase – Branqueamento – Oxidação dos compostos cromóforos e impurezas presentes na pasta. Aumento da estabilidade das pastas à reversão de brancura.

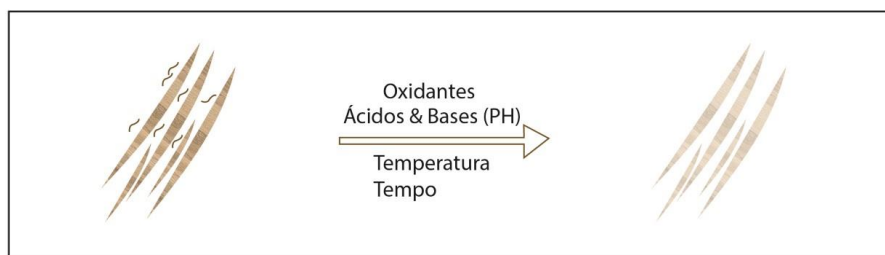


Figura 14 - Exemplo do estado físico da madeira na fase Branqueamento [41]

A bomba P049, localizada na unidade funcional do Branqueamento, secção Deslinhificação, está instalada num sistema que contempla uma prensa de lavagem a montante e uma torre de lavagem por difusão de entre várias prensas e torres presentes no circuito, a jusante. Neste caso, trata-se da prensa 2 e a torre D0 (Figura 15) [41]. A prensa 2, colocada após a prensa de lavagem 1, tem como propósito lavar da pasta substâncias orgânicas e inorgânicas o mais eficientemente possível, ou seja, garantindo um fator de diluição baixo, bem como uma alta secura da pasta.

A pasta prensada a uma consistência de 30 a 32% é retirada por um parafuso sem-fim no topo da prensa. Deste, a pasta é enviada para o parafuso sem fim seguinte, onde é feita a adição de filtrado da prensa da fase seguinte, através de uma bomba a jusante do tanque de filtrados e águas brancas através da fase anterior, para diminuir a consistência da pasta para valores de 10 a 11%, antes de enviar para a torre D0. De seguida a pasta cai para o *standpipe*, onde a bomba P049 irá bombear para a torre D0 para posterior lavagem.



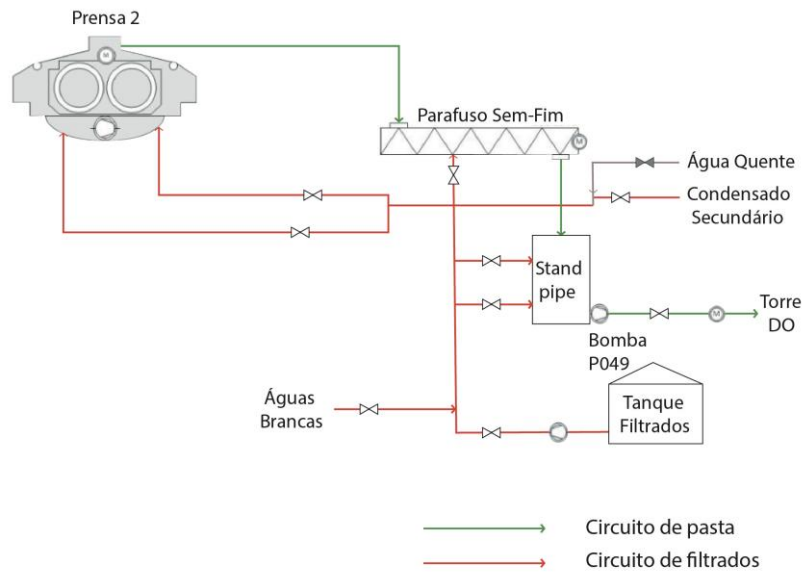


Figura 15 - Circuito de pasta e filtrados da Prensa 2 [41]

Outro fator decisivo para o estudo desta bomba, além de ter sido determinada um ativo industrial crítico, é que numa perspetiva de replicabilidade do estudo, foram identificadas 4 bombas em contexto operacional semelhante no circuito do Branqueamento.

### 3.4. Análise Funcional

Com a contextualização do modo de funcionamento da bomba P049 possibilita-se a análise funcional onde se pretende a identificação das funções necessárias ao cumprimento dos requisitos operacionais por parte do equipamento, bem como a identificação dos componentes principais associados a essas mesmas funções. É através da identificação dessas funções que será possível efetuar uma análise de modos de falha reconhecendo a perda de funcionalidade das mesmas.

Tendo a bomba P049 como função principal o transporte de pasta com um determinado nível de consistência, destacaram-se 7 componentes principais do equipamento indispensáveis para o cumprimento da sua função. Na Figura 16, que representa uma bomba centrífuga genérica em perfil, é possível visualizar os componentes do equipamento em estudo: **voluta**, **rotor**, **empanque mecânico**, **rolamentos**, **veio**, **acoplamento** (não está representado na figura, pois é o componente que conecta a bomba ao motor elétrico) e **base de fixação**.

As bombas centrífugas são utilizadas para o transporte de fluidos através da conversão de energia cinética de rotação para a energia hidrodinâmica do fluxo de fluido. A energia rotacional normalmente vem de um motor elétrico que transforma energia elétrica em trabalho mecânico. Esse trabalho é transferido por meio de um veio sustentado por rolamentos que, ao transmitir a rotação para um rotor, transfere energia cinética para o fluido proveniente do bocal de sucção. Ao passar pela voluta (estreitamento do bocal de descarga) essa energia cinética é transformada em energia potencial até à saída.

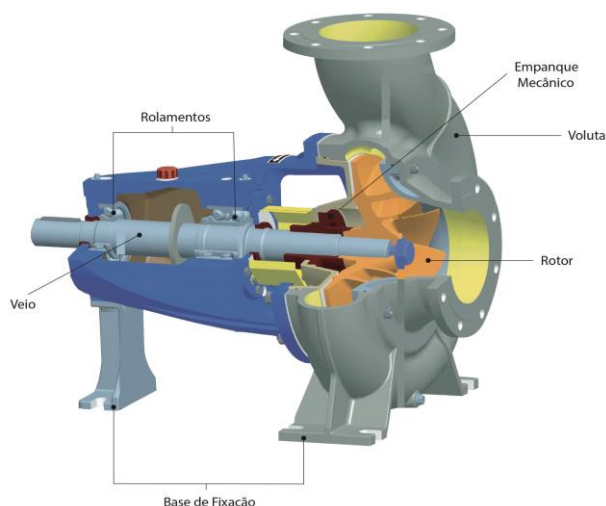


Figura 16 - Bomba centrífuga de média consistência

Após o estudo do funcionamento de uma bomba centrífuga identificaram-se as funções primárias de cada um dos componentes identificados da bomba:

- **Voluta:** Transformar energia cinética em energia potencial;
- **Rotor:** Fornecer energia cinética ao fluido;
- **Rolamentos:** Acomodação de cargas axiais e radiais;
- **Empanque mecânico:** Segurança da vedação do fluido;
- **Acoplamento:** Conexão bomba-motor;
- **Veio:** Transmissão de rotação para o rotor;
- **Base de Fixação:** Redução de vibrações.

Garantindo a informação necessária para uma análise FMECA, a análise funcional permitiu a identificação das funções que serão alvo de análise por esta ferramenta, bem como os componentes críticos responsáveis pelo desempenho dessas mesmas funções. No Anexo A é apresentada informação adicional da bomba P049.

### 3.5. Análise do histórico existente

A análise da informação existente e o tratamento de dados consiste na obtenção do histórico útil relativo à bomba P049 e na sua organização consoante o objetivo final, a realização da análise FMECA. De forma a filtrar a busca de informação, só se contabilizou um período de três anos de histórico, sendo assim o intervalo de tempo desde Junho de 2016 até Junho de 2019.

#### 3.5.1. Ordens e Notas de Trabalho

As ordens de trabalho são documentos que transmitem para a área da intervenção técnica a necessidade de realização do trabalho, fornecendo as instruções necessárias para a sua execução. Servem também como centro aglutinador para o registo de esforço e do histórico de materiais

consumidos, bem como dos respetivos custos na realização do trabalho. Por outro lado, as notas de trabalho são documentos que reportam alguma anomalia do estado atual de um dado equipamento, motivando por sua vez a vontade de adquirir intervenções, formalizando assim a abertura de uma ordem de trabalho sobre o ativo.

As ordens e notas de trabalho relativas à bomba P049 foram extraídas do SAP – *Software* de gestão de empresas – com o dito espaço temporário de 3 anos para ficheiro em formato Excel, e procedeu-se à sua análise e organização da informação. A sua apresentação é feita nos Anexos B e C.

Após abertura e análise dos descritivos das ordens e notas de trabalho, foi feita uma separação e contagem das mesmas por tipologia apresentada na Tabela 5 e Tabela 6, respetivamente. A identificação do componente intervencionado por ordem e nota de trabalho está apresentada também no Anexo B e C, respetivamente.

*Tabela 5 – Listagem das ordens de trabalho*

Tipo de Ordem		Nº
D011	Manutenção Corretiva - Imediato	4
D012	Manutenção Corretiva - Planeada	12
D013	Ordem de Reparação	7
D021	Manutenção Preventiva - Monitorização de condição	0
D022	Manutenção Preventiva - Planeada	0
D031	Ordem de investimento	0
D041	Ordem de contrato de serviço	0
D051	Ordem de melhoria	0
D061	Ordem Anual de Shutdown	1

*Tabela 6 – Listagem das notas de trabalho*

Tipo de notas		Nº
M1	Pedido de melhoria da Produção	0
M2	Notificação de mau funcionamento	10
M3	Relatório de atividade	4
M4	Nota de reparação	9
M5	Nota da Vigilância da Produção	0
M6	Nota da Vigilância da Manutenção	2
M8	Pedido de melhoria da Manutenção	0
AA	Relatório da análise de falha	0

Esta organização da listagem das ordens e notas de trabalho por tipologia e por tipo de componente intervencionado permitiu a identificação de alguns modos de falha e dos componentes da bomba que apresentam maior probabilidade de falha. Devido a alguma falta de rigor no preenchimento das ordens

e notas de trabalho, não foi possível identificar especificamente qual o modo de falha e o componente que falhou, o que implica uma incerteza associada à análise e justifica a realização de uma análise FMECA para a sistematização dos modos de falha mais prováveis e de consequências mais críticas.

### 3.5.2. Downtimes

O termo *downtime* é utilizado para referir o período em que um dado sistema esteve indisponível, ou seja, o período em que um dado sistema falhou realizar a sua função primária.

Através do sistema *in house*, utilizado para introdução de eventos de perda de produção, foi possível retirar os *downtimes* relativos à bomba P049 (consultar Anexo D); sabendo a produção horária do circuito do Branqueamento (PB) e o preço por tonelada de celulose seca ao ar (tAD), conseguiu-se calcular o custo total (CT) das falhas da bomba nos últimos 3 anos.

$$\text{Tempo total de paragem (T)} = 34,4 \text{ h} \quad (3)$$

$$\text{Produção Branqueamento (PB)} = 65 \text{ tAD/h} \quad (4)$$

$$\text{Preço tAD} = 485,5 \text{ €/tAD} , \text{ à data de 7 de Outubro de 2019.} \quad (5)$$

$$\text{Perdas Produção (PP)} = PB \times T = 2\,231,7 \text{ tAD} \quad (6)$$

$$\text{Custo Perdas (CT)} = PP \times \text{Preço tAD} = 1\,083\,490,35 \text{ €} \quad (7)$$

Como podemos ver pelo resultado do custo das perdas devidas à paragem da bomba P049, cerca de um milhão de euros nos últimos três anos, este equipamento verifica a necessidade de melhoria no seu rendimento operacional, justificando a realização do presente caso de estudo.

No entanto, devido a alguma falta de rigor no preenchimento das ordens e notas de trabalho não foi possível saber o *downtime* de cada uma das intervenções feitas no equipamento, apenas de uma perspetiva global do espaço de tempo (3 anos).

### 3.5.3. Process Flow Diagram

O *Process Flow Diagram* (PFD) é um diagrama de processo de fluxo normalmente usado na Engenharia de Processo para indicar o fluxo geral de um circuito de processos e equipamentos. O mesmo não mostra detalhes menores, como as designações e dimensões das linhas de tubo, mas tipicamente refere os maiores equipamentos, as principais funções de controlo de processo (pressão, caudal, nível, entre outras), conexão com outros sistemas, a informação operacional (temperatura, pressão, densidade, taxa de fluxo de massa, entre outros) e o nome dos principais processos.

O PFD (Figura 17) no qual a bomba P049 (assinalada por um círculo vermelho) está inserida foi visualizado através do sistema operativo da empresa (DCS, do inglês *Distributed Control System*). Após estudo do circuito, identificaram-se as seguintes variáveis operacionais medidas em relação à bomba P049:

- Intensidade de corrente do motor elétrico;
- Consistência da pasta;
- Caudal de pasta;
- Nível de controlo do *standpipe* a montante da P049.

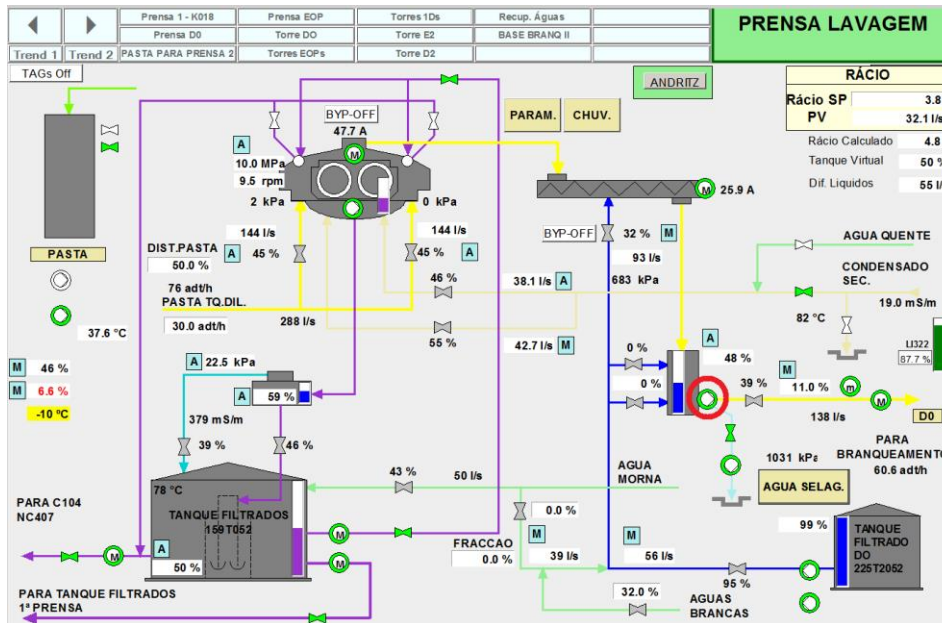


Figura 17 - Screenshot da linha de processo da Prensa 2 através do DCS

De seguida, através do *Uniformance* – software para histórico e análise de processos – foi possível recolher o dado histórico de cada uma dessas variáveis num espaço temporal de 3 anos com medições médias horárias (Tabela 7).

A identificação das variáveis processuais e a obtenção do dado histórico foram realizadas tendo em vista dois objetivos diferentes. A identificação das variáveis processuais teve como objetivo o estudo da análise FMECA, mais propriamente, a identificação das causas de falha. Por sua vez, a obtenção do dado histórico dessas variáveis serviu para um estudo de analítica no que toca à construção do DT, como se verá no Capítulo 4.

Tabela 7 - Excerto do dado histórico das variáveis operacionais medidas no contexto operacional da bomba P049

159P049_A	CORRENTE	159FI479	CAUDAL	159LC477	NIVEL ST-PIPE	159NC466	CONSISTENCI A
Average- Timestamp	Average	Average- Timestamp	Average	Average- Timestamp	Average	Average- Timestamp	Average
07/06/2016	45,0080	07/06/2016	154,1361	07/06/2016	54,8409	07/06/2016	11,3580
07/06/2016 01:00	45,0080	07/06/2016 01:00	154,1361	07/06/2016 01:00	54,8409	07/06/2016 01:00	11,3580
07/06/2016 02:00	45,0080	07/06/2016 02:00	154,1361	07/06/2016 02:00	54,8409	07/06/2016 02:00	11,3580
07/06/2016 03:00	45,0080	07/06/2016 03:00	154,1361	07/06/2016 03:00	54,8409	07/06/2016 03:00	11,3580
07/06/2016 04:00	45,0080	07/06/2016 04:00	154,1361	07/06/2016 04:00	54,8409	07/06/2016 04:00	11,3580
07/06/2016 05:00	45,0080	07/06/2016 05:00	154,1361	07/06/2016 05:00	54,8409	07/06/2016 05:00	11,3580
07/06/2016 06:00	45,0080	07/06/2016 06:00	154,1361	07/06/2016 06:00	54,8409	07/06/2016 06:00	11,3580
07/06/2016 07:00	45,0080	07/06/2016 07:00	154,1361	07/06/2016 07:00	54,8409	07/06/2016 07:00	11,3580

### 3.6. Verificação do plano de manutenção existente

A manutenção SAP-PM é um tipo de manutenção baseado em “Ordens PM”. Estas ordens são geradas pelo sistema, para os técnicos de manutenção, de forma manual a partir de notificações de avarias (manutenção corretiva), ou automaticamente a partir de planos de manutenção (manutenção preventiva, preditiva e/ou detetiva).

Os planos de manutenção dos equipamentos são obtidos em SAP através do cruzamento de três objetos (bases de dados), que em conjunto formulam os requisitos de manutenção de um determinado Ativo Industrial. Os três objetos referidos e suas funções são:

- “PLANO DE MANUTENÇÃO” – Permite parametrizar o calendário base afeto ao plano de manutenção, gerindo deste modo as datas para a solicitação das rotinas de manutenção;
- “ITEM DE MANUTENÇÃO” – Define os Ativos Industriais que serão objeto de um conjunto de ações de manutenção, bem como quem executa essas ações de manutenção;
- “GRUPOS DE ROTEIROS” – Define o conjunto de ações de manutenção, a sua duração e sua periodicidade, afetos aos Ativos de Manutenção descritos no Item de Manutenção.

Após a pesquisa dos itens de manutenção da bomba P049, foram obtidos três planos de manutenção relacionados com os requisitos de manutenção das especialidades elétrica (ASG Elétrica, Ação Sensorial Genérica Elétrica, rota de inspeção que apela ao sentido dos colaboradores que no Ativo Industrial inspecionam), de motores elétricos (AMS, Ação Manutenção Sistemática) e em particular da bomba (AMS – PA, Ação Manutenção Sistemática na Paragem Anual), apresentados em forma de lista de tarefas onde é representada a periodicidade (T) com que cada plano é realizado. Os Planos de Manutenção são apresentados no Anexo E.

Além destas três listas de tarefas como parte integrante do plano de manutenção preventiva da bomba P049, são também tidas em conta as rotinas de lubrificação e vibração. A rotina de lubrificação é feita com uma frequência mensal, e contempla a lubrificação a massa em três pontos: cárter dos rolamentos da bomba e os dois rolamentos do motor, estes com massa especial para motores (consultar Anexo F).

Por último, a rotina de vibração consiste numa lista de equipamentos a analisar segundo uma determinada rota ou área funcional, na qual cada equipamento contém um número determinado de pontos caracterizados pela norma ISO10816 que permitem efetuar a análise de vibrações, neste caso pontos de medição da bomba, seis no motor elétrico e cinco na bomba. Em relação às rotinas, a bomba está inserida em duas rotinas de vibração com uma periodicidade de um mês, mas espaçadas em cerca de 15 dias, o que faz com que a bomba seja analisada em termos de vibração quinzenalmente. Nos Anexos G e H pode-se visualizar as duas rotinas de vibração e os pontos de medição da bomba, respetivamente. Segundo o especialista na área e responsável pelas medições, a rotina de vibração inspeciona os componentes, acoplamento, rolamentos, base de fixação, veio e rotor.

Recolhida esta informação foi possível determinar, para cada componente identificado na bomba, as necessárias tarefas preventivas, que no seu conjunto perfazem o plano de Manutenção deste equipamento.

## **4. Análise FMECA**

No presente capítulo, realiza-se a análise FMECA do equipamento, com a identificação dos modos, causas e efeitos de falha classificados quanto ao seu nível de criticidade e apresentação de propostas de mitigação para os mesmos.

Uma vez definidas as funções de cada componente que garantem o bom funcionamento do equipamento e por sua vez a função principal, é então possível identificar os principais modos de falha associados às mesmas, ou seja, como é que a função deixa de ser realizada, as causas que levam ao não cumprimento dessa função e quais as suas consequências (efeitos de falha) para a infraestrutura e para o processo. Após consulta do plano de manutenção preventiva e das rotinas de vibração e lubrificação da bomba P049, são verificadas as tarefas do ponto de vista de manutenção sobre cada componente da bomba. Numa segunda fase, uma vez feita a análise FMEA, é realizada a análise de criticidade de cada modo de falha identificado anteriormente. Finalmente, é feita uma proposta para a mitigação de falhas em cada um dos modos de falha identificados.

De forma a ser mais explícita e organizada a metodologia usada na presente dissertação, sentiu-se necessidade de subdividir cronologicamente a análise em quatro subcapítulos:

- Análise FMEA
- Tarefas Existentes
- Análise de criticidade
- Proposta de mitigação de falhas

Esta análise fica completa com a realização e preenchimento de uma tabela FMECA com os dados e informação relativos à realização da análise e posteriores propostas de mitigação de falhas. A sua criação e construção será explicada nos próximos subcapítulos, sendo também possível consultá-la no Anexo I.

### **4.1. Análise FMEA**

A realização da análise FMECA começou por identificar os modos, causas e efeitos de falha mais comuns em bombas centrífugas de média consistência através de um estudo empírico sempre associado aos componentes e às suas funções identificadas anteriormente. Após esse primeiro passo, sentiu-se necessidade de obter a informação e experiência dos colaboradores que mais contato tinham com o ativo. Portanto, calendarizaram-se duas reuniões, a primeira com o objetivo de realização da análise FMEA e a segunda para a realização da análise de criticidade, com os responsáveis das áreas de Produção, Manutenção Local, Operações e colaboradores integrantes da Engenharia da Manutenção, no sentido de completar a análise FMECA.

A decisão de fazer reuniões com todas as áreas envolvidas e não apenas reuniões particulares com cada área deveu-se à questão da logística e disponibilidade dos colaboradores, para que em grupo se promovesse uma melhor discussão, obtendo pontos de vista diferentes sobre o ativo em discussão, e



acima de tudo, para os envolventes estarem a par do contexto em que a análise assenta e da finalidade desta.

A primeira de duas reuniões consistiu na revisão do estudo previamente feito (identificação dos modos, causas e efeitos de falha genéricos numa bomba centrífuga) e no seu enriquecimento através dos *inputs* dados pelas pessoas presentes na reunião, baseados nas suas experiências e conhecimento do ativo em questão. Assim, foi possível determinar os modos, causas e efeitos de falha de cada função dos componentes constituintes da bomba. Em relação a cada componente e à sua respetiva função foram identificados 22 modos de falha, representados na Tabela 8. É importante realçar que aqui só são apresentados os modos de falha, por forma a facilitar o entendimento do caso de estudo e por serem estes modos que são avaliados quanto ao seu índice de criticidade. No entanto, é possível averiguar em anexo o conjunto das causas e efeitos de falha na Tabela FMECA (Anexo I).

A voluta, cuja função é a contenção do fluido comprimido e a conversão da energia cinética em energia potencial, tem identificados três modos de falha. Um é simplesmente a não concretização da sua função devido a fissuras ou corrosão-erosão. Depois, a contaminação exterior, também por corrosão-erosão ou algum tipo reagente químico presente no exterior da bomba, e por fim a fadiga do componente por vibração anormal. Têm todas consequências de falha similares, tais como a paragem ou baixo rendimento da bomba.

Em termos de fornecimento de energia cinética para o fluido temos o rotor, cujos modos de falha, redução da altura de sucção (ou seja, a pressão de sucção reduzida) e pressão de compressão reduzida (ou seja, pressão à saída da bomba é baixa) resultam da cavitação da bomba, o que leva ao aparecimento de ruído e vibração, baixo rendimento da bomba e desgaste do impulsor (constituente do rotor). A pressão de descarga elevada, resultado da tubagem de descarga entupida ou falha na válvula automática da compressão da bomba, tem como efeitos de falha, a vibração, ruído e caudal reduzido de descarga. O rotor gasto ou danificado tem como causas de falha a cavitação da bomba, existência de contaminantes no fluido ou até mesmo a própria consistência do fluido não ser a adequada, levando também a um caudal reduzido de descarga. Por último, a corrosão como modo de falha deve-se ao fluido presente na bomba não ser o correto, resultando numa eventual falha catastrófica na bomba.

O empanque mecânico, responsável pela vedação do fluido, apresenta quatro modos de falha. A condução do processo por motivo de paragens intempestivas ou variabilidade do processo resulta na degradação do empanque. Os modos de falha, tipo de empanque mecânico por causa de uma má seleção do empanque e a fuga através do empanque devido a uma junta danificada, falta de líquido de selagem ou camisa do veio marcada, têm ambos o mesmo efeito de falha, que consiste na fuga do fluido para o exterior. O último modo de falha, falta de líquido de selagem, tem por causas a paragem da bomba de água de selagem, fuga na tubagem ou falha do sistema de recuperação de águas de selagem, resultando num encravamento da linha de produção e degradação do empanque.

O veio, componente encarregue da transmissão de rotação para o rotor, além da falha de transmissão de rotação devido à sua fratura, tem ainda dois modos de falha: a deflexão e o desalinhamento do veio. A deflexão ocorre quando a força de impulso radial no rotor é elevada, e o desalinhamento do veio

deve-se ao desgaste do impulsor. Os três modos de falha apresentam efeitos como vibração, desgaste do rolamento ou fuga no empanque mecânico.

Tabela 8 – Modos de Falha dos componentes da bomba P049

Componente		Função	Modos de Falha	
1	Voluta	Contenção do fluido comprimido e transformação de energia cinética em energia potencial	A	- Falha na contenção do fluido
			B	- Contaminação exterior
			C	- Fadiga
2	Rotor	Fornecimento de energia cinética para o fluido	A	- Redução da altura de sucção
			B	- Pressão de compressão reduzida
			C	- Pressão de descarga elevada
			D	- Rotor gasto ou danificado
			E	- Corrosão
3	Empanque mecânico	Segurança da vedação do fluido	A	- Condução do processo
			B	- Tipo de empanque mecânico
			C	- Fuga através do empanque mecânico
			D	- Falta de líquido de selagem
4	Veio	Transmissão de rotação para o rotor	A	- Falha na transmissão de rotação
			B	- Deflexão do veio
			C	- Desalinhamento do veio
5	Rolamentos	Acomodação de cargas axiais e radiais	A	- Desalinhamento do conjunto bomba-motor
			B	- Falha no rolamento
			C	- Defeito na fixação da bomba
			D	- Nível baixo do óleo
			E	- Suporte inadequado ao veio
6	Acoplamento	Acoplamento bomba-motor	A	- Falha no acoplamento
7	Base de fixação	Reduzir vibrações	A	- Falha na fixação da bomba à base

Da acomodação de cargas axiais e radiais sobre o veio encarregam-se os rolamentos, cujos modos de falha são o desalinhamento do conjunto bomba-motor, falha nos rolamentos, defeito na fixação da bomba, nível baixo do óleo e suporte inadequado ao veio. Como causas e efeitos de falha, o desalinhamento é resultado de uma montagem inadequada do conjunto, o que causa o desgaste dos próprios rolamentos. A falha nos rolamentos deve-se a um defeito nos mesmos, causando uma eventual danificação da bomba e motor. O defeito na fixação da bomba tem como causas um *chassis* danificado, a quebra do suporte da bomba ou o parafuso de fixação de suporte ao *chassis* estar danificado, resultando em vibração, ruído e rolamentos gripados. O nível baixo do óleo deve-se a uma fuga de óleo que faz gripar os rolamentos, e por fim, o modo de falha designado como suporte inadequado ao veio tem por causa de falha a fratura ou desgaste do rolamento, e como efeitos de falha, a paragem da bomba, vibração excessiva e danos no encaixe.

O componente acoplamento tem como único modo de falha, a falha no acoplamento do conjunto bomba-motor devido a vibração no conjunto, possível folga no aperto ou desalinhamento do veio. Os efeitos provenientes do modo de falha são a rotura do acoplamento, ruído e vibração excessiva.

Por último, com o objetivo da redução de vibrações temos a base de fixação, cuja falha tem por causas, um excesso de vibração ou de carga axial, a contaminação da base pelo meio envolvente, e efeitos de falha como a paragem ou baixo rendimento da bomba.

## 4.2. Tarefas Existentes

Após a identificação dos modos, causas e efeitos de falha, procedeu-se ao preenchimento da secção “Tarefas Existentes” sobre cada um dos componentes segundo o plano de manutenção preventiva e rotinas de vibração e lubrificação já observados. Na Tabela 9 são apresentados os componentes com as respetivas tarefas existentes.

A voluta não apresenta indicação de tarefas existentes incidentes sobre si; contudo, quando nos referimos ao componente rotor, existe uma tarefa do plano de manutenção preventiva que recomenda a abertura da bomba e a sua inspeção. Quer isto dizer que uma vez aberta a bomba, é inspecionado tanto o rotor como a voluta no seu interior, falhando só a indicação no plano de manutenção. Além desta tarefa, o rotor também é inspecionado quinzenalmente através da análise de vibrações, de forma a ser possível detetar algum desequilíbrio.

Em relação ao empanque mecânico, a única tarefa existente é a verificação do circuito do líquido de selagem proveniente do plano de manutenção.

O veio, além de ser verificado através da análise de vibrações para o caso de existência de algum desalinhamento, é também verificado através do plano de manutenção pela tarefa que indica a verificação e registo do seu alinhamento.

Quanto aos rolamentos, são inspecionados tanto pela rotina da análise de vibrações como pela rotina de lubrificação. No caso do componente base de fixação, somente pela rotina da análise de vibrações que permite detetar algum tipo de folgas.

Tabela 9 – Tarefas existentes dos componentes da bomba P049

Componente		Tarefas Existentes
1	Voluta	-----
2	Rotor	- Inspeção visual - Análise de vibrações
3	Empanque mecânico	- Verificação do sistema de refrigeração (circuito do líquido de selagem)
4	Veio	- Verificação e registo do alinhamento - Análise de vibrações
5	Rolamentos	- Análise de vibrações - Rotina de lubrificação
6	Acoplamento	- Inspeção visual - Análise de vibrações
7	Base de fixação	- Análise de vibrações

Por fim, segundo o plano manutenção preventiva, existe uma tarefa específica para o acoplamento que contempla a ordem de inspeção do componente. Também é tida em conta a análise de vibrações para detetar uma eventual má montagem.

### 4.3. Análise de criticidade

A segunda reunião, destinada à realização da análise de criticidade dos modos de falha previamente revistos e aceites na primeira reunião, foi efetuada com os mesmos colaboradores da primeira reunião, e a classificação dos índices utilizados para o cálculo do índice de criticidade ou RPN foi feita com base nos seus *inputs* e experiências adquiridas sobre o ativo em questão, a bomba P049.

A norma utilizada foi a IEC 60812, por ser a adotada dentro da empresa. No entanto, para promover fluidez na reunião sentiu-se necessidade de realizar uma parametrização das tabelas usadas no cálculo dos índices de gravidade, ocorrência e detetabilidade. A parametrização consistiu na redução de níveis de avaliação e num desfasamento maior entre os fatores de cada nível, de modo a realçar os modos de falha mais críticos. As tabelas parametrizadas relativamente ao índice de gravidade, ocorrência e detetabilidade encontram-se representadas nas Tabelas 10, 11 e 12, respetivamente.

Tabela 10 - Parametrização do índice de gravidade

Gravidade	Fator	Efeito(s) da(s) Falha(s)
Grave	9	Potenciais problemas de segurança
Moderada	3	Descontentamento do Cliente
Ligeira	1	Ligeiro inconveniente no Cliente

Tabela 11 - Parametrização do índice de ocorrência

Ocorrência	Fator	Critério
Alta	9	Probabilidade alta de falha
Moderada	3	Probabilidade moderada de falha
Baixa	1	Probabilidade baixa de falha

Tabela 12 - Parametrização do índice de detetabilidade

Detetabilidade	Fator	Probabilidade de deteção
Remota	9	Baixa probabilidade de o controlo definido na conceção conseguir detetar a potencial causa/mecanismo e subsequente modo de falha
Moderada	3	Probabilidade moderada de o controlo definido na conceção conseguir detetar a potencial causa/mecanismo e subsequente modo de falha
Alta	1	Alta probabilidade de o controlo definido na conceção conseguir detetar a potencial causa/mecanismo e subsequente modo de falha

Uma vez feita a parametrização das tabelas e conseguida uma familiarização com os seus fatores e significados, foi possível proceder à classificação dos modos de falha quanto aos seus índices de gravidade, ocorrência e detetabilidade, e posterior cálculo do RPN. Sendo assim, na Tabela 13 é representada a classificação dos modos de falha quanto à sua criticidade (a seguinte tabela é um excerto da tabela FMECA encontrada no Anexo I, para facilitar a visualização).

É possível verificar que o modo de falha com maior risco é o da falha na contenção do fluido na componente voluta, enquanto os modos de falha de menor risco são variados: no rotor, temos a redução da altura de sucção e pressão de compressão reduzida. No empanque mecânico, a falta de líquido de selagem. Nos rolamentos, a fixação defeituosa da bomba, e na base de fixação, a falha na fixação da bomba à base.

A razão por que um modo de falha apenas se destaca pela negativa de todos os outros deve-se ao facto de ter sido avaliado como grave em relação à probabilidade de gravidade, ou seja, o modo de falha potencia reais problemas de segurança, enquanto a sua detetabilidade foi avaliada como remota devido ao controlo definido na conceção não conseguir detetar a potencial causa de falha e subsequente modo de falha, perfazendo assim um valor de RPN igual a 81 para o modo de falha, falha na contenção do fluido no componente voluta.

Tabela 13 - Análise de criticidade dos modos de falha da bomba P049

Componente		Modo de Falha	S	O	D	RPN
1	Voluta	A • Falha na contenção do fluido	9	1	9	81
		B • Contaminação exterior	9	1	1	9
		C • Fadiga	9	1	1	9
2	Rotor	A • Redução da altura de sucção	3	1	1	3
		B • Pressão de compressão reduzida	3	1	1	3
		C • Pressão de descarga elevada	9	1	1	9
		D • Rotor gasto ou danificado	3	1	9	27
		E • Corrosão	3	1	9	27
3	Empanque mecânico	A • Condução do processo	3	3	3	27
		B • Tipo de empanque mecânico	9	1	3	27
		C • Fuga através do empanque mecânico	3	1	3	9
		D • Falta de liquido de selagem	1	1	3	3
4	Veio	A • Falha na transmissão de rotação	9	1	1	9
		B • Deflexão do veio	9	1	3	27
		C • Desalinhamento do veio	9	1	3	27
5	Rolamentos	A • Desalinhamento do conjunto motor-bomba	3	1	3	9
		B • Falha no rolamento	3	1	3	9
		C • Defeito na fixação da bomba	3	1	1	3
		D • Nível baixo do óleo	9	1	1	9
		E • Suporte inadequado ao veio	9	1	1	9
6	Acoplamento	A • Falha no acoplamento	9	1	1	9
7	Base de Fixação	A • Falha na fixação da bomba à base	3	1	1	3

Conclui-se que o modo de falha a que é necessário dar mais atenção é o problema da contenção do fluido, quer seja pela probabilidade da gravidade, quer seja pela probabilidade de detetabilidade que se obtém maior risco de causar a inoperacionalidade da bomba P049. Apesar de este ser o modo de falha com maior risco, os demais não devem ser ignorados, mais propriamente os modos de falha com um RPN igual a 27 (sinalizados a laranja na tabela), podendo também gerar a inoperacionalidade da bomba ou danos maiores.

#### **4.4. Proposta de mitigação de falhas**

Com a finalização da análise, segue-se a atribuição das tarefas de manutenção adequadas para o equipamento identificado no processo de análise. Como a bomba P049 está em serviço contínuo, o grupo deseja manter esse ativo operacional, disponível para atuar sempre que necessário.

Para isso são propostas tarefas de manutenção com o intuito de garantir a disponibilidade do equipamento e impedir a deterioração acentuada do mesmo, evitando, no entanto, um elevado investimento de capital. Estas medidas englobam não só ações de manutenção preventiva com o objetivo de enriquecer o plano de manutenção preventivo, mas também a inclusão de tarefas ou equipamentos que permitam a análise do estado do equipamento em tempo real e a formação de equipas responsáveis por realizarem as ações de manutenção no equipamento.

A descrição das operações a executar no equipamento nas diversas intervenções do ciclo de manutenção encontra-se em forma mais detalhada nas instruções do processo (Tabela 14).

O preenchimento do campo das ações recomendadas de forma a otimizar o plano de manutenção do ativo e a mitigar os modos de falha identificados através da resolução da análise foi feito através do estudo e análise de casos de estudo na área, com o apoio e experiência dos responsáveis da Engenharia da Manutenção do grupo.

Em relação à voluta, é aconselhável a indicação da tarefa “Inspeção visual da voluta” no plano de manutenção preventiva e realizá-la anualmente aquando da paragem anual da fábrica, de modo a conseguir antecipar alguma contaminação exterior ou possível fissura visível. Também se sugere a criação de um relatório mensal, onde cada responsável pela realização da inspeção exterior possa anotar a data em que a realizou, notas para recolher informação para tomar em conta na próxima inspeção ou também para permitir à pessoa responsável pela manutenção do equipamento alterar algum procedimento do seu plano de manutenção. O tratamento superficial interior e a realização do ensaio não destrutivo com líquido penetrante previnem a ocorrência de corrosão interior e fissuração não visível a olho nu no exterior.

O componente rotor está bem protegido de falhas tanto pela bomba de vácuo como pela altura elevada de aspiração (nível do *standpipe*), o que previne eficazmente a cavitação da bomba e muitas outras causas de falha presentes na tabela FMECA. Sendo assim, é proposto apenas que seja feita uma verificação diária da bomba por ruído no caso de ser detetado algum ruído anormal e seja feita uma análise de vibração.

Tabela 14 - Tarefas de manutenção propostas para a bomba P049

Componente		Ação de manutenção	Frequência
1	Voluta	Inspeção visual interior e Ensaio Não Destrutivo – Líquido Penetrante.	Paragem anual (1 ano)
		Tratamento superficial no interior.	Paragem anual (5 anos)
		Inspeção visual exterior.	1 mês
		Criação de um relatório mensal para análise condição.	Ação única
2	Rotor	Verificação do funcionamento da bomba por ruído.	1 dia
3	Empanque mecânico	Inspeção visual das sedes de selagem e líquido de selagem.	Paragem anual (1 ano)
		Colocação de alarmes de falta de líquido de selagem no DCS.	Ação única
		Colocação de sensores de caudal no circuito de água de selagem.	Ação única
4	Veio	Inspeção visual e Ensaio Não Destrutivo – Líquido Penetrante ou Partículas Magnéticas.	Paragem anual (1 ano)
		Verificação do aperto dos parafusos da chumaceira segundo especificação do fabricante.	Paragem anual (1 ano)
5	Rolamentos	Treino da equipa responsável pela montagem dos rolamentos.	1 ano
		Inspeção visual.	Paragem anual (1 ano)
		Colocação de sensores de temperatura nos rolamentos.	Ação única
6	Acoplamento	Verificação da existência de folgas; em caso afirmativo, atuar em conformidade.	15 dias
7	Base de fixação	Verificação do aperto do motor elétrico à base e dos pontos de apoio da bomba à base.	Paragem anual (1 ano)

Como ação recomendada de manutenção preventiva, o empanque mecânico deve ser inspecionado anualmente quanto às sedes de selagem e ao líquido de selagem. Tal deve também ser indicado no plano de manutenção preventiva. Em relação a tipos de ações únicas propõe-se a colocação de alarmes de falta de líquido de selagem no DCS e a monitorização do caudal do líquido de selagem através da instalação de sensores de caudal, para que seja detetada alguma falha do sistema de recuperação de águas de selagem, ou a deteção incorreta da falta de líquido de selagem, entre outras causas.

O veio deve ser inspecionado anualmente de forma a observar sinais de corrosão e a sua indicação deve constar no plano de manutenção preventiva. Como auxílio da inspeção visual, podem ser feitos dois tipos de Ensaio Não Destrutivos (END): o teste do líquido penetrante ou o teste das partículas magnéticas. Deve também ser feita uma verificação dos apertos dos mancais; caso seja necessário ser feito algum aperto, realizá-lo segundo as especificações do fabricante. Isto irá prevenir de forma mais eficaz um possível modo de falha, como o desalinhamento do veio ou o seu desequilíbrio.



Os rolamentos, apesar de não apresentarem nenhum modo de falha considerado crítico, têm espaço para melhorias. Como o desalinhamento do conjunto motor-bomba advém de uma montagem inadequada dos rolamentos, é aconselhável um treino/*workshop* anual da equipa responsável pela sua montagem. Por outro lado, a colocação de sensores de temperatura nos rolamentos tem o propósito de permitir monitorizar e controlar as altas temperaturas que se fazem sentir nos rolamentos, antecipando a paragem da bomba devido a alguma temperatura excessiva. Deve igualmente indicar-se no plano de manutenção preventiva a sua inspeção visual e realizá-la de acordo com a sua periodicidade.

Por fim, quanto ao acoplamento e à base de fixação, propõe-se a verificação de existência de folgas no acoplamento e a verificação do aperto à base do motor elétrico e dos pontos de apoio da bomba de modo a prevenir as causas de falha, como a vibração no conjunto, desalinhamento do veio, desapertos ou folgas.

Posto isto, é preciso ter em conta que a apresentação de propostas de mitigação de falhas tem por base algum racionamento de tempo e recursos, como já referido anteriormente, mas também a proposição de medidas que pudessem ser realizadas na prática e adaptando o raciocínio e conhecimento adquirido pela pesquisa e partilha de experiência dos colaboradores do grupo com o plano de manutenção preventiva do equipamento.

A tabela apresentada, conta já com alguns *inputs* da equipa da engenharia da manutenção, tendo as sugestões realizadas sido bem aceites, nomeadamente as feitas para os componentes 1, 4 e 5.

Uma vez recolhida, analisada e sistematizada a informação sobre o equipamento e a sua *performance*, e realizada uma reavaliação do plano de Manutenção, a empresa considerou esta uma boa oportunidade para desenvolver um teste piloto relativamente aos conceitos de modelos preditivos e simulação de sistemas ciber-físicos – DT, pois faz parte da estratégia da empresa a passagem de uma lógica de manutenção corretiva e preventiva para alcançar níveis preditivos. Para isso foi proposto utilizar o mesmo sistema produtivo em estudo, sendo um exemplo de como os novos conceitos tecnológicos terão de continuar a utilizar as ferramentas-base das áreas de Manutenção e Fiabilidade.

Não se trata do âmbito formal da presente dissertação, mas sendo um desenvolvimento natural da mesma, propõe-se uma breve apresentação, no capítulo seguinte, dos conceitos de DT e dos modelos preditivos testados.

## 5. Digital Twin

Um DT é uma cópia digital ou virtual de ativos ou produtos físicos, com a capacidade de conectar os mundos real e virtual através da recolha de dados em tempo real de sensores instalados. Os dados recolhidos estão armazenados localmente em servidores, ou centralmente numa *Cloud*. Os dados deste armazenamento são avaliados e simulados numa cópia virtual dos ativos. Depois da receção da informação proveniente da simulação, os parâmetros são aplicados aos ativos físicos. Esta integração de informação em representações reais e virtuais ajuda à otimização do desempenho dos ativos físicos, onde essas simulações digitais do seu comportamento permitem prever potenciais falhas do equipamento. Pode ser aplicado em várias indústrias, como a de produção, automóvel, construção e saúde [42].

### 5.1. Simulação

O DT insere-se na lógica da I4.0, fazendo parte de um dos pilares – Simulação – cuja ação representa uma jornada do mundo físico para o mundo digital e de volta ao mundo físico. Esta jornada física-digital-física do equipamento alvo do caso de estudo, a bomba de média consistência P049, teve início no trabalho feito sobre o caso de estudo e posterior passagem pelo mundo digital através da implementação de ferramentas de análise avançada, nomeadamente, modelos preditivos para antecipar falhas do equipamento. A nova passagem para o mundo físico sucede-se atingindo o comportamento desejado do equipamento através da simulação do DT e passando o mesmo para o equipamento real (equipamento físico).

A Figura 18 apresenta as fases necessárias para realizar essas ditas passagens entre o mundo físico e o digital. Destas quatro fases distintas, as duas primeiras etapas, a definição do domínio do DT e a integração de dados relativos ao equipamento em estudo, tiveram como fundamental para a sua realização o presente caso de estudo.

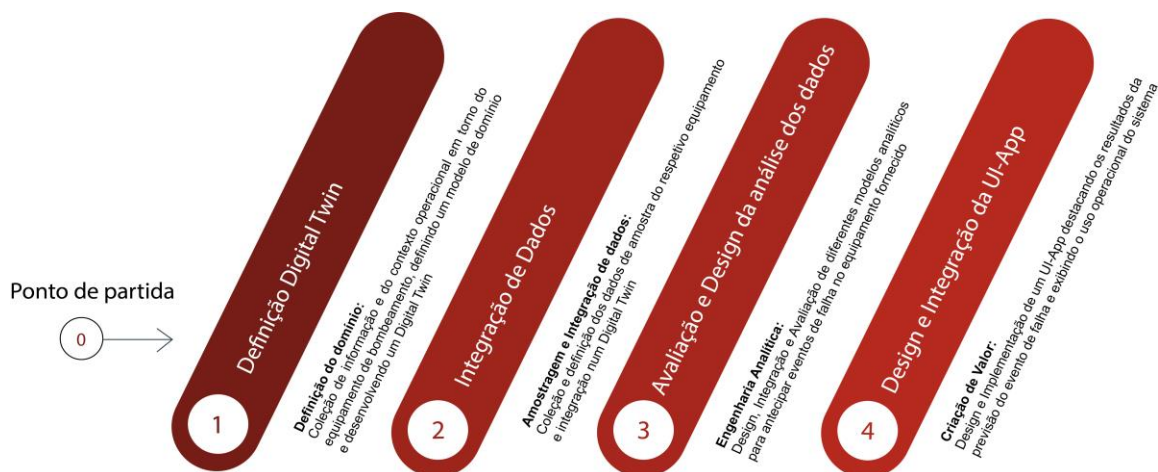


Figura 18 - Fases do projeto DT

A definição do domínio do DT consistiu na realização de um esquema de representação digital da bomba P049, uma vez que, em conjunto com a equipa, tinha-se um conhecimento muito alargado daquilo que era o processo e a sua envolvente. Esta etapa tinha como seu objetivo final as seguintes tarefas:

- Definição da estrutura central do equipamento;
- Definição da estrutura adjacente do equipamento;
- Definição das leituras recebidas pelos sensores dos equipamentos definidos;
- Modelo genérico do DT segundo as definições acima mencionadas.

A definição da estrutura central e adjacente do equipamento, bem como das leituras recebidas pelos sensores instalados nos equipamentos anteriores, permitiu que o primeiro esboço do DT ganhasse forma. Na unidade funcional Branqueamento, secção Deslinhificação, foram definidos como objetos físicos deste estudo da bomba P049 a adição de filtrado, a bomba P049, o motor da bomba, o *standpipe* a montante da bomba e as tubagens. Das variáveis operacionais medidas (apresentadas no subcapítulo PFD), cada uma tem um sensor criado e posterior leitura física associada a um objeto físico definido anteriormente.

Após concordância com a equipa de trabalho foi possível dar por terminada esta etapa, obtendo-se assim um modelo genérico sem integração de dados, onde a Figura 19 resume a interligação definida.

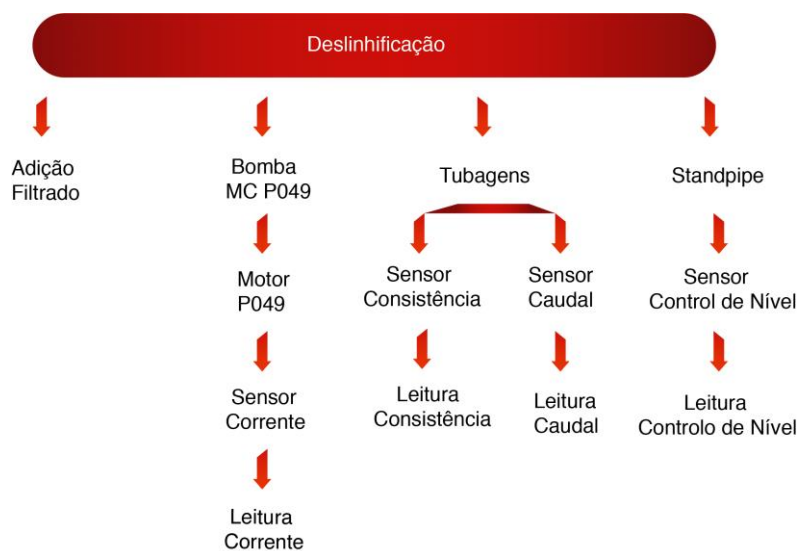


Figura 19 - Diagrama DT P049

A etapa Integração de dados consistia na definição e fornecimento da recolha de dados abrangendo as leituras dos sensores definidos na primeira etapa e na entrega do estudo exaustivo acerca da bomba P049.

Relativo à informação dos sensores, foi fornecido o dado histórico dos 4 parâmetros processuais anteriormente vistos no capítulo PFD (Tabela 7): intensidade de corrente do motor elétrico, consistência da pasta, caudal da pasta e o nível de controlo do *standpipe* a montante da bomba P049, em forma de folha Excel com um espaço temporário de 3 anos com medições médias horárias.

Quanto à entrega do estudo exaustivo da bomba, foi entregue a informação levantada relativa ao equipamento de estudo, tendo sido feito o *upload* dessa informação para a plataforma do fornecedor.

## 5.2. Resultados

Os resultados foram muito positivos, tendo sido detetados 6 eventos dos 7 possíveis no espaço de tempo determinado pela *Navigator*. Destes 6 eventos identificados, 15 alarmes foram acionados, dos quais 13 positivos e 2 falsos positivos.

O objetivo principal da construção de um DT é o desenvolvimento de uma prova conceito para um sistema preditivo por forma a antecipar eventos de falha num equipamento crítico. Basicamente, permitir a mudança de uma lógica de manutenção preventiva para manutenção preditiva.

No caso em estudo, os *KPIs* (*Key Performance Indicators*) do projeto piloto foram estabelecidos pela *Navigator* após uma parametrização conjunta, mediante discussão e testes primários, com vista projetos futuros, definidos como:

- $\geq 80\%$  - Precisão – a taxa à qual as falhas antecipadas realmente aconteceram;
- $\geq 85\%$  - *Recall* – a taxa em que o modelo conseguiu antecipar as falhas dentro do tempo de predição definido;
- Tempo de predição do evento – 21 dias;
  - Tolerância de 7 dias, mas intervalo confiável de 14 dias.

A precisão é ajustada com valor inferior ao *recall* para ter em conta as deteções de alarme precoces nas quais as falhas não ocorreram dentro do tempo de predição de 21 dias, mas por exemplo, num espaço de 30 dias e, portanto, tecnicamente considerado um falso positivo. O compromisso entre os valores dos *KPIs* deve ser tido em conta devido aos falsos positivos.

As duas medidas, precisão e *recall*, são tipicamente medidas antagonistas, querendo isto dizer que a otimização de uma medida resulta no agravamento da outra.

Portanto, com a análise FMECA realizada juntamente com o levantamento dos dados históricos, é possível começar a fazer uma catalogação dos alarmes. Isto é, de cada vez que o equipamento tiver um certo tipo de comportamento numa determinada data em que já é conhecido o modo de falha ocorrido, é possível registar o seu comportamento que originou o acionamento do alarme e catalogá-lo.

De acordo com a tabela FMECA apresentada, é possível ter mais atenção aos modos de falha mais críticos e aos alarmes que possam ter sido acionados diretamente por eles, tentando em seguida catalogá-los de acordo com esses modos de falha, isto é, obter-se uma biblioteca de eventos

relacionados com os modos de falha identificados na análise FMECA onde cada um tem alarme diferenciado associado a ele. Eventualmente, pode-se também mudar dinamicamente o plano de manutenção do equipamento com base na aplicação do modelo ao dado histórico dos passados 3 anos e à sua futura utilização. Por outras palavras, se o modelo prever que um certo modo de falha considerado crítico está para ocorrer dentro de 21 dias, deve-se automaticamente mudar os planos de manutenção ou rotinas diárias referentes ao equipamento, para que a equipa da manutenção seja notificada e aja conforme a situação.

Por fim, após anos de histórico, fazer uma refinação dos valores do RPN de cada modo de falha, atualizando a tabela FMECA e posteriores ações preventivas a tomar. A Figura 20 sumariza os próximos passos relativo ao uso do DT.

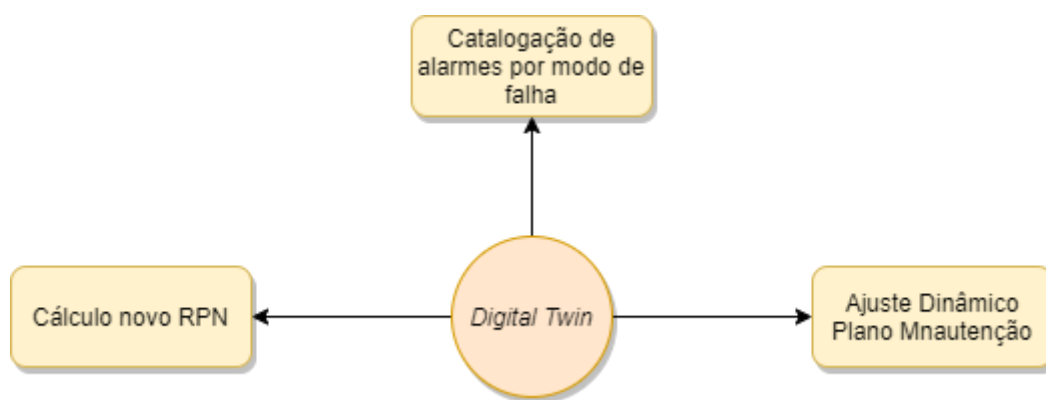


Figura 20 - Trabalho futuro DT

O levantamento que foi feito contribui decisivamente para o sucesso do DT, uma vez que vem a validar os *outputs* do DT para a identificação das falhas.

## 6. Conclusões e Trabalhos futuros

Neste capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho, assim como propostas para trabalhos futuros. Começa-se por apresentar conclusões sobre o papel vital dos equipamentos de bombeamento de média consistência no setor de produção de pasta e papel. Posteriormente, apresentam-se desfechos sobre a metodologia de análise FMECA e a importância dos aspetos ligados à mesma. Seguidamente, são expostas as conclusões acerca do caso de estudo, onde é apresentada a metodologia utilizada e os resultados da aplicação da mesma. Por fim, são apresentadas algumas propostas para trabalhos futuros, com o objetivo de fornecer indicações para que possa ser continuado e melhorado o presente trabalho.

### 6.1. Conclusões

Esta dissertação visa melhorar os planos de manutenção dos equipamentos de bombeamento das unidades industriais da empresa *The Navigator Company*. O equipamento em estudo tem como principal objetivo o transporte de pasta de celulose até 16% de consistência. A *The Navigator Company* pretende reduzir perdas associadas a paragens de equipamentos desta tipologia e também progredir no que diz respeito a novas tecnologias da I4.0, o que demonstra intenções de se posicionar mais competitivamente no mercado.

A realização deste trabalho permitiu avaliar e aferir a importância do plano de manutenção dos equipamentos de bombeamento no circuito de produção de pasta e papel no setor. Foi possível detetar problemas relativos à identificação e quantificação de potenciais modos de falhas, com a mesma tipologia do que é apresentado neste trabalho e do impacto que essas falhas podem ter na segurança e disponibilidade global do sistema.

Em primeira análise, realizou-se uma revisão da literatura acerca da análise FMECA e da tecnologia DT. Já nas instalações da empresa, procedeu-se à visita e conhecimento do circuito físico do Branqueamento, nomeadamente a localização do equipamento em estudo, a bomba de média consistência P049. De seguida, recolheu-se a informação e dados referentes à bomba. Analisou-se o contexto operacional do equipamento do ponto de vista macro, ou seja, estudo do circuito da produção do papel, do circuito do branqueamento e por fim, do circuito em específico da bomba P049 com o objetivo de ter um melhor entendimento acerca da bomba. Efetuou-se também uma análise funcional da bomba, identificando os seus componentes e as respetivas funções destes. Analisou-se o histórico existente, nomeadamente as ordens e notas de trabalho, as perdas associadas a paragens não programadas e o histórico das variáveis processuais, a fim de encontrar possível informação útil aquando da realização da análise FMECA. Efetuou-se uma verificação do plano de manutenção existente, e por fim, a realização da análise FMECA, começando pela identificação dos modos, causas e efeitos de falha, continuando com a classificação dos modos de falha quanto ao seu nível de criticidade, e concluindo com a elaboração de um plano de propostas de mitigação de falhas com vista

a melhorar o procedimento de tarefas de manutenção para equipamentos da mesma tipologia que a bomba P049.

Propôs-se a inspeção visual, a criação de um relatório mensal, o tratamento superficial e a realização de um Ensaio Não Destrutivo (líquido penetrante) na componente voluta de forma a prevenir mais eficazmente os possíveis modos de falha correspondentes.

Relativamente ao componente rotor, propôs-se apenas uma verificação diária da bomba, por este estar bem protegido em termos de causas de falha.

Propôs-se também a colocação de alarmes de falta de líquido de selagem no DCS e a monitorização do caudal do líquido de selagem através de sensores de caudal no componente empanque mecânico, de modo a detetar alguma falha do sistema de recuperação de águas de selagem e a evitar a deteção incorreta da falta de líquido de selagem.

Sugeriu-se ao componente veio uma inspeção anual, a aplicação de dois Ensaios Não Destrutivos (líquido penetrante e/ou teste das partículas magnéticas) e a verificação dos apertos dos mancais de modo a prevenir de forma mais eficaz os possíveis modos de falha correspondentes.

Quanto aos rolamentos, propôs-se formação anual da equipa responsável pela sua montagem, colocação de sensores de temperatura e inspeção visual anual, de forma a evitar a montagem inadequada dos rolamentos e a controlar as altas temperaturas que se fazem sentir antecipando alguma temperatura excessiva provocando a paragem da bomba.

No último dos componentes, o acoplamento, propôs-se a verificação de existência de folgas e a verificação do aperto à base de forma a prevenir causas de falha como a vibração no conjunto, o desalinhamento do veio, desapertos ou folgas.

A análise FMECA foi no fundo uma análise crítica àquilo que a empresa *The Navigator Company* continha e ao que precisava para agir no sentido da mitigação dos modos de falha do equipamento. Isso serviu o propósito de geração de conhecimento.

Conclui-se então, que o trabalho de levantamento de dados permitiu ter uma boa base de conhecimento, tanto empírico como teórico, sobre o equipamento e a sua envolvente. Graças ao percurso de estudo exaustivo da bomba, desde o entendimento do seu funcionamento à identificação dos modos de falha e a sua criticidade, foi possível transformar essa informação em conhecimento do equipamento. Ou seja, sem o caso de estudo realizado pela análise FMECA não seria possível inicializar-se a construção do DT.

Conclui-se, numa análise global dos resultados, que as categorias da segurança e da disponibilidade são afetadas positivamente por um estudo deste tipo, pois ao identificar-se os modos de falha em que se deve agir mais rapidamente e com mais intensidade, não só se aumenta a manutibilidade do sistema, mas também a segurança e a disponibilidade do mesmo. Foi ainda possível observar-se que a gestão de manutenção, o investimento constante em tecnologias mais eficientes e a criação de hábitos e políticas de manutenção económicas permitem aumentar a eficiência dos equipamentos em

estudo. É importante a adoção de mais e melhores práticas de manutenção com o objetivo de reduzir perdas, permitindo aumentar a competitividade das empresas e melhorar os planos de manutenção das mesmas, contribuindo para uma sustentabilidade global.

## **6.2. Limitações deste trabalho**

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho foram sentidas e identificadas algumas limitações. Em primeiro lugar, cumpre destacar a falta de bibliografia sobre os potenciais modos de falha presentes num equipamento de bombeamento de média consistência, tanto a nível da sua identificação como também a nível de causas e consequências. Há que referir que a tarefa de identificar fatores para a quantificação do nível de criticidade dos modos de falha foi dificultada, uma vez que não existe qualquer tipo de estudo sobre este tema, pelo que foi necessário identificar e parametrizar de raiz os fatores constantes do presente trabalho. Acrescenta-se, por fim, a complexidade em definir critérios de quantificação de probabilidade de ocorrência e de alguns fatores de gravidade, em resultado da falta de dados estatísticos e da confidencialidade dos mesmos.

## **6.3. Propostas de trabalhos futuros**

Os resultados apresentados, apesar da sua validade, podem e devem ser refinados. De forma a obter uma melhor diferenciação e quantificação dos modos de falha, é necessário recorrer a um aumento do espectro dos critérios, isto é, proceder ao aumento das categorias para cada parâmetro. Com esse aumento obtém-se uma quantificação mais refinada e mais assertiva para cada potencial modo de falha. Para que isto seja possível é necessário criar um histórico de dados relevantes, com o intuito de serem criados critérios quantitativos e não qualitativos, como os utilizados neste trabalho.

A empresa *The Navigator Company* deve começar a pensar em realizar a transição da manutenção preventiva para a manutenção preditiva. A iniciativa do DT justifica essa decisão estratégica. Com base nessa lógica, para ser possível obter sucesso na sua construção, é necessária informação fiável sobre os equipamentos. Portanto, a presente dissertação é a prova de como os novos conceitos tecnológicos terão de continuar a utilizar as ferramentas-base das áreas de Manutenção e Fiabilidade.

*The Navigator Company* mostra ter bastante informação sobre os equipamentos, embora essa não seja traduzida em conhecimento. É esse conhecimento que permite tomar decisões ponderadas, como a decisão de mudar a lógica de manutenção preventiva para manutenção preditiva. Para isso é necessário que os dados relativos aos equipamentos sejam transformados em informação, sendo essa informação correlacionada que vai posteriormente gerar conhecimento.

De acordo com o que foi a experiência na *The Navigator Company* e por forma a robustecer a sua recolha de informação que vai gerar conhecimento fundamental, permitindo-lhe uma tomada de decisão ponderada, sugerimos as seguintes medidas: preenchimento rigoroso das notas e das ordens de trabalho de maneira que esteja documentada informação útil no histórico do equipamento; ajuste dinâmico, ou pelo menos periódico, dos planos de manutenção; revisão periódica do plano de



manutenção, obrigando ao redimensionamento do equipamento, à revisão dos dados históricos e à verificação das ações que visam a mitigação dos modos de falha; finalmente, catalogação dos alarmes do DT de acordo com o modo de falha manifestado. Assim se obtém uma biblioteca de eventos relacionados com os modos de falha identificados na análise FMECA.

Com estas propostas de melhoria é possível realizar trabalhos futuros onde se possam obter resultados mais refinados e com maior valor para a área de manutenção e segurança dos equipamentos de bombeamento na indústria do papel.

## Referências

- [1] A. D. Fuente, A. Crespo, J. F. Gómez e A. Guillén, "Advanced Techniques for Assets Maintenance Management," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, pp. 205-210, 2018.
- [2] International Organization for Standardization, *ISO 55000:2014 "Gestão de Ativos" - Visão geral, princípios e terminologia*, Instituto Português da Qualidade, 2014.
- [3] The Institute of Asset Management, "the professional body for whole life management of physical assets," [Online]. Available: <https://theiam.org/knowledge/introduction/what-is-asset-management/>. [Acedido em 14 Junho 2019].
- [4] R. Assis, *Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Ativos Físicos*, Lisboa: LIDEL - Edições Técnicas, 2014.
- [5] F. D. Amaral, *Gestão da Manutenção na Indústria*, Lisboa: LIDEL - Edições Técnicas, 2016.
- [6] A. D. Fuente, A. Crespo, J. F. Gómez e A. Guillén, "ScienceDirect Advanced Techniques for Assets Maintenance Management Advanced Techniques for Maintenance Management Advanced Techniques for Assets Maintenance Management Advanced Techniques for Assets Maintenance Management Advanced Techniques for Assets M," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, pp. 205-210, 2018.
- [7] F. M. & C. Kojchen, *MAINTENANCE*, 4ª ed., Paris: Dunod, 2015, p. 4.
- [8] R. R. & P. Schjolberg, *Industry 4.0 and Maintenance*, Norway: Norsk Forening for Vedlikehold, 2016.
- [9] J. Moubray, *Reliability Centered Maintenance*, 2º ed., New York: Industrial Press Inc., 1997.
- [10] W. R. Blischke e D. Prabhakar Murthy, *Case studies in Reliability and Maintenance*, New Jersey: Wiley - Interscience, 2003, p. 5.
- [11] European Standard EN 13306, *Maintenance Terminology*, CEN, 2010.
- [12] C. V. Pinto, *Organização e Gestão da Manutenção*, Lisboa: Monitor, 2002.
- [13] J. P. S. Cabral, *Organização e Gestão da Manutenção - dos conceitos à prática*, Lisboa: LIDEL - Edições Técnicas, 2006.
- [14] K. A. H. Kobbacy e D. P. Murthy, *Complex System Maintenance Handbook*, London: Springer, 2008, p. 22.
- [15] L. A. Ferreira, *Uma Introdução à Manutenção*, Porto: Publindústria, 1998.
- [16] NP 4483, *Sistemas de Gestão da Manutenção*, Instituto Português da Qualidade, 2008.
- [17] United States Department of Defense, *Military Standard - Procedures for performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*, Washington DC: MIL-STD-1629A, 1980.
- [18] M. Rausand e A. Hoyland, *System Reliability Theory - Models, Statistical, Methods, and Applications*, 2ª ed., New Jersey: Wiley-Interscience, 2004.

- [19] International Electrotechnical Commission, *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA and FMECA)*, IEC 60812, 2018.
- [20] S. Raposo, M. Fonseca e J. d. Brito, "Metodologia FMEA e Sua Aplicação à Construção de Edifícios," em *Encontro Nacional sobre Qualidade e Inovação na Construção*, Lisboa, 2006.
- [21] Dyadem Engineering Corporation, *Guidelines for Failure Mode and Effects Analysis for Medical Devices*, Ontario: CRC Press, 2003.
- [22] G. Carmignani, "An integrated structural framework to cost-based FMECA: The priority-cost FMECA," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 94, nº 4, pp. 861-871, 2009.
- [23] International SEMATECH, "Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)," *A Guide for Continuous Improvement for the Semiconductor Equipment Industry*, 30 Setembro 1992.
- [24] S. Vaidya, P. Ambad e S. Bhosle, "Industry 4.0 - A Glimpse," *Procedia Manufacturing*, vol. 20, pp. 233-238, 2018.
- [25] M. Aiman, K. Bahrin, F. Othman, N. Hayati, N. Azli e F. Talib, "Industry 4.0: A review on Industrial Automation and Robotic," *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, vol. 78, nº 137-143, pp. 2180-3722, 2016.
- [26] H. Kagermann, L. Wolf-Dieter e W. Wolfgang, "Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution," *VDI Nachrichten*, pp. 3-4, 2011.
- [27] H. Kagermann, W. Wahlster e J. H. Deutsche, "Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group," acatech - National Academy of Science and Engineering, Germany, 2013.
- [28] M. Rüßmann, M. Lorenz, P. Gerbert e M. Waldner, "BCG - The Boston Consulting Group," *Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries*, pp. 1-14, 9 Setembro 2015.
- [29] K. Witkowski, "Internet of Things, Big Data, Industry 4.0 - Innovative Solutions in Logistics and Supply Chains Management," *Procedia Engineering*, vol. 182, pp. 763-769, 2017.
- [30] G. Schuh, T. Potente, C. Wesch-Potente, A. R. Weber e J. P. Prote, "Collaboration Mechanisms to increase Productivity in the Context of Industrie 4.0," *Procedia CIRP*, vol. 19, nº C, pp. 51-56, 2014.
- [31] M. Landherr, U. Schneider e T. Bauernhansl, "The Application Center Industrie 4.0 - Industry-driven Manufacturing, Research and Development," *Procedia CIRP*, vol. 57, pp. 26-31, 2016.
- [32] A. B. Correia, P. Deus e J. R. Baptista, "PWC Portugal," *Indústria 4.0: Construir a empresa digital*, pp. 1-30, Setembro 2016.
- [33] S. Wang, J. Wan, D. Li e C. Zhang, "Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, pp. 1-10, 2016.
- [34] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes e W. Sihn, "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, nº 11, pp. 1016-1022, 2018.
- [35] M. Grieves e J. Vickers, "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems," em *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*, Springer, 2016, pp. 85-113.

- [36] E. Negri, L. Fumagalli e M. Macchi, "A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems," *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 939-948, 2017.
- [37] F. Tao, Q. Qi, L. Wang e A. Nee, "Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison," *Engineering*, vol. 5, 2019.
- [38] B. Schleich, N. Anwer, L. Mathieu e S. Wartzack, "Shaping the digital twin for design and production engineering," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 66, pp. 141-144, 2017.
- [39] M. Macchi, I. Roda, E. Negri e L. Fumagalli, "Exploring the role of Digital Twin for Asset Lifecycle Management," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, pp. 790-795, 2018.
- [40] [Online]. Available: <http://www.thenavigatorcompany.com/>. [Acedido em 12 Dezembro 2019].
- [41] The Navigator Company, "Processo de Produção de Pasta," 2008.
- [42] E. Glaessgen e D. Stargel, "Paper for the 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin," *The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles*, 23 April 2012.
- [43] Sunds Defribator Industries, "Sunds Defribator CMD - Pulp Pump".

## Anexos

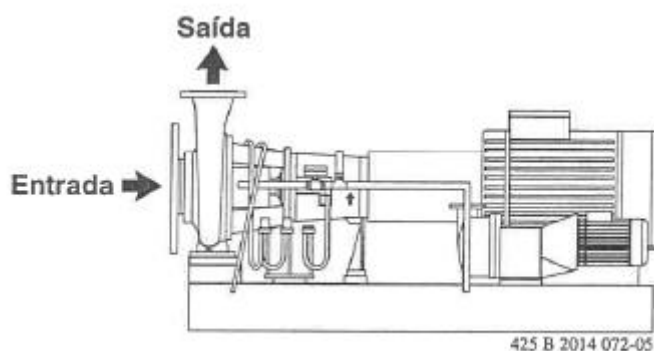
### Anexo A – Informação adicional da bomba P049

A bomba P049 é uma bomba de pasta do tipo *Sunds Defribator CMD* que consiste essencialmente num conjunto motor-bomba de tipo centrífugo, tendo um conjunto motor-bomba de vácuo do tipo anel líquido como equipamento auxiliar que retira o ar que existe na pasta e aumenta a pressão de sucção na entrada da bomba. Estes conjuntos estão todos montados num maciço de betão, numa área bem definida. Todas as peças em contacto com a pasta são de aço inoxidável [43].

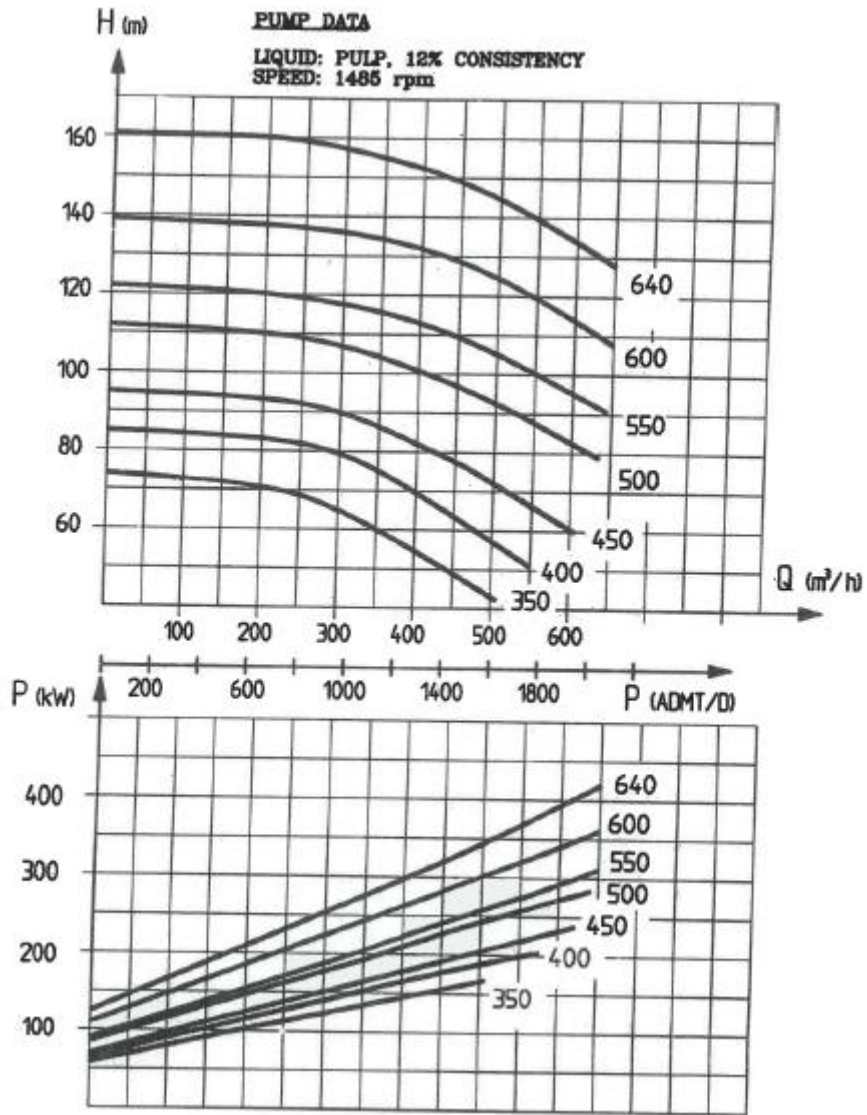
As características da bomba encontram-se representadas na seguinte tabela.

BOMBA P049		
Diâmetro de aspiração	DN1 [mm]	400
Diâmetro de compressão	DN2 [mm]	150
Diâmetro Impulsor	D [mm]	640
Caudal	Q [m <sup>3</sup> /h]	558
Altura manométrica	H [m]	125
Velocidade de rotação	N [rpm]	1485
Potência do motor	P <sub>M</sub> [kW]	430

Quanto ao funcionamento da bomba P049, é contextualizado na linha de processo em que se encontra e na análise funcional do ativo é explicado na íntegra o seu funcionamento. Na figura abaixo é exemplificado como a pasta é alimentada à bomba através de um tubo vertical e depois bombeada para a cabeça de pressão atual.



Quanto à curva da bomba também é apresentada na seguinte figura.



## Anexo B – Ordens de Trabalho da bomba P049

Identificação dos variados campos que constituem as ordens de trabalho. Cada linha corresponde a uma ordem onde em cada coluna surge uma informação diferente relativamente à mesma:

- **Ordem** – Número interno de identificação da Ordem de Trabalho;
- **Cust.tot.reais** – Custo total real da intervenção feita no equipamento sem os valores da mão de obra em conta;
- **Tipo de ordem**
- **CenTrab respon.** – Centro responsável pela abertura da ordem;
- **Data-base inic.** – Data em que foi elaborada;
- **Loc.instalação** – Local de instalação na estrutura da fábrica;
- **Campo ordenação** – Nome do ativo;
- **Texto breve** – Descrição do evento;
- **Status sistema** – Estado do equipamento à data em que os dados foram retirados do *software*.

Em primeiro lugar, apresentam-se as ordens de trabalho respetivo à bomba P049 no formato original, e em seguida as ordens de trabalho organizadas por tipologia e com os componentes identificados associados à falha.

Ordem	Cust.tot.reais	Tipo de CenTrab	respor	Data-base inic.	Loc.instalação	Campo ord	Texto breve	Status sistema
13012078	10,6	D011	SMLTMEC	03/06/2016	D159-03-07-05	159P049	159P049 prensa 2 acoplamento partido	ENTE CAPC DMNV ERRD IMPA MATF MOME NOLQ
13036921	0	D012	SML1BMEC	01/01/2017	D159-03-07-05	159P049	P049 com fuga pasta	ENTE CAPC DMNV ERRD NOLQ SCDM
13026842	147,31	D011	SMLTELE	23/01/2017	D159-03-07-05	159P049	Paragem inesperada da P049	ENTE IMPR CAPC DMNV ERRD MOME NOLQ
13026849	0	D012	SML1ELIN	24/01/2017	D159-03-07-05	159P049	Shunt detect. agua selagem 159P049	ENTE CAPC DMNV ERRD NOLQ SCDM
13028590	0	D013	SDMOMECC	24/03/2017	D159-03-07-05	159P049	REC - EMP MECAN SAFEMATIC SB25-100-(s22)	ENTE IMPR CAPC NOLQ SCDM
13034583	0	D011	SML1BMEC	26/06/2017	D159-03-07-05-01	159P049	Reparar/substituir 159P049	ENTE CAPC DMNV ERRD IMPA MOME NOLQ
13035080	0	D012	SML1BMEC	06/07/2017	D159-03-07-05-01	159P049	alinhamento da bomba p049	ENTE IMPR CAPC ERRD NOLQ SCDM
13035214	10,5	D012	SMLTELE	07/07/2017	D159-03-07-05	159P049	P049 em emergência.	ENTE IMPR CAPC DMNV ERRD MOME NOLQ
13035324	0	D012	SML1ELIN	10/07/2017	D159-03-07-05	159P049	159p049 subst relé schrack 8.5 p.e	ENTE CAPC ERRD NOLQ SCDM
13036834	0	D012	SMLTMEC	11/08/2017	D159-03-07-05	159P049	TURN0-Vigiar bomba 159P049	ENTE IMPR CAPC ERRD NOLQ SCDM
13013191	18.317,91	D013	SDMOMECC	18/08/2017	D159-03-07-05	159P049	REC - BB CENT HORIZ SUNDS CMD2515-(s22)	ENTE IMPR CAPC DMNV ERRD MOME NOLQ
13037375	0	D012	SMLTMEC	23/08/2017	D159-03-07-05-01	159P049	TURN0-Acomp. vibrações D159-P049	ENTE CAPC ERRD NOLQ SCDM
13037410	0,24	D012	SML1BMEC	28/08/2017	D159-03-07-05-01	159P049	Z- DMC - SUB. ROTOR DA BOMBA 159P049	ENTE IMPR CAPC DMNV ERRD MOME NOLQ
13038440	0	D011	SMLTMEC	13/09/2017	D159-03-07-05-01	159P049	Substituir P049	ENTE CAPC DMNV ERRD IMPA NOLQ SCDM
13038660	5.411,26	D013	SDMOMECC	24/11/2017	D159-03-07-05-01	159P049	REC - CAIXA ROL 5F C/VEIO S/ADAPT REF 31	ENTE IMPR CAPC DMNV ERRD MATF MOME NOLQ
13044891	0	D012	SML1ELIN	19/01/2018	D159-03-07-05-01	159P049	Verif. bomba de vacuo p049	ENTE IMPR CAPC ERRD NOLQ SCDM
13045120	157,7	D012	SML1BMEC	23/01/2018	D159-03-07-05-01	159P049	Afinação do prato da bomba P049	ENTE IMPR CAPC DMNV ERRD MOME NOLQ
13038450	6.916,70	D013	SDMOMECC	09/02/2018	D159-03-07-05-01	159P049	repar. bomba P049-(s22)	ENTE CAPC DMNV ERRD IMPA MOME NOLQ
13046740	1,84	D012	SML1BMEC	22/02/2018	D159-03-07-05-01	159P049	subst. bomba P049	ENTE CAPC DMNV ERRD IMPA MOME NOLQ
13045665	0	D013	SDMOMECC	01/03/2018	D159-03-07-05-01	159P049	REC - EMP MECAN SAF.SB25-100-QRMG-(s22)	ENTE IMPR CAPC NOLQ SCDM
13047085	5.286,68	D013	SDMOMECC	28/06/2018	D159-03-07-05-01	159P049	REC - BB CENT HORIZ SUNDS CMD2515 SMO	ENTE IMPR CAPC DMNV ERRD MOME NOLQ
13059009	-5.009,10	D013	SDMOMECC	08/11/2018	D159-03-07-05-01	159P049	REC - EMP MECAN SAFEMATIC SB25-100-QRMG-	ENTE CAPC MOME NOLQ SCDM
13061355	0	D012	SDMEMECC	21/12/2018	D159-03-07-05-01	159P049	PT-PA19-DESLIN-VERIF/REP.BB PAST 159P049	LIB CAPC NOLQ SCDM
13064461	0	D061	SDMEELEC	14/02/2019	D159-03-07-05	159P049	BENEF/ENSAIO MOTOR 159P049B	LIB CAPC ERRD NOLQ SCDM



Ordem	Cust.tot. rea	Tipo d	CenTrab respor	Data-base inic.	Loc. instalação	Campo ord	Texto breve	Status sistema	Componente/Evento
Ordens Tipo D011									
13012078	10,6	D011	SMLTMEC	03/06/2016	D159-03-07-05	159P049	159P049 prensa 2 acoplamento partido	ENTE CAPC DMNV ERRD IMPA MATF MOME NOLQ	Acoplamento
13026842	147,31	D011	SMLTELE	23/01/2017	D159-03-07-05	159P049	Paragem inesperada da P049	ENTE IMPR CAPC DMNV ERRD MOME NOLQ	Bomba
13034583	0	D011	SML1BMEC	26/06/2017	D159-03-07-05-01	159P049	Reparar/substituir 159P049	ENTE CAPC DMNV ERRD IMPA MOME NOLQ	Bomba
13038440	0	D011	SMLTMEC	13/09/2017	D159-03-07-05-01	159P049	Substituir P049	ENTE CAPC DMNV ERRD IMPA NOLQ SCDM	Bomba
Ordens Tipo D012									
13036921	0	D012	SML1BMEC	01/01/2017	D159-03-07-05	159P049	P049 com fuga pasta	ENTE CAPC DMNV ERRD NOLQ SCDM	Empanque
13026849	0	D012	SML1ELIN	24/01/2017	D159-03-07-05	159P049	Shunt detect. agua selagem 159P049	ENTE CAPC DMNV ERRD NOLQ SCDM	Empanque
13035080	0	D012	SML1BMEC	06/07/2017	D159-03-07-05-01	159P049	alinhamento da bomba p049	ENTE IMPR CAPC ERRD NOLQ SCDM	Veio
13035214	10,5	D012	SMLTELE	07/07/2017	D159-03-07-05	159P049	P049 em emergência.	ENTE IMPR CAPC DMNV ERRD MOME NOLQ	Bomba
13035324	0	D012	SML1ELIN	10/07/2017	D159-03-07-05	159P049	159p049 subst relé schrack 8.5 p.e	ENTE CAPC ERRD NOLQ SCDM	Sistema de controlo
13036834	0	D012	SMLTMEC	11/08/2017	D159-03-07-05	159P049	TURNO-Vigiar bomba 159P049	ENTE IMPR CAPC ERRD NOLQ SCDM	Vigilância
13037375	0	D012	SMLTMEC	23/08/2017	D159-03-07-05-01	159P049	TURNO-Acomp. vibrações D159-P049	ENTE CAPC ERRD NOLQ SCDM	Vigilância
13037410	0,24	D012	SML1BMEC	28/08/2017	D159-03-07-05-01	159P049	Z- DMC - SUB. ROTOR DA BOMBA 159P049	ENTE IMPR CAPC DMNV ERRD MOME NOLQ	Rotor
13044891	0	D012	SML1ELIN	19/01/2018	D159-03-07-05-01	159P049	Verif. bomba de vacuo p049	ENTE IMPR CAPC ERRD NOLQ SCDM	Bomba vácuo
13045120	157,7	D012	SML1BMEC	23/01/2018	D159-03-07-05-01	159P049	Afinação do prato da bomba P049	ENTE IMPR CAPC DMNV ERRD MOME NOLQ	Rotor
13046740	1,84	D012	SML1BMEC	22/02/2018	D159-03-07-05-01	159P049	subst. bomba P049	ENTE CAPC DMNV ERRD IMPA MOME NOLQ	Bomba
13061355	0	D012	SDMEMEC	21/12/2018	D159-03-07-05-01	159P049	PT-PA19-DESLIN-VERIF/REP.BB PAST 159P049	LIB CAPC NOLQ SCDM	Paragem anual 2019
Ordens tipo D013									
13028590	0	D013	SDMOMECC	24/03/2017	D159-03-07-05	159P049	REC - EMP MECAN SAFEMATIC SB25-100-(s22)	ENTE IMPR CAPC NOLQ SCDM	Empanque
13013191	18.317,91	D013	SDMOMECC	18/08/2017	D159-03-07-05	159P049	REC - BB CENT HORIZ SUNDS CMD2515-(s22)	ENTE IMPR CAPC DMNV ERRD MOME NOLQ	Bomba
13038660	5.411,26	D013	SDMOMECC	24/11/2017	D159-03-07-05-01	159P049	REC - CAIXA ROL 5F C/VEIO S/ADAPT REF 31	ENTE IMPR CAPC DMNV ERRD MATF MOME NOLQ	Rolamentos
13038450	6.916,70	D013	SDMOMECC	09/02/2018	D159-03-07-05-01	159P049	repar. bomba P049-(s22)	ENTE CAPC DMNV ERRD IMPA MOME NOLQ	Bomba
13045665	0	D013	SDMOMECC	01/03/2018	D159-03-07-05-01	159P049	REC - EMP MECAN SAF.SB25-100-QRMG-(s22)	ENTE IMPR CAPC NOLQ SCDM	Empanque
13047085	5.286,68	D013	SDMOMECC	28/06/2018	D159-03-07-05-01	159P049	REC - BB CENT HORIZ SUNDS CMD2515 SMO	ENTE IMPR CAPC DMNV ERRD MOME NOLQ	Bomba
13059009	-5.009,10	D013	SDMOMECC	08/11/2018	D159-03-07-05-01	159P049	REC - EMP MECAN SAFEMATIC SB25-100-QRMG-	ENTE CAPC MOME NOLQ SCDM	Empanque
Ordens tipo D061									
13064461	0	D061	SDMEEECC	14/02/2019	D159-03-07-05	159P049	BENEF/ENSAIO MOTOR 159P049B	LIB CAPC ERRD NOLQ SCDM	Ensaio Motor

## Anexo C – Notas de Trabalho da bomba P049

Em relação às notas de trabalho, cada linha corresponde a uma nota, podendo haver mais que uma associada a uma Ordem de Trabalho (3ª Coluna). Por exemplo, se uma nota tiver o campo da Ordem de Trabalho vazio é porque a ordem associada a essa nota é a mesma da nota de cima. As informações relativas a cada coluna de uma dada Nota de Trabalho são identificadas como:

- **Nota** – Número interno de identificação da Nota de Trabalho;
- **Tipo de Nota**
- **Ordem** – Número interno de identificação da Ordem de Trabalho associada à nota;
- **Prioridade** – Urgência da realização da nota (1 – Emergência; 2 – Realizar até uma semana; 3 – Realizar até um mês; 4 – Realizar indefinidamente)
- **Descrição** – Descrição do evento;
- **Dt.criação** – Data em que foi elaborada;
- **Hora da Nota** - Hora em que foi elaborada
- **CentTrab respon** - Centro de Trabalho responsável pela abertura da nota;
- **Loc.instalação** – Local de instalação na estrutura da fábrica
- **Criado por** – Pessoa encarregue da abertura de nota;
- **Prazo acordado** – Data para término do evento;
- **Status usuário** – Indicação do estado da nota (TTE – Terminado; EXEC – Em execução)
- **Status sistema** – Estado do equipamento à data em que os dados foram retirados do *software*.

Em primeiro lugar, apresentam-se as notas de trabalho respetivo à bomba P049 no formato original, apresentando-se de seguida as notas de trabalho organizadas por tipologia e com os componentes identificados associados à falha.





## Anexo D – Downtimes da bomba P049

Á	Data	Ti	P	Duraçã	Quant.	Cadeia	Unid. Funcional	Causa Interna	Imputação	PP
225	2016/06/14	I	NP	00:05	1	2ª FASE DE LAVAGEM	PRENSA DE LAVAGEM Nº2	Encravamentos	PRODUÇÃO	5,416667
225	2016/07/16	I	NP	00:05	1	2ª FASE DE LAVAGEM	PRENSA DE LAVAGEM Nº2	Encravamentos	PRODUÇÃO	5,416667
225	2017/05/03	I	NP	01:40	1	2ª FASE DE LAVAGEM	PRENSA DE LAVAGEM Nº2	Encravamentos	PRODUÇÃO	108,3333
225	2017/09/09	I	NP	03:00	1	2ª FASE DE LAVAGEM	PRENSA DE LAVAGEM Nº2	Avaria mecânica	MANUTENÇÃO - MECÂNICA	195
225	2017/09/10	I	NP	20:55	0	2ª FASE DE LAVAGEM	PRENSA DE LAVAGEM Nº2	Avaria mecânica	MANUTENÇÃO - MECÂNICA	1359,583
225	2017/10/18	I	NP	02:10	1	2ª FASE DE LAVAGEM	PRENSA DE LAVAGEM Nº2	Dificuldades Operacionais	PRODUÇÃO	140,8333
225	2017/12/15	I	NP	00:10	1	2ª FASE DE LAVAGEM	PRENSA DE LAVAGEM Nº2	Avaria instrumentação	MANUTENÇÃO - CONTR. & POTÊNCIA	10,83333
225	2018/05/28	I	NP	00:40	1	2ª FASE DE LAVAGEM	PRENSA DE LAVAGEM Nº2	Dificuldades Operacionais	PRODUÇÃO	43,33333
225	2018/06/07	I	NP	03:15	1	2ª FASE DE LAVAGEM	PRENSA DE LAVAGEM Nº2	Lavagens/limpezas	PRODUÇÃO	211,25
225	2019/02/08	I	NP	00:15	1	2ª FASE DE LAVAGEM	PRENSA DE LAVAGEM Nº2	Dificuldades Operacionais	PRODUÇÃO	16,25
225	2019/02/14	I	NP	00:10	1	2ª FASE DE LAVAGEM	PRENSA DE LAVAGEM Nº2	Dificuldades Operacionais	PRODUÇÃO	10,83333
225	2019/02/22	I	NP	00:30	1	2ª FASE DE LAVAGEM	PRENSA DE LAVAGEM Nº2	Dificuldades Operacionais	PRODUÇÃO	32,5
225	2019/02/26	I	NP	01:00	1	2ª FASE DE LAVAGEM	PRENSA DE LAVAGEM Nº2	Dificuldades Operacionais	MANUTENÇÃO - MECÂNICA	65
225	2019/03/13	I	NP	00:10	1	2ª FASE DE LAVAGEM	PRENSA DE LAVAGEM Nº2	Dificuldades Operacionais	PRODUÇÃO	10,83333
225	2019/05/25	I	NP	00:15	1	2ª FASE DE LAVAGEM	PRENSA DE LAVAGEM Nº2	Avaria eléctrica	MANUTENÇÃO - CONTR. & POTÊNCIA	16,25

## **Anexo E – Plano de Manutenção existente da bomba P049**

### **ASG Elétrica (T = 2 meses)**

Tarefas:

- Verificar e corrigir:
  - Estanquicidade da caixa e buçins do motor e paragem de emergência;
  - Fixação mecânica do motor, paragem, linha terra e proteção motor.
- Detetar ruído anormal no motor.

### **AMS Inspeção Motores Elétricos (T = 3 anos)**

Tarefas:

- Consignar equipamento;
- Verificar apertos na caixa de ligações (cabos e sensores de temperatura) e junta de vedação da caixa e buçins;
- Medir a resistência do motor e do cabo de força motriz;
- Verificar estado e fixação do cabo de terra;
- Verificar limpeza e fixação da grelha de refrigeração.

### **AMS-PA Revisão Bomba 159P049 (T = 2 anos)**

Tarefas:

- Consignar equipamento;
- Desacoplar bomba, inspecionar acoplamentos, correias, polis;
- Verificar sistema de refrigeração do empanque mecânico (desobstruir se necessário);
- Verificar e registar alinhamento;
- Abrir bomba e inspecionar rotor;
- Lubrificar nos pontos de lubrificação indicados;
- Ensaiar conjunto em vazio.

## Anexo F – Pontos de lubrificação da bomba P049

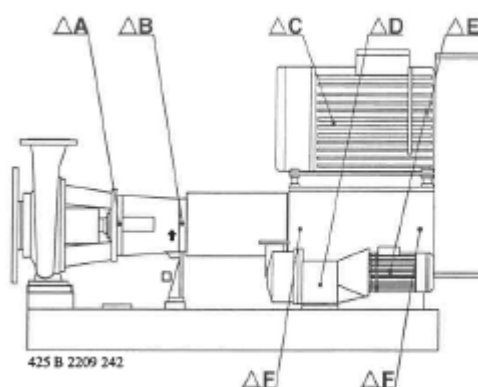
Documento “Instruções de lubrificação” do manual da bomba P049 onde os pontos A e B correspondem ao cárter dos rolamentos, e o ponto C ao rolamento do motor elétrico da bomba.

Os pontos D, E e F já fazem parte da bomba de vácuo.

Bomba de polpa CMD

Manutenção

### Instruções de lubrificação



Ponto de lubrificação		Designação	Intervalo da medição	Lubrificante				
Sím-bolo	Nú-mero			Nota	Quantidade CMD-2010	Quantidade CMD-2515 CMD-2520 CMD-3025	Efeito motor abaixo 55 kW	Efeito motor acima 55 kW
Δ	A	Rolamento	1 mês/ lubrificação	Graxa-01	40 g/pce	40 g/pce		
Δ	B	Rolamento	1 mês/ lubrificação	Graxa-01	60 g/pce	90 g/pce		
Δ	C	Motor	Conforme instruções do fornecedor					
Δ	D	Bomba de vácuo	Os rolamentos estão permanentemente lubrificados e não necessitam de lubrificação adicional					
Δ	E	Motor	Os rolamentos estão permanentemente lubrificados e não necessitam de lubrificação adicional					
Δ	F	Rolamento	1 mês/ lubrificação	Graxa-01			20 g/pce	30 g/pce

425 B 2209 310-05rA

Para a primeira re-lubrificação, a quantidade de graxa indicada na tabela acima deve ser aumentada 2-3 vezes. Não adicionar demasiada graxa, pois pode provocar sobreaquecimento.

## Anexo G – Rotinas de Vibração

### DESCRIPTION OF ROUTE \*\*\*\*\*

Area: 159 DESLI. 225 BRANQ.  
Route Description: FIBRA ROTINA 9  
Person Creating Route: FC

Route Contains: 35 Equipment --> 433 Points

Default Data Storage Flag - Spectra: ALL  
Default Data Storage Flag - Waveform: ALL  
Set Next Spectra as Reference if Point is Armed

Route Creation Date: 07-nov-11  
Route Edit Date: 21-mar-18  
Exception Report Date: 09-jan-19  
Loaded in Data Collector Date: 14-ago-19  
Dumped Data Date: 14-ago-19  
Complete Dump Date: 14-ago-19

Survey Collection Schedule (Days): 30.0  
Number of Machines with Data on Last Dump: 1  
Number of Machines with NO Data on Last Dump: 34  
Data Collection Duration (Days): .0

159010305	-->	BB.PASTA P/MISTURAD.P001	( 18 Points)
159010306	-->	BB.N°1 LUB.CX.ENG. P003(SUP)	( 6 Points)
159010307	-->	BB.N°2 LUB.CX.ENG. P066(INF)	( 6 Points)
159010405	-->	BB.VAC.BB.PAST.P/MIST.P002	( 9 Points)
159050105	-->	ACC.UNID.HIDR.159P117B	( 14 Points)
159020222	-->	UNID. REF. OLEO RED. 159K102	( 6 Points)
159020202	-->	PARAFUSO DIST NASCENT159C119	( 22 Points)
159020204	-->	PARFUSO DESCARGA 159C121	( 22 Points)
159020203	-->	PARAFUSO DIST POENTE 159C120	( 22 Points)
159020315	-->	PAR.DIL.PRENSA1(SUP) 159C103	( 22 Points)
159020415	-->	TRANSP.PASTA P/T(INF)159C104	( 22 Points)
159020221	-->	EXAUSTOR DE GASES 159F021	( 6 Points)
159050206	-->	BB.OLEO ALTA PRESSÃO P046	( 6 Points)
159050207	-->	BOMBA OLEO P047	( 6 Points)
159050205	-->	BOMBA OLEO PRINCIPAL P045	( 12 Points)
159030517	-->	DISTRIBUIDOR PASTA C042	( 22 Points)
159030521	-->	EXAUSTOR DE GASES 159F055	( 5 Points)
159030615	-->	SEM-FIM DESC.PRENS.C048	( 18 Points)
159010615	-->	AGITADOR PASTA B016	( 12 Points)
159020105	-->	BB.PASTA P/PRENSA N1 159P017	( 11 Points)
159040205	-->	BB FILTRADO PRENSA 1 159P101	( 11 Points)
159040305	-->	BB.FILT.P/TANQ.EXPANÇÃO P034	( 11 Points)
159040405	-->	BB.CIRC. FILTRADO 159P035	( 11 Points)
159030315	-->	AGITADOR PASTA B040	( 12 Points)
159030405	-->	BB.PASTA P/PRENSA N°2 P060	( 11 Points)
159080106	-->	BOMBA N°2 AGUA SELAGEM P065	( 11 Points)
159080105	-->	BOMBA N°1 AGUA SELAGEM P064	( 11 Points)
159040805	-->	BB.FILT.P/PRENSA N°2 P061	( 11 Points)
159041005	-->	BOMB.CIRCULÇÃO FILTRADO P063	( 11 Points)
159040905	-->	BB.FILT.P/TQ.DILUIÇÃO P062	( 11 Points)
159030705	-->	BB.PASTA P/TQ.DILUIÇÃO P049	( 11 Points)
159030805	-->	BB.VAC.BB.PAST.P/TQ.DIL.P050	( 11 Points)
225140105	-->	BB.DIOXIDO CLORO N°1 P172	( 11 Points)
225140107	-->	BB.DIOXIDO CLORO N°3 P174	( 11 Points)
225140106	-->	BB.DIOXIDO CLORO N°2 P173	( 11 Points)

\*\*\*\*\* End of Listing \*\*\*\*\*



DESCRIPTION OF ROUTE  
 \*\*\*\*\*

Area: 159 DESLI. 225 BRANQ.  
 Route Description: R9CRI EXT.CONT  
 Person Creating Route: DMC

Route Contains: 30 Equipment --> 382 Points

Default Data Storage Flag - Spectra: ALL  
 Default Data Storage Flag - Waveform: ALL  
 Set Next Spectra as Reference if Point is Armed

Route Creation Date: 28-fev-12  
 Route Edit Date: 14-mar-16  
 Exception Report Date: 22-dez-15  
 Loaded in Data Collector Date: 22-ago-19  
 Dumped Data Date: 22-ago-19  
 Complete Dump Date: 23-ago-19

Survey Collection Schedule (Days): 30.0  
 Number of Machines with Data on Last Dump: 23  
 Number of Machines with NO Data on Last Dump: 7  
 Data Collection Duration (Days): .0

159010305	-->	BB.PASTA P/MISTURAD.P001	( 18 Points)
159010306	-->	BB.N°1 LUB.CX.ENG. P003(SUP)	( 6 Points)
159010307	-->	BB.N°2 LUB.CX.ENG. P066(INF)	( 6 Points)
159020202	-->	PARAFUSO DIST NASCENT159C119	( 22 Points)
159020204	-->	PARFUSO DESCARGA 159C121	( 22 Points)
159020203	-->	PARAFUSO DIST POENTE 159C120	( 22 Points)
159020315	-->	PAR.DIL.PRENSA1(SUP) 159C103	( 22 Points)
159020415	-->	TRANSP.PASTA P/T(INF)159C104	( 22 Points)
159020221	-->	EXAUSTOR DE GASES 159F021	( 6 Points)
159050206	-->	BB.OLEO ALTA PRESSÃO P046	( 6 Points)
159050207	-->	BOMBA OLEO P047	( 6 Points)
159050205	-->	BOMBA OLEO PRINCIPAL P045	( 12 Points)
159030517	-->	DISTRIBUIDOR PASTA C042	( 22 Points)
159030521	-->	EXAUSTOR DE GASES 159F055	( 5 Points)
159030615	-->	SEM-FIM DESC.PRENS.C048	( 18 Points)
159010615	-->	AGITADOR PASTA B016	( 12 Points)
159020105	-->	BB.PASTA P/PRENSA N1 159P017	( 11 Points)
159040205	-->	BB FILTRADO PRENSA 1 159P101	( 11 Points)
159040305	-->	BB.FILT.P/TANQ.EXPANÇÃO P034	( 11 Points)
159040405	-->	BB.CIRC. FILTRADO 159P035	( 11 Points)
159030315	-->	AGITADOR PASTA B040	( 12 Points)
159030405	-->	BB.PASTA P/PRENSA N°2 P060	( 11 Points)
159080106	-->	BOMBA N°2 AGUA SELAGEM P065	( 11 Points)
159080105	-->	BOMBA N°1 AGUA SELAGEM P064	( 11 Points)
159040805	-->	BB.FILT.P/PRENSA N°2 P061	( 11 Points)
159041005	-->	BOMB.CIRCULÇÃO FILTRADO P063	( 11 Points)
159040905	-->	BB.FILT.P/TQ.DILUIÇÃO P062	( 11 Points)
159030705	-->	BB.PASTA P/TQ.DILUIÇÃO P049	( 11 Points)
159030805	-->	BB.VAC.BB.PAST.P/TQ.DIL.P050	( 11 Points)
225140106	-->	BB.DIOXIDO CLORO N°2 P173	( 11 Points)

\*\*\*\*\* End of Listing \*\*\*\*\*

## Anexo H – Pontos de vibração da bomba P049

Os pontos de vibração referentes ao equipamento em estudo (bomba P049) que começam por M referem-se a pontos medidos no motor, e os que começam por B referem-se à bomba. Os números que se seguem a uma das duas letras, M ou B, são as posições, representadas nas imagens abaixo. As letras que seguem o número indicador de posição são referentes ao tipo de medição feito.

### STATUS OF MEASUREMENT POINTS

\*\*\*\*\*

Area: 159 --> 159 DESLI. 225 BRANQ.

Equipment: 159030705 --> BB.PASTA P/TQ.DILUIÇÃO P049

Last Date Analyzed: 08-jan-19

POINT	DESCRIPTION	LAST TREND	SPECTRUM	WAVEFORM	ALARM
M1H	MOTOR LV HORIZONTAL	23-ago-19	23-ago-19	23-ago-19	
M1P	MOTOR LV HORIZONTAL PK VUE	23-ago-19	23-ago-19	23-ago-19	
M2H	MOTOR LA HORIZONTAL	23-ago-19	23-ago-19	23-ago-19	
M2E	MOTOR LA HORIZONTAL ELÉCTRICO	23-ago-19	23-ago-19	23-ago-19	D
M2P	MOTOR LA HORIZONTAL PK VUE	23-ago-19	23-ago-19	23-ago-19	
M2A	MOTOR LA AXIAL	23-ago-19	23-ago-19	23-ago-19	
B3H	BOMBA LA HORIZONTAL	23-ago-19	23-ago-19	23-ago-19	C
B3P	BOMBA LA HORIZONTAL PK VUE	23-ago-19	23-ago-19	23-ago-19	
B4H	BOMBA LOA HORIZONTAL	23-ago-19	23-ago-19	23-ago-19	C
B4P	BOMBA LOA HORIZONTAL PK VUE	23-ago-19	23-ago-19	23-ago-19	
B4A	BOMBA LOA AXIAL	23-ago-19	23-ago-19	23-ago-19	

Imagens que identificam a localização dos pontos para a análise de vibração na bomba P049.



Anexo I – Tabela FMECA

Componente	Função	Modo de Falha	Causa de Falha	Efeito de Falha	Tarefas Existentes	Índice de gravidade	Índice de Ocorrência	Índice de Detecção	NPR	Ações Recomendadas	Frequência						
1	Voluta	Contenção do fluido comprimido e transformação de energia cinética para energia potencial	A	Falha na contenção do fluido	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fissuras</li> <li>Degradação</li> </ul>	Paragem da bomba	-----	9	1	9	81	Inspeção visual interior e Ensaio Não Destrutivo – Líquido Penetrante	1 ano				
				Corrosão-erosão	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desgaste da voluta</li> <li>Baixo rendimento da bomba</li> </ul>	Tratamento superficial no interior						5 anos					
			B	Contaminação exterior	<ul style="list-style-type: none"> <li>Corrosão-erosão</li> <li>Choque mecânico</li> </ul>	Paragem da bomba		9	1	1	9	Inspeção visual exterior	1 mês				
			C	Fadiga	Vibração	Ruído		9	1	1	9	Criação de um relatório mensal para análise condição	Ação única				
2	Rotor	Fornecimento de energia cinética ao fluido	A	Redução da altura de sucção	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cavitação da bomba</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Baixo rendimento da bomba</li> <li>Eventual erosão do impulsor</li> <li>Ruído</li> <li>Vibração</li> <li>Baixo rendimento da bomba</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inspeção visual</li> <li>Rotina de análise de vibrações</li> </ul>	3	1	1	3	Verificação do funcionamento da bomba por ruído	1 dia				
			B	Pressão de compressão reduzida	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cavitação da bomba</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eventual erosão do impulsor</li> <li>Ruído</li> <li>Vibração</li> </ul>								3	1	1	3
			C	Pressão de descarga elevada	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tubagem de descarga entupida</li> <li>Falha na válvula automática da compressão da bomba</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vibração</li> <li>Ruído</li> <li>Caudal reduzido de descarga</li> </ul>								9	1	1	9

			D	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rotor gasto ou danificado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consistência do fluido variável</li> <li>• Cavitação da bomba</li> <li>• Contaminantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perda de saída da bomba/fluxo reduzido</li> </ul>		3	1	9	27		
			E	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrosão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Características do fluido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eventual falha catastrófica</li> </ul>		3	1	9	27		
3	Empanque mecânico	Garantir vedação do fluido	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condução do processo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variabilidade do processo</li> <li>• Paragens intempestivas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Degradação do empanque mecânico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificação do sistema de refrigeração</li> </ul>	3	3	3	27	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inspeção visual das sedes de selagem e líquido de selagem</li> </ul>	1 ano
			B	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de empanque mecânico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Má seleção do empanque mecânico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuga do fluido para o exterior</li> </ul>		9	1	3	27		
			C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuga através do empanque mecânico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Junta danificada</li> <li>• Falha do empanque mecânico</li> <li>• Falta de líquido de lavagem</li> <li>• Desgaste do empanque mecânico</li> <li>• Camisa do veio marcada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuga do fluido para o exterior</li> </ul>		3	1	3	9	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colocação de alarmes de falta de líquido de selagem no DCS</li> </ul>	Ação única
			D	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de líquido de selagem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuga na tubagem</li> <li>• Detecção incorreta da falta de líquido de selagem</li> <li>• Paragem da bomba de água de selagem</li> <li>• Falha do sistema de recuperação de águas de selagem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Encravamento</li> <li>• Degradação do empanque mecânico</li> </ul>		1	1	3	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colocação de sensores de caudal no circuito de água de selagem</li> </ul>	Ação única
4	Veio	Transmissão de rotação para o rotor	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falha na transmissão de rotação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fratura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Paragem da bomba</li> <li>• Subida no nível do stand pipe</li> <li>• Falta de caudal</li> <li>• Consumo do motor baixa</li> <li>• Vibração excessiva</li> <li>• Danos no encaixe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificação e registo do alinhamento</li> <li>• Rotina de análise de vibrações</li> </ul>	9	1	1	9	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inspeção visual e Ensaio Não Destrutivo – Líquido Penetrante ou Partículas Magnéticas</li> </ul>	1 ano

			B	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deflexão do veio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Força de impulso radial elevada no rotor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eventual falha no veio e da bomba</li> <li>Vibração</li> <li>Desgaste do rolamento</li> <li>Fadiga mecânica</li> </ul>		9	1	3	27		
			C	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desalinhamento do veio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desgaste do impulsor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deflexão e desalinhamento do veio</li> <li>Vibração</li> <li>Fuga de empanque mecânico</li> <li>Fadiga mecânica</li> <li>Desgaste do rolamento</li> </ul>		9	1	3	27	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verificação do aperto dos parafusos da chumaceira segundo especificação do fabricante</li> </ul>	1 ano
5	Rolamentos	Acomodação de cargas axiais e radiais	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desalinhamento do conjunto motor-bomba</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Montagem inadequada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desgaste do rolamento-bomba</li> <li>Desgaste do rolamento-motor</li> <li>Degradação do acoplamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rotina de análise de vibrações</li> <li>Rotina de lubrificação</li> </ul>	3	1	3	9	<ul style="list-style-type: none"> <li>Treino da equipa responsável pela montagem dos rolamentos</li> </ul>	1 ano
			B	<ul style="list-style-type: none"> <li>Falha no rolamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Defeito no rolamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Danificação da bomba e motor</li> </ul>		3	1	3	9		
			C	<ul style="list-style-type: none"> <li>Defeito na fixação da bomba</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Chassis danificado</li> <li>Parafuso de fixação do suporte ao chassis danificado</li> <li>Quebra do suporte da bomba</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ruído</li> <li>Rolamento gripado</li> <li>Desgaste das pistas do rolamento</li> <li>Vibração</li> </ul>		3	1	1	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inspeção visual</li> </ul>	1 ano
			D	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nível baixo do óleo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fuga de óleo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rolamentos gripados</li> </ul>		9	1	1	9		
			E	<ul style="list-style-type: none"> <li>Suporte inadequado ao veio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fatura/Desgaste do rolamento</li> <li>Alta temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Paragem da bomba</li> <li>Vibração excessiva</li> <li>Danos no encaixe</li> </ul>		9	1	1	9	<ul style="list-style-type: none"> <li>Colocação de sensores de temperatura nos rolamentos</li> </ul>	Ação única

6	Acoplamento	Acoplamento bomba-motor	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>Falha no acoplamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desapertado/Folga no aperto</li> <li>Desalinhamento</li> <li>Vibração no conjunto</li> <li>Elemento elástico danificado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rotura do equipamento</li> <li>Ruído</li> <li>Vibração excessiva</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rotina de análise de vibrações</li> <li>Inspeção visual</li> </ul>	9	1	1	9	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verificação da existência de folgas; em caso afirmativo, atuar em conformidade</li> </ul>	15 dias
7	Base de Fixação	Reduzir vibrações	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>Falha na fixação da bomba à base</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vibração excessiva</li> <li>Carga axial excessiva</li> <li>Contaminação da base pelo meio envolvente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Baixo rendimento da bomba</li> <li>Paragem da bomba</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rotina de análise de vibrações</li> </ul>	3	1	1	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verificação do aperto do motor elétrico à base e dos pontos de apoio da bomba à base</li> </ul>	1 ano