



Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E
BIOLÓGICA

Aplicação da Metodologia FMECA na DS Smith Relatório de Estágio

Relatório de Estágio para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia e Gestão de Ativos Físicos

Autor

Manuel Alexandre Pita Carvalhido

Orientador

Jorge Alexandre Caldeira Gonçalves de Almeida

Supervisor na empresa DS Smith Paper Viana

Luís Brito

Coimbra, agosto de 2025



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Aplicação da Metodologia FMECA na DS Smith

RESUMO

A tomada de decisão no âmbito da manutenção industrial requer uma abordagem estruturada, especialmente quando envolve equipamentos críticos com impacto direto na produção e na fiabilidade do processo. Este trabalho apresenta a aplicação de uma metodologia baseada na Análise de Modos de Falha, Efeitos e Criticidade (FMECA) como suporte à implementação de estratégias de Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM), numa área funcional de uma fábrica de papel da DS Smith.

Através da recolha e análise de dados, foi possível identificar modos de falha, causas e efeitos, e avaliar a criticidade e o risco associados a cada equipamento. A metodologia adotada permitiu integrar diferentes parâmetros, como impacto ambiental, saúde e segurança, impacto na produção, custos de manutenção, outros fatores que impactam a produção, MTBF e parâmetros de detetabilidade.

Com base nesta análise, foram propostas ações de melhoria orientadas para a redução do risco, incluindo a formalização de planos de inspeção periódica, sugestões de sensorização e medidas recomendadas por fabricantes. Os resultados obtidos demonstram a utilidade da ferramenta desenvolvida na priorização de intervenções e na identificação de oportunidades de melhoria, promovendo uma abordagem mais fiável, sistemática e alinhada com os objetivos estratégicos da organização.

Palavras-chave: RCM, FMECA, Fiabilidade, Manutenção, Criticidade

ABSTRACT

Decision-making in industrial maintenance demands a structured approach, particularly when critical equipment directly impacts production and process reliability. This study presents the application of a methodology based on Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA) to support the implementation of Reliability-Centered Maintenance (RCM) strategies within a functional area of a DS Smith paper mill.

Through data collection and analysis, failure modes, causes and effects were identified, and the criticality and risk associated with each asset were assessed. The adopted methodology integrated multiple parameters, including environmental impact, health and safety, production impact, maintenance costs, other production-impacting factors, mean time between failures (MTBF) and detectability metrics.

Based on this analysis, improvement actions aimed at risk reduction were proposed, including the formalisation of periodic inspection plans, sensorisation suggestions and manufacturer-recommended measures. The results demonstrate the usefulness of the developed tool for prioritising interventions and identifying improvement opportunities, promoting a more reliable, systematic approach aligned with the organisation's strategic objectives.

Keywords: RCM, FMECA, Reliability, Maintenance, Criticality

Aplicação da Metodologia FMECA na DS Smith

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste relatório de estágio.

Em particular, quero agradecer:

Ao Professor Jorge Almeida, meu orientador no Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC), pela sua orientação, disponibilidade e pelas valiosas sugestões prestadas ao longo deste trabalho. A sua experiência e acompanhamento foram essenciais para a concretização deste relatório de estágio.

Ao Eng.^o Luís Brito, orientador de estágio na empresa DS Smith Paper Viana, pela forma como me acolheu, pelo apoio constante e pela partilha de conhecimentos técnicos e práticos que enriqueceram significativamente esta experiência.

À DS Smith Paper Viana, pela oportunidade de realizar o estágio e por todo o apoio disponibilizado durante este período. Agradeço, em especial, a todos os profissionais do departamento de manutenção, pela colaboração, disponibilidade demonstrados desde o primeiro dia.

À minha família e amigos, pela compreensão e apoio constante ao longo de todo o meu percurso académico. Em especial, aos meus pais e á minha irmã.

A todos, o meu obrigado.

ÍNDICE

Resumo	ii
Abstract	iv
Agradecimentos	vi
Índice	vii
Índice de tabelas	x
Índice de figuras	xii
Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos	xiv
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	1
1.3 DS Smith: Líder Global em Packaging Sustentável	2
1.4 Apresentação da unidade industrial DS Smith Paper Viana	3
1.4.1 Principais Mercados onde a DS Smith atua	3
1.5 Combinação da DS Smith e da International Paper	5
1.6 Estrutura do Relatório	6
2 Revisão da Literatura	9
2.1 Manutenção	9
2.2 Estado da Arte	9
2.2.1 Estratégias de Manutenção	13
2.2.2 Evolução da manutenção	15
2.3 RCM	21
2.3.1 História do RCM	21
2.3.2 Princípio do RCM	21
2.3.3 Etapas do Método RCM	22
2.3.4 Benefícios	23
2.4 RBM	26
2.4.1 Definição de risco	26

Aplicação da Metodologia FMECA na DS Smith

2.4.2	Matriz de risco	28
2.4.3	Avaliação de risco	29
2.4.4	Princípios para a implementação do RBM	31
2.5	FMECA	32
2.5.1	Origem da FMECA	32
2.5.2	FMECA	33
2.5.3	Implementação da FMECA	36
2.5.4	Benefícios e Limitações	38
3	Caso de Estudo	41
3.1	Enquadramento	41
3.2	Processo Produtivo	41
3.3	Equipamentos a estudar	44
3.3.1	<i>Lime Mud Drum Filter</i>	44
3.3.2	Bomba de Vácuo de Anel Líquido	46
3.3.3	Secador <i>Flash (Flash Dryer)</i>	46
3.4	Organização do Setor de Manutenção	47
3.5	Metodologia	51
3.5.1	Seleção da área e seus limites	51
3.5.2	Levantamento e identificação dos equipamentos	52
3.5.3	Definição de tabelas e critérios	54
3.5.4	Recolha de dados históricos	59
3.5.5	Avaliação e seleção dos equipamentos críticos	61
3.5.6	Identificação dos modos de falha, causas e efeitos	62
3.5.7	Construção da tabela FMECA	62
3.5.8	Propostas de Melhoria	63
4	Discussão de resultados	69
5	Conclusão	73
	Referências bibliográficas	75

ÍNDICE DE TABELAS

2.1	Revisão da Literatura - Parte 1	10
2.2	Revisão da Literatura - Parte 2	11
2.3	Revisão da Literatura - Parte 3	12
2.4	Tabela dos níveis de severidade	35
2.5	Tabela dos níveis de ocorrência	35
2.6	Tabela dos níveis de deteção de falha	36

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Evolução das estratégias de manutenção	9
2.2	Evolução das gerações de manutenção	16
2.3	Curva da banheira	17
2.4	Padrões de falha de Nowlan e Heap	19
2.5	Principais passos do RCM	24
2.6	Exemplo de matriz de risco com categorias de probabilidade e consequência para representar os níveis de risco	29
3.1	Diagrama de recuperação química com ciclo de lixívia e cal	43
3.2	Organização do Departamento de Manutenção	48
3.3	Limite do Sistema	52
3.4	Modelo tridimensional da bomba de vácuo representado no Navisworks	53
3.5	Modelo tridimensional do filtro de lamas representado no Navisworks	53
3.6	Modelo tridimensional do <i>flash dryer</i> representado no Navisworks	54
3.7	Modelo tridimensional da área funcional representado no Navisworks	54
3.8	Tabela de classificação dos parâmetros de severidade.	55
3.9	Esquema de decisão para a classificação do Índice de Criticidade.	56
3.10	Tabela de classificação do MTBF.	57
3.11	Matriz de risco.	57
3.12	Tabela de classificação do risco.	58
3.13	Classificação dos fatores operacionais que influenciam o impacto na produção.	58
3.14	Classificação da detetabilidade.	59
3.15	Registo das notas e ordens de avaria.	60
3.16	Diagrama de pareto do filtro de lamas.	60
3.17	Diagrama de pareto de bomba de vacúo.	61
3.18	Plano de rotinas.	64
3.19	Folha de Rotinas.	65
4.1	Distribuição dos parâmetros de criticidade.	69
4.2	Evolução do índice de criticidade.	70
4.3	Evolução do Risco.	72

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

AIAG	<i>Automotive Industry Action Group</i>
AMA	<i>Aerospace Manufacturers Associates</i>
API	<i>American Petroleum Institute</i>
APQP	<i>Advanced Product Quality Planning</i>
ATA	<i>Air Transport Association</i>
BSI	<i>British Standards Institute</i>
CA	<i>Criticality Analysis</i>
DCS	<i>Distributed Control System</i>
DoD	<i>Department of Defense</i>
EMEA	<i>Europe, Middle East and Africa</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FC	<i>Field Controllers</i>
FF&D	<i>Fieldbus Foundation & Device</i>
FMEA	<i>Failure Modes, Effects and Analysis</i>
FMECA	<i>Failure Modes, Effects and Criticality Analysis</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IP	<i>International Paper</i>
JIT	<i>Just in Time</i>
KPI	<i>Key Performance Indicator</i>
LTA	<i>Logic Tree Analysis</i>
MSG	<i>Maintenance Steering Group</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i>
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
PERT	<i>Program Evaluation and Review Technique</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
QCS	<i>Quality Control System</i>
RBD	<i>Reliability Block Diagrams</i>
RBM	<i>Risk-Based Maintenance</i>
RCM	<i>Reliability-Centered Maintenance</i>
RPN	<i>Risk Priority Number</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SAP	<i>Systems, Applications and Products</i>
SIS	<i>Safety Instrumented System</i>
TBM	<i>Time-Based Maintenance</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
WBS	<i>Work Breakdown Structure</i>

1

Introdução

1.1 Enquadramento

A crescente competitividade industrial e as exigências de qualidade, produtividade e sustentabilidade reforçam a importância de uma gestão de ativos físicos eficiente. Neste contexto, a manutenção assume um papel estratégico ao garantir a disponibilidade e fiabilidade dos equipamentos, reduzindo paragens não planeadas e otimizando custos operacionais.

No setor de *packaging* sustentável, a eficiência produtiva é essencial para assegurar a resposta às exigências do mercado. Falhas nos sistemas podem comprometer prazos, qualidade e a reputação da empresa. Para enfrentar estes desafios, têm sido adotadas metodologias avançadas como a manutenção centrada na fiabilidade (RCM), que permite a definição de planos de manutenção baseados na criticidade das falhas. Associada a esta, a FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*) reforça a priorização de ações ao avaliar a severidade e criticidade dos modos de falha.

Este relatório insere-se no âmbito de um estágio curricular realizado, entre o dia 6 de janeiro de 2025 e o dia 4 de julho de 2025, na DS Smith Paper Viana, empresa de referência no fabrico de embalagens sustentáveis. O trabalho visa aplicar uma abordagem integrada de RCM e FMECA a uma área piloto da fábrica, com o objetivo de analisar os equipamentos críticos, identificar modos de falha relevantes e propor estratégias que aumentem a fiabilidade e disponibilidade dos ativos, reduzindo custos de manutenção.

Para tal, será realizada uma revisão de literatura sobre as metodologias referidas, seguida da aplicação prática na área selecionada, incluindo o levantamento de dados, a análise dos equipamentos e a proposta de ações de melhoria. Espera-se, assim, demonstrar o impacto positivo da abordagem adotada no desempenho operacional da empresa.

1.2 Objetivos

O objetivo geral passa por desenvolver uma metodologia de análise e avaliação de criticidade de equipamentos, com base nos princípios do RCM e na aplicação da ferramenta FMECA,

numa área piloto do ciclo da cal, com vista a suportar futuras decisões de manutenção.

Objetivos específicos:

- Definir a área de intervenção e os limites do sistema analisado;
- Identificar os modos de falha, causas e efeitos, com base em dados históricos e listas predefinidas;
- Avaliar a criticidade e o risco, utilizando critérios técnicos e operacionais;
- Priorizar os equipamentos críticos e propor ações de melhoria com base nos resultados obtidos;
- Explorar a aplicabilidade da metodologia como fase inicial para o desenvolvimento de uma ferramenta estruturada de apoio à decisão em manutenção.

1.3 DS Smith: Líder Global em Packaging Sustentável

A DS Smith é um dos principais fornecedores globais de soluções de embalagens sustentáveis, produtos de papel e serviços de reciclagem. Com uma trajetória de mais de 80 anos, a empresa cresceu exponencialmente, a diversificar serviços e áreas de especialização, sempre comprometida com a inovação e a sustentabilidade.

A história da DS Smith teve início na década de 1940, quando os primos David Gabriel Smith e David Solomon Smith fundaram um negócio de produção de caixas no leste de Londres. Ao longo das décadas seguintes, a empresa expandiu as suas operações e ganhou reconhecimento pela qualidade de engenharia e dedicação aos clientes. Este crescimento incluiu a incorporação da produção de papel e reciclagem, permitindo à DS Smith oferecer soluções completas no ciclo de vida das embalagens. Nos últimos anos, a empresa ampliou significativamente a sua presença global, adquirindo empresas na Europa e América do Norte. Este progresso consolidou a DS Smith como uma das maiores empresas listadas na Bolsa de Valores de Londres (*London Stock Exchange*).

Atualmente, a DS Smith opera em mais de 30 países e emprega mais de 30.000 colaboradores. A sua visão, "Ser um fornecedor líder de soluções de embalagens sustentáveis", orienta todas as suas atividades, permitindo à empresa crescer nos mercados selecionados e oferecer suporte estratégico aos seus clientes em todo o ciclo de fornecimento de embalagens.

A DS Smith possui 14 fábricas de papel estrategicamente localizadas na Europa e América do Norte, próximas às fontes de matéria-prima e clientes. Estas unidades produzem cerca de 4 milhões de toneladas de materiais para caixas de papelão ondulado e produtos industriais especializados por ano. A maior parte desta produção é convertida em papelão e caixas para embalagens, enquanto uma porção menor é destinada a papéis especializados [1].

Entre as principais fábricas de papel da DS Smith estão as localizadas em países como Espanha, França, Alemanha, Itália, Reino Unido, Estados Unidos e Portugal, destacando-se a unidade de Viana do Castelo (PT). Todas as fábricas operam com um compromisso firme com a sustentabilidade, garantindo que todos os produtos acabados sejam 100% recicláveis e de origem sustentável.

1.4 Apresentação da unidade industrial DS Smith Paper Viana

A DS Smith Paper Viana, localizada em Deocriste, Viana do Castelo, é uma das principais unidades de produção de papel kraft na Europa, contando com cerca de 300 colaboradores. A fábrica foi inicialmente criada em 1974 sob o nome CELNORTE, com uma capacidade produtiva de 136.000 toneladas, conseguiram produzir 53.347 toneladas no seu primeiro ano. Ao longo das décadas, passou por diversas transformações, incluindo nacionalizações, privatizações e aquisições, sendo integrada ao grupo espanhol Europac em 2005 e, mais recentemente, adquirida pela DS Smith em janeiro de 2019.

Desde a sua fundação, a unidade passou por contínuos processos de modernização, com investimentos em tecnologia e infraestrutura que aumentaram a sua eficiência produtiva e a sua capacidade. Um marco importante ocorreu em 1987, com a inclusão de papel reciclado no processo produtivo, alinhando-se a práticas mais sustentáveis e aumentando a capacidade de produção anual para 220.000 toneladas. Atualmente, a fábrica possui uma capacidade bruta de produção de 440.000 toneladas anuais, com gramagens compreendidas entre 115 e 300 g/m².

A DS Smith Paper Viana fabrica dois tipos principais de papel *kraft*, Portopac e Vianapac:

1. Portopac: Este produto é voltado para aplicações exigentes na indústria de embalagem de cartão canelado. É composto predominantemente por fibras virgens de pinho e eucalipto, combinando resistência e qualidade superficial. A camada base utiliza uma pequena quantidade de fibras recicladas.
2. Vianapac: Contém maior quantidade de fibras recicladas na camada inferior, sendo ideal para aplicações menos exigentes. Apesar de possuir propriedades mecânicas inferiores ao Portopac, o Vianapac é uma solução econômica e sustentável.

1.4.1 Principais Mercados onde a DS Smith atua

A DS Smith é uma referência global no fornecimento de soluções de embalagem sustentáveis e de alto desempenho, desenvolvendo produtos adaptados às necessidades de diversos mercados competitivos. Com décadas de experiência, a empresa destaca-se na criação, fabrico e fornecimento de embalagens que combinam eficiência, inovação e sustentabilidade. Os principais mercados de atuação incluem [2]:

Automação - A DS Smith desenvolve embalagens específicas para componentes OEM (*Original Equipment Manufacturer*) e fornecedores de suprimentos, com soluções adaptadas à cadeia de fornecimento e à linha de montagem. A empresa trabalha diretamente com grandes fabricantes, garantindo redução de custos e melhorias contínuas. As embalagens podem ser personalizadas, com materiais como cartão, plástico ou espumas, para proteger adequadamente qualquer peça automóvel, desde componentes pequenos até peças maiores. Com os seguintes produtos relacionados: embalagens de manutenção, contentores de plástico retornáveis, embalagens metálicas, bandejas termoformadas, entre outros.

Benefícios:

- Máximo número de produtos por embalagem.
- Soluções personalizadas para envio direto à linha de montagem.
- Possibilidade de fornecimento Just In Time (JIT).
- Embalagens descartáveis ou reutilizáveis.
- Kits dobráveis para exportação, economizando espaço.

Químico - No setor químico, a DS Smith é especializada no desenvolvimento de embalagens de alta resistência para produtos a granel, como plásticos e outros químicos. A empresa oferece cartões canelados quádruplos, quádruplos e sêxtuplos, que garantem resistência máxima ao peso e proteção dos produtos. Essas embalagens otimizam o armazenamento e o transporte, garantindo que os produtos cheguem em perfeitas condições. Com os seguintes produtos relacionados: embalagens para produtos sólidos a granel, embalagens para líquidos a granel, e contentores de plástico retornáveis.

Benefícios:

- Fornecimento de embalagens planas, reduzindo em até 90% o espaço ocupado.
- Maximização do empilhamento dinâmico/estático.
- Soluções telescópicas para produtos de densidade variável.
- Redução significativa dos custos totais.

Alimentação - Para o setor alimentar, a DS Smith oferece soluções de embalagem que mantêm os alimentos frescos e protegidos, atendendo a rigorosos padrões de segurança alimentar, como a norma ISO 22000 - *Food Safety Management*. Essas embalagens otimizam o transporte e o armazenamento, sendo ideais para produtos frescos e a granel. Com os seguintes produtos relacionados: embalagens para sólidos e líquidos a granel e paletes ultraleves.

Benefícios:

- Otimização do espaço no armazenamento e no transporte.
- Cartão de alta resistência em várias qualidades.
- Garantia de proteção dos produtos frescos.
- Maximização do empilhamento dinâmico e estático.
- Redução dos custos totais.

Industrial - O mercado industrial exige soluções robustas para produtos grandes, pesados ou volumosos. A DS Smith oferece embalagens de alta resistência, desde soluções descartáveis em cartão a embalagens reutilizáveis, com acondicionamento interior personalizado para proteger os produtos durante o transporte e armazenamento. Com os seguintes produtos relacionados: embalagens de cartão e madeira, box paletes, contentores de plástico retornáveis e soluções mistas.

Benefícios:

- Desenvolvimento personalizado, com protótipos e testes.

- Cartões canelados de máxima resistência (quádruplo, quádruplo e sêxtuplo).
- Possibilidade de fornecimento JIT ou embalagem interno.
- Embalagens descartáveis e reutilizáveis.
- Kits dobráveis para exportação, reduzindo o espaço ocupado.
- Redução dos custos totais.

1.5 Combinação da DS Smith e da International Paper

No dia 31 de janeiro de 2025, a International Paper (IP) finalizou a aquisição da DS Smith, uma das principais empresas europeias especializadas em soluções de embalagem sustentável. Com esta união originou um novo líder global no setor, conjugando a capacidade industrial e a vasta rede logística da IP com a forte presença europeia e o foco ambiental da DS Smith. Através desta operação, a International Paper não só reforçou a sua presença no continente europeu, como também consolidou o seu portfólio de soluções sustentáveis, afirmando-se como uma referência mundial no desenvolvimento de embalagens.

Embora o presente trabalho tenha como foco principal a estrutura e operação da DS Smith, torna-se relevante destacar que a sua integração na International Paper constitui uma transformação estratégica de grande significado. Esta nova etapa poderá ter impacto direto na cultura organizacional, nos processos produtivos e nas políticas de sustentabilidade da empresa, e abrir caminho a novas oportunidades de crescimento, sinergias operacionais e inovação ambiental.

A International Paper é atualmente uma das maiores empresas globais nos sectores do papel, da celulose e das embalagens sustentáveis. Fundada em 1898, nos Estados Unidos da América, a empresa resultou da fusão de 20 fábricas de papel localizadas no nordeste do país, tendo-se afirmado rapidamente como líder de mercado. Em 1941, a empresa foi adquirida pela *International Paper and Power Corporation*, que viria posteriormente a adotar o nome original, dando continuidade à sua expansão industrial.

Ao longo da sua história, a International Paper desenvolveu uma estratégia consistente de crescimento através de aquisições e fusões, concentrando-se na produção de papel, embalagens e madeira serrada. Entre as operações mais relevantes destacam-se a compra da Hammermill Paper Company em 1986, reconhecida fabricante e distribuidora de papéis para impressão, a aquisição da Federal Paper Board Company em 1995, e a integração da Champion International em 2000, ambas empresas concorrentes no sector do papel e das embalagens. Estas aquisições permitiram à International Paper diversificar a sua oferta, reforçar a sua presença nos principais mercados e consolidar a sua liderança global no sector, [3].

Com sede em Memphis, no estado do Tennessee, nos Estados Unidos da América, a International Paper emprega, após a união, mais de 65.000 colaboradores e opera em mais de 30 países, com destaque para as mais de 430 fábricas de papel e packaging distribuídas entre a América do Norte e a região EMEA (Europa, Médio Oriente e África). A empresa é também uma das maiores proprietárias privadas de florestas a nível mundial, com milhões de hectares

nos Estados Unidos, Canadá, Rússia, Brasil e Nova Zelândia, assegurando assim o fornecimento sustentável de matéria-prima para as suas unidades de produção.

A IP dedica-se à produção de embalagens à base de fibra renovável, papel para impressão e escrita, polpa absorvente (utilizada em fraldas, lenços de papel e outros produtos de higiene pessoal), bem como de diversos materiais essenciais à cadeia global de comércio. Com mais de 125 anos de experiência industrial, a International Paper tem-se distinguido pela implementação de soluções circulares que promovem a reutilização de materiais, a reciclagem, a redução de resíduos e a preservação ambiental. A sua missão é transformar recursos naturais renováveis em produtos indispensáveis à vida quotidiana, contribuindo simultaneamente para o desenvolvimento sustentável das comunidades em que opera.

A cultura organizacional da International Paper assenta num conjunto de valores fundamentais que orientam a sua atuação onde está presente. O primeiro desses valores é a segurança, que reflete o compromisso da empresa com a proteção e o bem-estar dos seus colaboradores. A empresa promove um ambiente de trabalho seguro, baseado na preocupação mútua, com o objetivo de garantir que todos regressam a casa em segurança no final de cada jornada de trabalho.

A ética constitui igualmente um princípio central. A conduta da organização baseia-se na honestidade, na integridade e no respeito, sendo promovida uma cultura de transparência, responsabilidade e abertura nas relações com todas as partes interessadas.

O valor da gestão responsável traduz a preocupação da International Paper com a administração consciente dos recursos naturais, das comunidades, das pessoas e do capital sob a sua responsabilidade. A empresa procura, de forma contínua, deixar uma marca positiva para as gerações futuras, através da implementação de práticas sustentáveis e responsáveis.

O foco no cliente representa outro pilar essencial. A empresa compromete-se a fazer o que considera correto em todas as interações, oferece soluções adequadas, eficientes e fiáveis, com base nas necessidades dos seus clientes.

Por fim, os princípios de inclusão e envolvimento são ativamente valorizados, com o objetivo de construir uma cultura em que cada colaborador se sinta integrado e reconhecido. A International Paper procura criar um ambiente de trabalho propício ao desenvolvimento do potencial individual e à participação efetiva de todos no sucesso coletivo da organização.

1.6 Estrutura do Relatório

O presente relatório de estágio está organizado em seis capítulos, de forma a facilitar a compreensão e o acompanhamento lógico do desenvolvimento do trabalho.

No primeiro capítulo é efetuada a introdução, apresenta-se o enquadramento do tema, os objetivos do trabalho e uma visão detalhada da empresa DS Smith, da unidade DS Smith Paper Viana, e a recente integração com a International Paper e a estrutura do relatório.

No tocante ao capítulo dois é realizada uma revisão de literatura, são explorados os conceitos fundamentais teóricos que sustentam o trabalho, nomeadamente os diferentes tipos e

Aplicação da Metodologia FMECA na DS Smith

estratégias de manutenção, a evolução do conceito de manutenção, e metodologias específicas como o RCM (*Reliability-Centered Maintenance*), o RBM (*Risk-Based Maintenance*) e a FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*), com destaque para suas aplicações, benefícios e limitações.

Já no terceiro capítulo é apresentado o caso de estudo que constitui o núcleo prático do trabalho, onde se detalha a atividade desenvolvida na unidade industrial. Inicia-se com a descrição do processo produtivo e dos equipamentos analisados, a organização do setor de manutenção, a metodologia adotada e as suas etapas.

O capítulo quatro é dedicado à discussão de resultados sendo analisados e interpretados os mesmos, no âmbito do caso de estudo, de forma a avaliar a eficácia da metodologia aplicada.

Finalmente no capítulo cinco, apresenta-se uma síntese das principais conclusões do trabalho, com base na experiência e nos resultados obtidos ao longo do estudo.

2

Revisão da Literatura

2.1 Manutenção

De acordo com a norma NP EN 13306 - Terminologia da Manutenção, a manutenção é definida como a “combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo e repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida”.

“As ações técnicas de manutenção incluem, por exemplo, a observação e análise do estado do bem, como inspeções, monitorização, ensaios, diagnóstico, prognóstico, entre outras, bem como ações de manutenção ativa, como a reparação, recondicionamento e a recuperação”, [4].

De forma geral, o termo manutenção refere-se ao conjunto de atividades realizadas para garantir o bom funcionamento de equipamentos, instalações ou sistemas e, quando aplicado a uma máquina específica, permite prolongar o seu ciclo de vida. Paralelamente, a manutenção também visa a redução de custos, nomeadamente através da prevenção de falhas críticas que possam agravar o estado dos equipamentos e provocar interrupções nos processos produtivos [5].

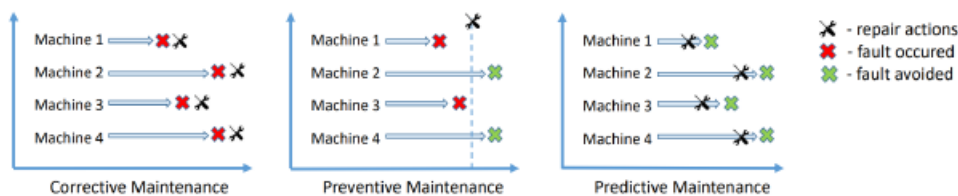


Figura 2.1: Evolução das estratégias de manutenção [6].

2.2 Estado da Arte

Seguidamente, apresenta-se uma breve revisão da literatura sobre a temática das estratégias de manutenção, do RCM, do FMECA/FMEA e sobre estado da arte, conforme se pode constatar nas tabelas 2.1, 2.2 e 2.3.

Artigo	Resumo	Conclusão
[7]	Neste artigo, é apresentado um enquadramento de análise de fiabilidade baseado em modelos (MRAF) para gerar automaticamente FMEA e a CA para a manutenção centrada na fiabilidade.	É apresentado um enquadramento de análise RCM baseado em modelos (MRAF). O enquadramento permite uma análise FMECA rápida e eficaz.
[8]	O objetivo deste capítulo é apresentar a RCM como uma abordagem viável para otimizar a manutenção de sistemas, através de uma combinação óptima de tarefas de manutenção por falha, baseadas no tempo, baseadas na condição e por modificação de projeto.	A RCM é uma abordagem viável para a optimização da manutenção. A RCM envolve uma combinação de diferentes tipos de tarefas de manutenção.
[9]	Apresentam um modelo FMECA, utilizado para o planeamento da manutenção, este modelo foi desenvolvido inicialmente na indústria aeronáutica e, posteriormente, adaptado para várias outras indústrias e instituições militares.	A FMECA otimiza os planos de manutenção, reduzindo custos e aumentando a fiabilidade. Estratégias de manutenção eficazes melhoram a segurança e a integridade operacional.
[10]	Neste artigo, a FMECA é utilizada como etapa inicial de um programa de melhoria contínua de processos de fabrico, com o objetivo de identificar os modos de falha críticos e as causas subjacentes mais significativas.	A FMECA pode ser utilizada como etapa inicial para a melhoria contínua de processos de fabrico e ajuda a identificar modos de falha críticos e causas subjacentes significativas.
[11]	A FMECA é uma ferramenta amplamente estabelecida na gestão do risco técnico, durante a fase de conceção da maioria dos projetos e produtos modernos, conforme mencionado neste artigo.	A FMECA reforça de forma eficaz os programas de manutenção centrada na fiabilidade. As recomendações baseadas na criticidade melhoram o sucesso operacional e a rentabilidade.

Tabela 2.1: Revisão da Literatura - Parte 1

Aplicação da Metodologia FMECA na DS Smith

Artigo	Resumo	Conclusão
[12]	A RCM, conforme mencionada neste artigo, é uma metodologia para a gestão da manutenção de instalações industriais no Equador, desenvolvida na indústria da aviação civil, com o objetivo de determinar as atividades de manutenção necessárias para que os ativos de uma empresa continuem a desempenhar as funções para as quais foram concebidos, tendo em conta a segurança dos trabalhadores e a integridade do ambiente.	A RCM foca-se nas tarefas de manutenção necessárias para reduzir os custos de forma eficaz. A manutenção preventiva diminui em 60%, enquanto a manutenção baseada na condição aumenta em 40%.
[13]	Este estudo tem como objetivo demonstrar, através da aplicabilidade teórica de uma ferramenta simples, mas de grande valor para o aumento da fiabilidade no setor de manutenção de uma indústria, a aplicação dos conceitos RCM e da ferramenta FMEA em equipamentos de uma empresa química diretamente envolvidos no processo de fabrico de fluido de travões.	A RCM e a FMEA aumentam a fiabilidade dos equipamentos na manutenção. A identificação de falhas reduz o tempo de paragem e melhora a tomada de decisões.
[14]	A implementação da manutenção autónoma, desenvolvida através do enquadramento FMEA-RCM, reduziu entre 40% e 60% o nível de avarias a partir do primeiro semestre de 2018, na máquina de enchimento do tipo A, na fábrica Nutrifood Cibitung	A manutenção autónoma permitiu reduzir as avarias das máquinas em 40-60%. Modelos FMEA-RCM foram utilizados para determinar as possíveis falhas e as causas-raiz.
[15]	Neste artigo, foi desenvolvido um sistema de apoio à decisão de manutenção especializado, baseado na manutenção centrada na fiabilidade e na FMECA do Departamento de Defesa dos EUA.	A RCM melhora a disponibilidade e a eficácia dos equipamentos no setor de fabrico. Os testes em campo são prioritários para a validação e o aperfeiçoamento da estratégia.

Tabela 2.2: Revisão da Literatura - Parte 2

Artigo	Resumo	Conclusão
[16]	Neste artigo, os autores introduzem um novo aspeto da abordagem, permitindo que as probabilidades de falha dos componentes sejam dependentes do tempo, o que pode, por sua vez, conduzir a diferentes estratégias de manutenção ideais ao longo do tempo, com base no desgaste expectável de um componente.	Seleção da estratégia de manutenção com base na abordagem FMEA. As probabilidades de falha dependentes do tempo podem conduzir a diferentes estratégias de manutenção ao longo do tempo.
[17]	Neste artigo, é desenvolvida uma abordagem modificada de manutenção centrada na fiabilidade (RCMCCM), envolvendo um grande número de especialistas, aplicada ao sistema de caldeiras a vapor utilizado na indústria têxtil, no âmbito do trabalho de investigação aqui apresentado.	A implementação da técnica RCM aumenta a fiabilidade e a disponibilidade do sistema de caldeiras. A aplicação de programas de manutenção programada pode resultar numa poupança anual de até 20,32% nos custos de manutenção.
[18]	A metodologia RCM foi implementada para melhorar a disponibilidade de aeronaves através de intervenções de manutenção preventiva. Foram utilizadas as ferramentas FMECA e AHP para a investigação de falhas e avaliação da criticidade dos sistemas. Observou-se uma melhoria na disponibilidade e uma redução no tempo de paragem.	A disponibilidade da aeronave é crucial para a prontidão das missões. A implementação da RCM melhorou a disponibilidade em 6,62% e reduziu o tempo de paragem em 15,71%.
[19]	A manutenção centrada na fiabilidade é uma análise sistemática baseada no risco, destinada a desenvolver um método de manutenção preciso, focado e otimizado, com o objetivo de alcançar uma fiabilidade ótima dos ativos.	O estudo de RCM estabeleceu estratégias de manutenção para cada modo de falha. Os valores de RPN para todos os equipamentos variaram entre 72 e 900.
[20]	Neste artigo, é apresentada a RCM com o objetivo de melhorar a disponibilidade da máquina de cardagem na indústria têxtil, sendo utilizada a FMEA para analisar as falhas na máquina.	A RCM melhora a disponibilidade da máquina de cardagem e a produtividade. As medidas preventivas reduzem o tempo de paragem em 26% e aumentam a disponibilidade em 1,7%.

Tabela 2.3: Revisão da Literatura - Parte 3

2.2.1 Estratégias de Manutenção

A manutenção pode ser definida como o conjunto de ações destinadas a monitorizar, restaurar ou melhorar a funcionalidade de um bem, bem como a evitar a sua perda total ou parcial de desempenho [21]. Estas ações são organizadas segundo estratégias de manutenção, que definem regras sobre como e quando intervir, que componentes priorizar, que tipo de manutenção aplicar, que peças utilizar e que equipas técnicas envolver [22].

De um papel inicialmente secundário, a manutenção foi conquistando importância nas organizações e hoje assume-se como uma função estratégica, pois exige competências técnicas e de gestão, bem como flexibilidade para responder às exigências do ambiente industrial [5]. Existem diversas formas de classificar as estratégias de manutenção, sendo uma das mais comuns aquela que distingue as ações com base no momento da intervenção face à falha, como é o caso da manutenção corretiva, da preventiva e da preditiva, figura 2.1.

Manutenção corretiva

A manutenção corretiva é uma estratégia baseada na intervenção após a ocorrência de uma falha. Segundo a norma NP EN 13306 (2021), esta é definida como a “manutenção efetuada após a deteção de avaria e destinada a repor um bem num estado em que pode realizar uma função requerida”. Esta abordagem é também conhecida por outros termos, como manutenção reativa, de emergência ou de avaria [5].

Historicamente, a manutenção corretiva foi a estratégia convencional adotada em muitas indústrias, sobretudo devido à falta de conhecimento sobre os comportamentos de falha dos equipamentos [5][21]. Numa fase inicial, era comum apenas reparar os ativos quando deixavam de funcionar, o que, apesar de simplificar as operações e reduzir os custos imediatos de manutenção, também resultava num aumento do risco de indisponibilidade dos equipamentos [23].

Este tipo de manutenção pode ser realizado imediatamente após a falha ou ser adiado, desde que a condição do ativo permita, sendo geralmente executado por técnicos qualificados contratados para avaliar a situação e realizar os reparos necessários [5]. A manutenção corretiva é particularmente adequada a sistemas não críticos em termos de segurança, cujas falhas não causam consequências severas e podem ser resolvidas de forma rápida e a baixo custo [21].

No entanto, apesar das suas vantagens aparentes, como o alargamento do intervalo entre manutenções e a redução de custos em ativos pouco relevantes ou com longos tempos de paragem disponíveis, esta estratégia apresenta também várias limitações. Os seus efeitos negativos incluem perdas de receita, custos elevados de reparação, danos colaterais em equipamentos relacionados e aumento do tempo e do custo de intervenção, devido à natureza não planeada da avaria [23]. Além disso, fatores como a concorrência de mercado, questões ambientais e exigências de segurança levaram os gestores de manutenção a procurar estratégias mais eficientes e proativas do que a simples correção após a falha [5].

Manutenção preventiva

A manutenção preventiva é uma abordagem que visa reduzir a probabilidade de falha de um equipamento através da execução de ações programadas de inspeção, serviço ou substituição. Segundo a norma NP EN 13306 (2021), trata-se da “manutenção efetuada com a finalidade de avaliar e/ou mitigar a degradação e reduzir a probabilidade de falha de um bem”. Neste contexto, a manutenção preventiva distingue-se por ser realizada antes da ocorrência de falhas, de forma sistemática e planeada.

A manutenção preventiva consiste na execução de tarefas previamente programadas, realizadas em momentos específicos no tempo, com o objetivo de preservar as capacidades funcionais dos equipamentos ou sistemas operacionais [24]. Essas tarefas incluem, por exemplo, lubrificação, ajustes, trocas de óleo e diagnósticos avançados [23].

A manutenção preventiva tem como principal objetivo evitar paragens não planeadas, através da realização periódica de inspeções e substituições programadas, contribuindo para a extensão da vida útil dos ativos e a deteção precoce de falhas [25]. A sua programação pode ser feita com base em diversos critérios, como o tempo de operação, o volume de produção, ou ainda a condição real do equipamento. Para definir os intervalos de manutenção, é possível recorrer a recomendações dos fabricantes, à análise de indicadores de fiabilidade como o MTBF, tempo médio entre falhas, ou ainda a indicadores de desempenho (KPIs) e sistemas de monitorização [23].

Apesar das suas vantagens, como a redução do risco de falhas inesperadas e a garantia de funcionamento em boas condições, a manutenção preventiva apresenta também algumas limitações. Por exemplo, a substituição excessiva de peças pode ser prejudicial para o desempenho do sistema. A troca de uma peça original por outra nova pode reduzir a fiabilidade do sistema como um todo, devido a erros de montagem, defeitos ocultos ou incompatibilidades. Além disso peças novas e consumíveis podem, em alguns casos, ter maior probabilidade de falhar do que os componentes já em funcionamento [23].

Adicionalmente, esta abordagem exige planeamento rigoroso e custos associados, tanto em termos de recursos como de tempo de paragem programada. Assim, para que a manutenção preventiva seja eficaz, sobretudo em setores onde a disponibilidade dos ativos é crítica, é necessário alinhar os intervalos de manutenção com a disponibilidade exigida, recorrendo a dados históricos, condições reais de uso e modelos de otimização de custo-fiabilidade [23].

Manutenção preditiva

A manutenção preditiva é uma estratégia que se baseia na monitorização contínua de parâmetros do equipamento para prever falhas futuras e realizar intervenções apenas quando necessário, geralmente pouco antes de uma falha esperada. Segundo a norma NP EN 13306 (2021), esta é definida como uma “manutenção baseada na condição efetuada de acordo com previsões extrapoladas de análises repetidas ou características conhecidas e avaliação de parâmetros significativos de degradação do bem”.

A manutenção preditiva utiliza dados atuais e históricos, juntamente com modelos ana-

líticos e algoritmos, para projetar o comportamento futuro do ativo [24]. Assim, o foco não é apenas identificar uma condição anômala no presente, mas antecipar quando e onde ocorrerá uma falha com base em tendências observadas.

Esta abordagem recorre a técnicas de medição e processamento de sinais para monitorizar parâmetros como vibrações, temperatura, taxa de desgaste, degradação de componentes ou contaminação de fluídos, os quais costumam apresentar anomalias antes da ocorrência de falhas [24]. Quando monitorizados de forma contínua, esses sinais fornecem avisos antecipados que permitem uma gestão mais eficiente da manutenção, reduzindo o risco de paragens inesperadas e possibilitando ações corretivas mais eficazes.

A manutenção preditiva é considerada um subtipo da manutenção baseada na condição, com a particularidade de prever o desempenho futuro do equipamento com base em indicadores atuais e históricos. A aplicação desta estratégia permite reduzir tanto as paragens planeadas, por possibilitar um melhor planeamento das ações preventivas, como as não planeadas, ao evitar falhas inesperadas através de um acompanhamento contínuo [23].

Entre as técnicas convencionais mais utilizadas na manutenção preditiva destacam-se as medições periódicas de variáveis operacionais críticas, as quais alimentam sistemas de análise que apoiam decisões sobre quando intervir de forma ideal, maximizando a disponibilidade e a fiabilidade dos ativos.

2.2.2 Evolução da manutenção

Uma estratégia de manutenção bem estruturada permite reduzir o risco de falhas dos equipamentos, aumentar a disponibilidade operacional e, conseqüentemente, diminuir os custos de exploração, protegendo o investimento a longo prazo [26].

Como ilustrado na figura 2.2, a estratégia de manutenção tem evoluído ao longo do tempo, estruturando-se em quatro gerações distintas, cada uma com características e abordagens próprias.

Primeira geração

A primeira geração da manutenção, que se estende até à segunda guerra mundial, caracteriza-se por um contexto industrial pouco mecanizado, onde as máquinas eram, em grande parte, simples e sobredimensionadas. Neste período, o impacto das paragens nos equipamentos era reduzido, o que fazia com que a prevenção de falhas não fosse uma prioridade significativa para os gestores da época [27]. A fiabilidade das máquinas era, em grande medida, assegurada pela sua conceção robusta e simplicidade operacional, o que facilitava os processos de reparação [25][27].

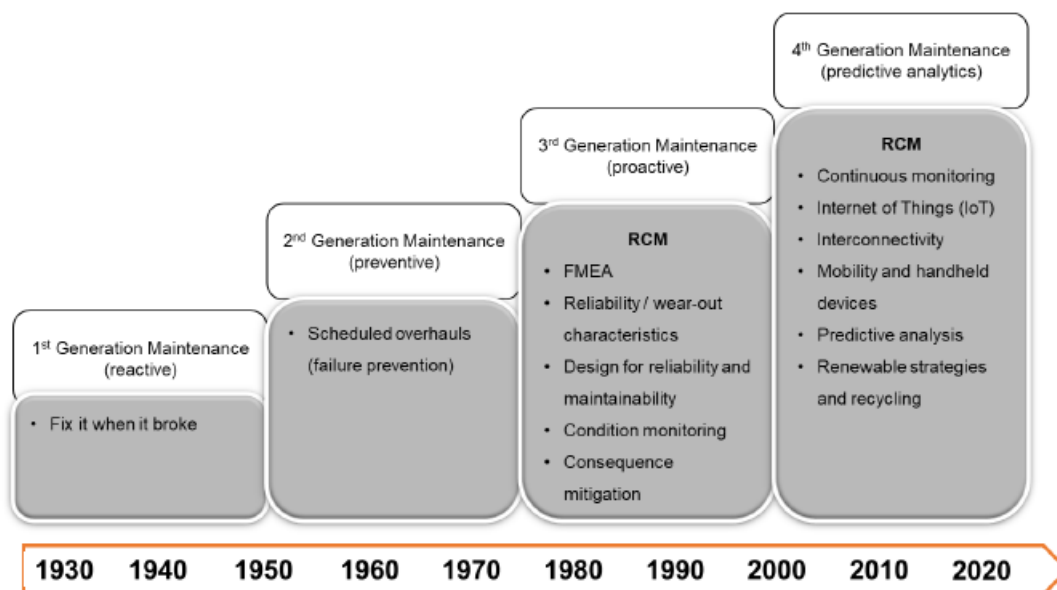


Figura 2.2: Evolução das gerações de manutenção [26].

O modelo de manutenção dominante nesta fase era o da manutenção corretiva, também conhecido como "*Breakdown Maintenance*". Este tipo de manutenção baseava-se na filosofia de "fixar apenas quando avaria", ou seja, as intervenções ocorriam apenas após a ocorrência de falhas, sem qualquer ação preventiva, [26][27]. Esta abordagem apresentava algumas vantagens imediatas, como a inexistência de paragens programadas entre falhas, contudo, acarretava diversos inconvenientes a médio e longo prazo. Entre os principais desafios estavam a necessidade de manter grandes inventários de peças sobressalentes, o aumento dos tempos de paragem imprevistos, os elevados custos de reparação, e o risco acrescido de danos colaterais, comprometendo a segurança e a previsibilidade orçamental [22].

As tarefas de manutenção limitavam-se, na sua maioria, a operações simples como limpeza, lubrificação e substituição de componentes danificados, sem recurso a qualquer planeamento sistemático [26][27]. Devido à simplicidade das máquinas, que operavam a baixas velocidades e com mecanismos básicos, as intervenções exigiam poucos conhecimentos técnicos e eram geralmente realizadas por operários com formação mínima [25].

Em síntese, a manutenção na primeira geração era predominantemente reativa e informal, refletindo o baixo grau de complexidade dos ativos industriais da época. Esta abordagem, embora funcional num contexto de baixa exigência operacional, revelou-se limitada à medida que a indústria evoluiu para sistemas mais complexos e exigentes.

Segunda Geração

A segunda geração da manutenção desenvolveu-se no período compreendido entre os anos 1950 e 1970, fortemente influenciada pelas mudanças socioeconómicas e tecnológicas ocorridas após a segunda guerra mundial. Durante o conflito, a crescente pressão por produtos industriais coincidiu com uma acentuada escassez de mão de obra qualificada, o que impulsionou a mecanização acelerada dos processos produtivos. Como consequência, a indústria

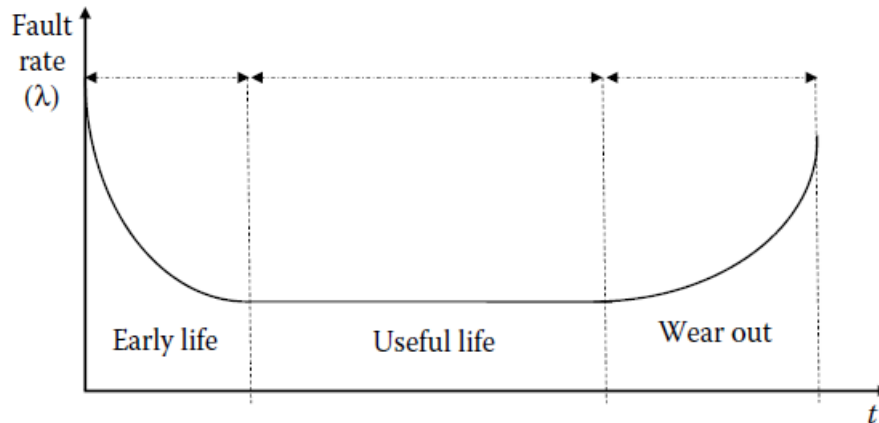


Figura 2.3: Curva da banheira [30].

passou a depender cada vez mais de máquinas, que se tornaram mais numerosas, complexas e críticas para a produção [27][28].

Com o aumento da dependência dos ativos industriais, o tempo de inatividade ganhou relevância e passou a ser percebido como um fator determinante para a eficiência operacional. Este novo cenário fomentou a ideia de que as falhas poderiam e deveriam ser evitadas, dando origem ao conceito de manutenção preventiva, baseada em intervenções programadas em intervalos fixos, com o objetivo de evitar falhas catastróficas [22][27].

Essa abordagem, conhecida como manutenção baseada no tempo ou *Time-Based Maintenance* (TBM), pressupunha que os componentes das máquinas possuíam um ciclo de vida definido e que a probabilidade de falha aumentava com o tempo de uso, conforme o conhecido modelo da “curva da banheira”, figura 2.3, [22][29]. A crença era que realizar revisões ou substituições periódicas antes do fim da vida útil dos componentes reduziria o risco de falhas. No entanto, essa estratégia desconsiderava o estado real dos equipamentos e as suas características específicas de desgaste, o que levou a muitos casos de reparações desnecessárias e substituições prematuras, aumentando significativamente os custos operacionais [26].

Durante este período, observou-se também um crescimento acentuado dos custos de manutenção em relação aos demais custos operacionais, o que motivou o desenvolvimento de sistemas de planejamento e controle da manutenção. Ferramentas como os diagramas de Gantt e técnicas PERT começaram a ser utilizadas, muitas vezes apoiadas por computadores lentos e de grande porte, para organizar e otimizar as intervenções programadas[27][29].

Além disso, a crescente quantidade de capital investido em ativos fixos e o aumento do custo desse capital impulsionaram as organizações a procurar formas de prolongar a vida útil dos equipamentos, reforçando a necessidade de uma gestão mais eficiente da manutenção [27][28].

Em síntese, a segunda geração da manutenção foi marcada pela transição de uma abordagem reativa para uma estratégia planejada e sistemática, baseada em ciclos fixos de revisão. Embora esta evolução tenha melhorado a disponibilidade dos equipamentos e permitido um

maior controlo dos processos de manutenção, também revelou limitações importantes, especialmente no que diz respeito à eficiência económica e à adequação técnica das intervenções.

Terceira Geração

A terceira geração da manutenção, iniciada na década de 1970, resultou de profundas transformações nos sectores industriais, marcadas pelo aumento da automatização, pela crescente complexidade dos sistemas produtivos e pela adoção generalizada do modelo *Just-in-Time* (JIT). Este último reduziu substancialmente os níveis de stock ao longo da cadeia de abastecimento, tornando qualquer paragem inesperada nos equipamentos potencialmente disruptiva para toda a operação produtiva [27][28].

Neste novo contexto, a indisponibilidade dos ativos físicos passou a representar uma ameaça significativa não apenas à produtividade, mas também à qualidade dos produtos, à segurança operacional e à sustentabilidade ambiental. À medida que a dependência dos sistemas técnicos aumentava, elevavam-se também os custos de aquisição, operação e manutenção desses equipamentos. Simultaneamente, os requisitos legais e sociais em matéria de segurança e impacto ambiental tornaram-se cada vez mais exigentes, colocando a integridade física dos ativos como um fator essencial para a continuidade operacional das organizações [22][27].

Com estas novas exigências, a função manutenção passou a ser reconhecida como um elemento estratégico nas organizações. Deixou de ser encarada como um "mal necessário" ou uma mera função técnica, para ser considerada um verdadeiro contribuinte para o desempenho económico, através do aumento da disponibilidade, fiabilidade e longevidade dos ativos, bem como da melhoria da qualidade dos produtos e da segurança operacional [29].

As expectativas associadas à manutenção nesta fase incluíam:

- Maior disponibilidade e fiabilidade dos equipamentos;
- Segurança reforçada para pessoas e processos;
- Redução ou eliminação de impactos ambientais;
- Melhoria da qualidade dos produtos;
- Aumento da vida útil dos ativos;
- Maior eficácia no controlo de custos.

Para responder a estas exigências, emergiram novas abordagens, entre as quais se destaca a manutenção baseada na condição (*Condition-Based Maintenance*), com suporte de tecnologias de monitorização do estado dos equipamentos em tempo real, com recurso a sensores, sistemas especialistas e ferramentas de diagnóstico. Este avanço foi possibilitado, em grande medida, pela disseminação de sistemas informáticos mais rápidos e compactos, que permitiram analisar e interpretar grandes volumes de dados operacionais [22].

No entanto, a mudança mais significativa desta geração foi a consolidação do RCM, desenvolvida com base no estudo realizado por Nowlan e Heap (1978) para a United Airlines e promovido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos. Este trabalho revelou que a maioria dos componentes não apresentava padrões de falha previsíveis associados à sua idade

ou tempo de operação, contrariando a ideia até então dominante de que a manutenção em intervalos fixos seria eficaz para prevenir avarias [26].

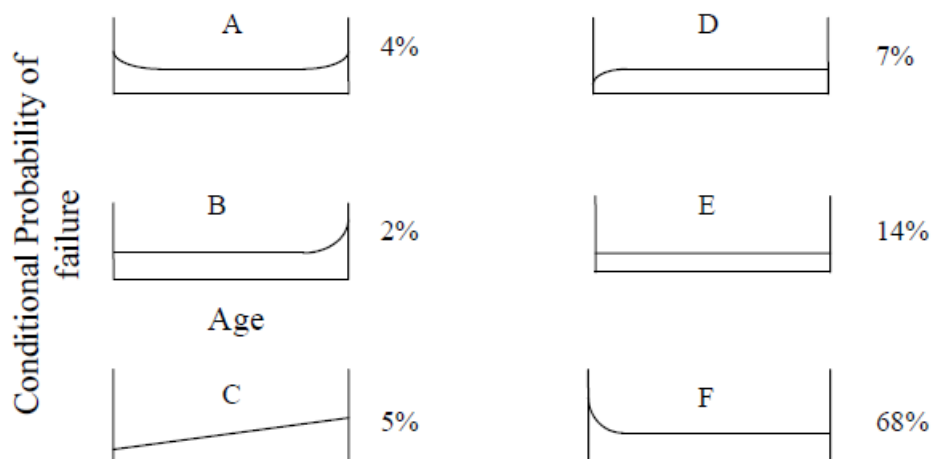


Figura 2.4: Padrões de falha de Nowlan e Heap [26].

O estudo identificou seis padrões distintos de falha, figura 2.4, concluindo que apenas cerca de 11% dos componentes beneficiariam da substituição com base na idade operacional. A restante maioria, cerca de 89%, apresentava falhas aleatórias ou independentes do tempo de utilização, o que demonstrou a ineficácia das estratégias tradicionais baseadas em revisões calendarizadas [26].

A RCM introduziu, assim, uma abordagem sistemática e baseada na análise crítica das funções do ativo, das suas falhas potenciais e das consequências associadas. Esta metodologia permitiu selecionar, com base em critérios técnicos e operacionais, as tarefas de manutenção mais adequadas para cada componente, contribuindo para uma alocação mais eficiente dos recursos e para o aumento do desempenho global dos sistemas produtivos [26].

As principais técnicas e práticas associadas à terceira geração da manutenção incluem:

- Monitorização da condição (vibrações, temperatura, entre outros);
- Análise de modos e efeitos de falha (FMEA/FMECA);
- Estudos de perigos e riscos (*Hazard Studies*);
- Projetos orientados para a manutenção e fiabilidade;
- Utilização de sistemas especialistas e equipas multidisciplinares;
- Integração da manutenção no planeamento global de recursos.

A introdução do RCM representou um verdadeiro marco na história da manutenção, ao oferecer um modelo mais racional, flexível e centrado nas reais necessidades operacionais. Isso permitiu reduzir custos, aumentar a fiabilidade e adequar as práticas de manutenção às exigências modernas de qualidade, segurança e sustentabilidade [29].

Quarta Geração

A denominada quarta geração da manutenção, cujo surgimento remonta à década de 1990, marca uma mudança profunda na forma como se encara a gestão da manutenção em ambientes industriais. Esta geração assenta numa abordagem proactiva, centrada na fiabilidade dos ativos, na redução de falhas não planeadas e na integração de tecnologias digitais avançadas, como sensores inteligentes, sistemas de monitorização contínua e análise preditiva de dados [26][28].

Ao contrário das gerações anteriores, nas quais predominavam intervenções corretivas ou manutenções preventivas baseadas em intervalos temporais, a quarta geração caracteriza-se por uma diminuição da correlação entre a vida útil dos componentes e a probabilidade da sua falha. Estudos recentes demonstram que, sobretudo em equipamentos modernos, tal relação tornou-se menos linear, exigindo uma atenção redobrada à identificação e mitigação dos seis padrões de falha, com especial foco na sua eliminação sempre que possível [26].

Neste novo paradigma, a manutenção preditiva assume um papel central. A monitorização em tempo real, suportada por sensores e sistemas digitais, permite que os técnicos de manutenção realizem diagnósticos com base em dados objetivos e instantâneos, em detrimento da tradicional dependência do feedback fornecido pelos operadores no final do turno [26].

Apesar do seu carácter inovador, a quarta geração conserva ainda alguns elementos da geração anterior, nomeadamente a integração da engenharia de manutenção no planeamento estratégico. A fiabilidade tornou-se o objetivo primordial das políticas de manutenção, sendo a disponibilidade operacional considerada como principal indicador de desempenho [28].

Outro desafio crítico nesta fase relaciona-se com a redução das chamadas “falhas de mortalidade infantil”, ou seja, falhas prematuras que ocorrem numa fase inicial do ciclo de vida do equipamento. Este fenómeno foi amplamente estudado, nomeadamente pela United Airlines. Neste contexto, a análise de falhas afirmou-se como uma ferramenta imprescindível na otimização do desempenho e na gestão do risco operacional [28].

A transição das abordagens reativas para estratégias preventivas e preditivas reflete uma alteração estrutural tanto na mentalidade organizacional como nas práticas operacionais. Deixou-se de ver a manutenção apenas como uma resposta a avarias, passando a ser entendida como uma função estratégica orientada para a prevenção de interrupções, a maximização da produtividade e a redução dos custos associados à paragem não planeada [28].

Assim, a quarta geração da manutenção representa um modelo de excelência na gestão de ativos, fundado na conjugação entre tecnologia, engenharia e estratégia, sendo indispensável para a competitividade e sustentabilidade das organizações industriais contemporâneas.

2.3 RCM

2.3.1 História do RCM

A manutenção centrada na fiabilidade (RCM – *reliability-centered maintenance*) não é um conceito recente. A sua origem remonta aos fins da década de 1960, sendo inicialmente desenvolvida no setor da aviação nos Estados Unidos [17]. Esta necessidade surgiu com o avanço tecnológico e a complexidade crescente dos novos aviões, como o Boeing 747, cujos custos de manutenção preventiva, se fossem aplicadas as abordagens tradicionais, tornariam a operação comercial economicamente inviável [31].

Neste contexto, a indústria aeronáutica, liderada pela United Airlines e com apoio de entidades como a *Federal Aviation Administration* (FAA), a *Air Transport Association* (ATA) e a *Aerospace Manufacturers Associates* (AMA), iniciou um processo de reavaliação profunda das estratégias de manutenção preventiva. Este esforço culminou na criação do grupo MSG, *Maintenance Steering Group*, que desenvolveu o primeiro manual formal para estruturação de programas de manutenção, o MSG-1 [31][32].

Apesar da sua origem na aviação, a metodologia RCM foi mais tarde aplicada a outros setores. Em 1972, sob contrato com o Departamento de Defesa dos EUA (DoD), a United Airlines adaptou os princípios do MSG à manutenção de aeronaves militares como o P-3, S-3 e F-4J. Em 1975, o DoD formalizou a designação “*Reliability-Centered Maintenance*” e determinou a sua aplicação a todos os principais sistemas militares. Em 1978, foi publicada a primeira obra de referência em RCM sob contrato do DoD, consolidando o método como padrão nas forças armadas americanas [31].

A partir daí, o RCM expandiu-se para outras indústrias com elevados requisitos de fiabilidade, como a nuclear e a de petróleo e gás. Em 1983, o *Electric Power Research Institute* (EPRI) deu início a projetos-piloto em centrais nucleares, os quais mais tarde evoluíram para aplicações em larga escala em centrais nucleares e termoelétricas comerciais [31]. O RCM, que começou por ser desenvolvido no setor aeronáutico, tem vindo a ser implementado com sucesso também em setores como o marítimo, o da energia e o da indústria transformadora, demonstrando a sua adaptabilidade e eficácia em diferentes contextos industriais [33].

RCM é, portanto, o resultado de um processo evolutivo já com algum tempo, iniciado na aviação comercial e no setor militar, que acabou por se consolidar como uma prática madura nesses contextos. Apesar disso, muitos outros setores industriais ainda não adotaram plenamente o RCM, apesar do seu sucesso comprovado. No entanto, a sua aplicação continua a expandir-se à medida que se reconhece o seu potencial para aumentar a segurança, reduzir custos e garantir a disponibilidade dos sistemas [34].

2.3.2 Princípio do RCM

Moubray definiu RCM, como “um processo utilizado para determinar o que deve ser feito para garantir que qualquer ativo físico continue a fazer o que os seus utilizadores desejam que ele faça no seu contexto operativo atual.”

RCM é uma abordagem sistemática para determinar os requisitos de manutenção de equipamentos e instalações no seu contexto operativo, garantindo que os ativos continuem a desempenhar as suas funções conforme esperado pelos utilizadores. Desenvolvida inicialmente na indústria aeronáutica, a metodologia RCM tem sido amplamente aplicada em diversos setores industriais para maximizar a fiabilidade e disponibilidade dos sistemas, enquanto otimiza custos e recursos ao longo do ciclo de vida dos equipamentos [27]. O RCM opera a equilibrar os elevados custos da manutenção corretiva com estratégias de manutenção programada, sejam estas preventivas ou preditivas, e considera também a possível redução da vida útil dos ativos quando submetidos a diferentes estratégias de manutenção , [24][35].

A filosofia do RCM integra diversas estratégias de manutenção para assegurar a operação contínua dos equipamentos, combinando manutenção preventiva, baseada no tempo ou utilização do equipamento, manutenção preditiva, que recorre à monitorização de condições operacionais para intervir apenas quando necessário, manutenção proativa, focada na eliminação das causas fundamentais das falhas, e a manutenção reativa, que pode ser aplicada a itens de baixa criticidade, permitindo que operem até à falha sem comprometer a segurança ou a operação do sistema [36]. Ao contrário de abordagens tradicionais que aplicam estas estratégias de forma independente, o RCM procura a integração destas metodologias, equilibrando as vantagens de cada uma para aumentar a fiabilidade operacional, reduzir custos e minimizar tempos de paragem desnecessários.

A aplicação do RCM centra-se na preservação das funções do sistema, em vez de apenas garantir o funcionamento individual dos equipamentos. Para tal, baseia-se na identificação dos modos de falha potenciais e na análise das suas consequências, avaliando o impacto de cada falha em termos de segurança, impacto ambiental, na operação e custos associados à sua ocorrência. A partir desta avaliação, são determinadas as estratégias de manutenção mais adequadas para mitigar os riscos identificados e garantir que o desempenho esperado do sistema seja mantido ao longo do tempo [36]. O RCM tem-se mostrado uma ferramenta essencial para setores industriais onde a fiabilidade dos equipamentos é crítica, sendo frequentemente utilizado para otimizar a manutenção de sistemas complexos, como centrais elétricas, indústrias petroquímicas, transportes e processos industriais que exigem operações contínuas [35].

2.3.3 Etapas do Método RCM

O RCM segue uma abordagem sistemática para garantir a preservação das funções do sistema, identificar modos de falha, priorizar falhas e realizar tarefas de manutenção preventiva. De acordo com a figura 2.5 as etapas do RCM são as seguintes [35] [33]:

1. Seleção do sistema e recolha de dados: Nesta fase, o sistema é escolhido e as informações necessárias são recolhidas para garantir que o sistema em questão não seja demasiado amplo, o que permite uma análise eficaz.

2. Definição dos limites do sistema: Definem-se claramente os limites do sistema em análise para evitar sobreposições com outros sistemas e para garantir que a análise se concentre apenas nas partes relevantes.

3. Descrição do sistema e diagrama funcional em blocos: O sistema é descrito em detalhe, e um diagrama funcional em blocos é utilizado para ilustrar as interações entre os componentes. Nesta fase, também é desenvolvida a estrutura de divisão do trabalho (*Work Breakdown Structure - WBS*) do sistema, que facilita a compreensão e a gestão do sistema.

4. Função do sistema e falhas funcionais: Aqui, identificam-se as funções essenciais do sistema e as falhas funcionais que podem comprometer a sua operação, com foco na preservação dessas funções críticas.

5. Análise dos efeitos dos modos de falha (FMEA): Na análise FMEA, são identificados os modos de falha potenciais e seus efeitos. Com base na gravidade, ocorrência e capacidade de detecção de cada falha, é calculado o número de prioridade de risco (RPN), o que permite priorizar as falhas que exigem ações corretivas imediatas.

6. Diagrama de árvore lógica (LTA): A preparação do diagrama de árvore lógica procura garantir que as prioridades sejam atribuídas adequadamente a cada modo de falha. Este diagrama ajuda a visualizar as relações causais entre falhas para facilitar a decisão sobre a forma de mitigação.

7. Seleção das ações: Por fim, é feita a seleção das ações corretivas e preventivas a serem implementadas. O processo inclui a definição das tarefas mais adequadas para cada tipo de falha, orientadas por um conjunto de questões guias que asseguram a escolha de intervenções eficazes e eficientes.

A implementação do RCM proporciona uma série de vantagens, tais como o aumento da fiabilidade e disponibilidade dos equipamentos, a redução de falhas inesperadas e a melhoria do desempenho operacional. Além disso, a metodologia permite a redução de custos ao eliminar intervenções desnecessárias e otimizar a periodicidade das ações de manutenção.

Ao identificar as funções mais críticas do sistema e focar os recursos de manutenção onde são realmente necessários, o RCM contribui para uma utilização mais eficiente dos ativos e para um aumento da vida útil dos componentes de alto valor. No âmbito da segurança e sustentabilidade, a aplicação desta metodologia também reduz riscos operacionais e impactos ambientais, assegurando que os sistemas funcionam dentro dos requisitos normativos e regulamentares [24].

2.3.4 Benefícios

Segundo Moubray e Hauge et al. [27], o RCM oferece uma série de benefícios significativos para as organizações.

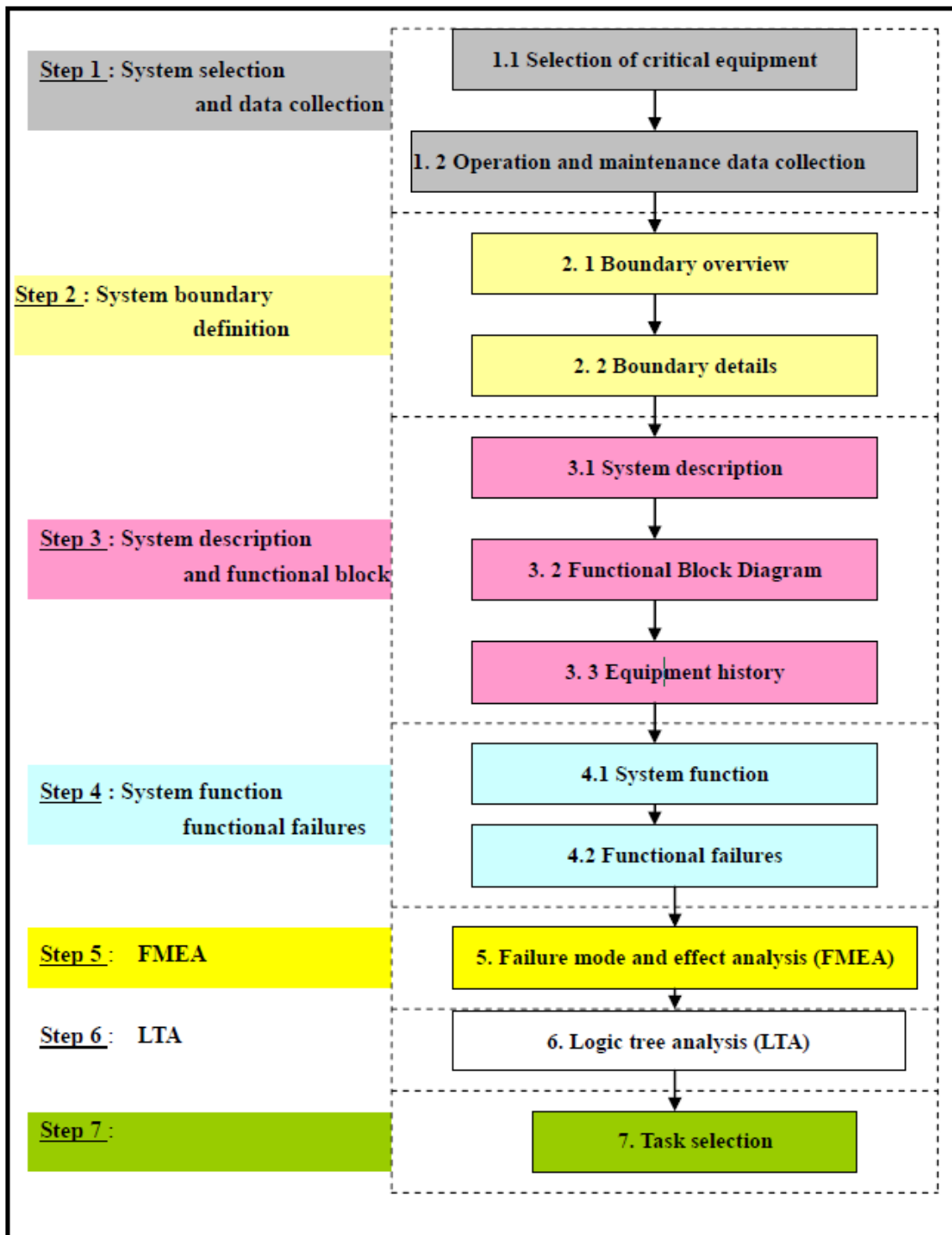


Figura 2.5: Principais passos do RCM [35].

Aplicação da Metodologia FMECA na DS Smith

Maior segurança e integridade ambiental em primeiro lugar, considerar as implicações de cada falha e minimizar os perigos relacionados com equipamentos. Através da integração da segurança no processo de manutenção, é possível melhorar a atitude geral em relação à segurança.

Melhoria no desempenho operacional, na produção, qualidade do produto e serviço ao cliente. Desenvolvido inicialmente para as companhias aéreas, o RCM é também uma excelente forma de desenvolver programas de manutenção para novos ativos, especialmente quando se trata de equipamentos complexos para os quais não há informações históricas. Isso ajuda a evitar os erros e tentativas que normalmente fazem parte do desenvolvimento de programas de manutenção, economizando tempo e dinheiro.

Maior vida útil dos itens, outro benefício importante é a extensão da vida útil de itens caros, devido ao foco na manutenção baseada nas condições dos equipamentos.

Base de dados abrangente e bem documentada, o RCM também cria uma base de dados sobre os requisitos de manutenção de todos os ativos significativos, permite que a organização se adapte a mudanças e demonstre que os programas de manutenção são baseados em fundamentos racionais, o que também facilita as auditorias exigidas por reguladores.

Visão mais clara das competências necessárias, para manter a manutenção de cada ativo, além de uma melhor gestão do stock de peças de reposição. A metodologia também contribui para a melhoria de desenhos e manuais, e motiva as equipas, especialmente aquelas envolvidas no processo de revisão, promove uma maior compreensão do equipamento e um maior “sentimento de propriedade” dos problemas de manutenção, isso leva a soluções mais duradouras.

Facilita o trabalho em equipa. Finalmente, o RCM ao fornecer uma linguagem técnica comum, permite que as equipas de manutenção e operações compreendam melhor o que a manutenção pode alcançar e o que deve ser feito para atingir os objetivos. Esta abordagem promove uma gestão de manutenção mais eficaz e bem-sucedida, sendo que, quando implementado corretamente, o RCM pode gerar resultados rápidos, com benefícios visíveis em meses ou até semanas, proporcionando uma manutenção mais harmoniosa, eficaz e com melhor custo-benefício [27].

Segundo o Departamento de Defesa dos EUA, o RCM é um elemento essencial na gestão integrada da manutenção, sendo utilizado para determinar estratégias de gestão de falhas em ativos críticos. A sua aplicação não se limita à definição de tarefas de manutenção, mas pode também resultar em modificações no design dos sistemas, melhorias nos programas de formação dos operadores, revisão de procedimentos operacionais e a eliminação de atividades de manutenção ineficazes ou desnecessárias. Em algumas organizações, os programas de manutenção foram historicamente construídos sem seguir os princípios do RCM, resultando em estratégias baseadas exclusivamente em recomendações dos fabricantes, práticas comerciais ou adaptações de outros equipamentos semelhantes. Esse excesso de ações de manutenção pode tornar os planos ineficazes e economicamente inviáveis, ao passo que a implementação estruturada do RCM permite otimizar e racionalizar esses processos [37].

Dessa forma, a manutenção centrada na fiabilidade apresenta-se como uma abordagem robusta e comprovada para a otimização dos processos de manutenção industrial. A sua apli-

cação requer um estudo detalhado dos modos de falha, impacto operacional e estratégias de mitigação, para garantir que as ações de manutenção sejam técnica e economicamente justificáveis. Ao adotar esta metodologia, as empresas conseguem melhorar a fiabilidade dos seus sistemas, reduzir custos operacionais e garantir que os seus ativos operam de forma eficiente ao longo de todo o seu ciclo de vida, contribuindo assim para uma gestão de manutenção mais eficaz e sustentável.

2.4 RBM

A metodologia de manutenção baseada no risco (RBM) teve origem na década de 1990, num contexto de mudança paradigmática na forma como a manutenção industrial era concebida. Até então, esta atividade era frequentemente percebida pelas organizações como um centro de custos e perdas operacionais [38]. Com o aumento da complexidade tecnológica, da exigência por maior fiabilidade e da crescente preocupação com a segurança e a continuidade das operações, tornou-se evidente a necessidade de abordagens mais estratégicas e eficientes. Neste enquadramento, a RBM surgiu como uma metodologia estruturada, composta por etapas modulares que permitem a avaliação sistemática dos riscos associados à falha de ativos [39]. O seu princípio fundamental reside na quantificação do risco como a combinação entre a probabilidade de falha e as respetivas consequências [40] [41].

A consolidação desta abordagem foi fortemente impulsionada por grandes acidentes industriais ocorridos nas décadas anteriores, que revelaram a necessidade de uma maior integração entre manutenção, segurança e gestão de ativos [42]. A publicação da norma NORSOK Z-008, em 1996, pela indústria petrolífera norueguesa, constituiu um marco relevante na formalização da RBM, ao estabelecer diretrizes aplicáveis a todo o ciclo de vida dos ativos e promover uma abordagem sistemática de melhoria contínua [43].

2.4.1 Definição de risco

A avaliação de risco constitui um elemento central nas estratégias modernas de manutenção. A norma NORSOK Z-008:2017 define risco como a “combinação entre a probabilidade de ocorrência de um evento e as suas consequências”. Esta abordagem permite uma priorização mais eficaz das ações de manutenção e uma melhor distribuição recursos para os equipamentos ou sistemas cujo potencial de falha representa maior impacto para a operação, segurança ou meio ambiente [44].

Na Norma (NP 4410:2004 - Sistemas de Gestão da Segurança e Saúde do Trabalho) o risco assume uma definição mais sucinta, sendo descrito como: “A combinação da probabilidade e da(s) consequência(s) da ocorrência de um determinado acontecimento perigoso.” [45].

O risco obtém-se assim, através da seguinte expressão:

$$Risco = PoFCoF \quad (2.1)$$

Onde PoF é a “Probability of Failure”- Probabilidade de falha e CoF é a “Consequence of

Failure” - Consequências da falha.

PoF - Probabilidade de falha

A probabilidade de falha (PoF) é um dos elementos fundamentais na avaliação de risco em programas de manutenção baseada no risco. Representa a possibilidade de ocorrência de uma falha num equipamento ou sistema, ao longo de um determinado intervalo de tempo ou sob condições específicas de operação. Trata-se, essencialmente, de uma estimativa quantitativa ou qualitativa do grau de exposição ao risco de falha, construída com base em dados históricos, técnicos e empíricos [45].

Segundo a API RP 580 (2016), a análise da PoF tem como objetivo estimar a probabilidade de uma consequência adversa específica ser o resultado de uma falha causada por mecanismos de degradação identificados. Esta avaliação deve ser credível, repetível e devidamente documentada, e considerar todos os mecanismos de dano plausíveis aos quais o equipamento está ou pode vir a estar sujeito. Quando existem múltiplos mecanismos de degradação simultâneos, estes devem ser analisados em conjunto.

A metodologia reconhece ainda que, para além dos mecanismos típicos de degradação, outros fatores externos podem afetar a PoF. Entre eles incluem-se fenómenos naturais, como atividade sísmica ou condições climáticas extremas, falhas em dispositivos de alívio de pressão, erro humano, erros de projeto, ou até sabotagem [46]. Embora estes fatores nem sempre sejam incluídos na análise padrão, podem ser relevantes em contextos de risco elevado.

A forma como a PoF é avaliada depende, em grande medida, do tipo de equipamento. Em equipamentos estáticos, como tubagens e tanques, a PoF está geralmente associada à taxa de progressão dos mecanismos de degradação como corrosão, erosão ou fragilização e às condições operacionais e ambientais envolventes. Nestes casos, revela-se particularmente eficaz, dado que permite relacionar os modos de falha com as suas causas e taxas de crescimento em função do meio envolvente [47].

Já nos equipamentos dinâmicos, como bombas, a estimativa da PoF é mais complexa, devido ao carácter imprevisível de certos modos de falha. Nessas situações, é frequente recorrer-se a abordagens empíricas, como a análise histórica, a experiência de especialistas e o uso de tabelas de referência baseadas em equipamentos semelhantes. A metodologia RCM é frequentemente aplicada em conjunto, nestes casos [47].

Por fim, destaca-se que a robustez da análise da PoF depende da qualidade e fiabilidade dos dados utilizados, que podem incluir registos de operação e manutenção, documentação técnica de fabricantes, e informação proveniente de contextos operacionais semelhantes. Assim, a correta caracterização da PoF constitui uma base essencial para a priorização eficaz das ações de inspeção e manutenção no âmbito de um programa RBM.

CoF - Consequências da falha

No âmbito da metodologia RBM, consequência da falha refere-se ao impacto potencial resultante da ocorrência de uma falha num determinado equipamento. A sua análise tem como objetivo estabelecer uma discriminação entre os diferentes ativos, com base na significância dos efeitos que uma falha poderá causar [46].

De acordo com a definição da API RP 580, uma consequência é o resultado da concretização de um evento indesejado, ou seja, de um modo de falha previamente identificado. A análise da CoF deve constituir uma estimativa credível, simplificada e repetível do que poderá ocorrer caso esse evento se verifique. Para tal, o método adotado deve ser capaz de distinguir claramente entre diferentes níveis de severidade, permitindo a priorização dos equipamentos com maiores potenciais de impacto [45].

As consequências são, normalmente, classificadas em três grandes categorias, amplamente aceites nas metodologias de RBM:

- 1 - Segurança e saúde: impactos sobre pessoas, podendo incluir lesões, invalidez permanente ou fatalidade.
- 2 - Ambiental: efeitos adversos no meio ambiente, como derrames de produtos perigosos, cujas consequências variam conforme o tipo e a quantidade de substância envolvida.
- 3 - Económica: perdas materiais, danos em ativos, custos de indemnizações, sanções legais ou interrupções na produção [46][47]

A equação usada para representar a consequência total da falha pode ser expressa como, [45]:

$$CoF_{Total} = CoF_{Segurana} + CoF_{Ambiental} + CoF_{Econmica} \quad (2.2)$$

O nível de detalhe da análise de CoF pode variar consoante os objetivos do estudo e a disponibilidade de dados, sendo possível aplicar desde métodos simplificados até abordagens quantitativas mais complexas, com expressões monetárias associadas às consequências económicas [47].

2.4.2 Matriz de risco

No contexto da metodologia de análise de risco, a matriz de risco assume um papel fundamental na comunicação dos resultados obtidos. Após a determinação dos valores resultantes da combinação entre a probabilidade de falha e a consequência da falha, torna-se essencial apresentar essa informação de forma clara e acessível a diferentes perfis de decisão, nomeadamente os responsáveis pela definição de prioridades de inspeção e manutenção [46].

A matriz de risco constitui, assim, uma ferramenta gráfica que permite visualizar e comparar o nível de risco dos diferentes ativos, sem necessidade de recorrer a valores numéricos complexos. Numa matriz típica, as categorias de consequência e probabilidade são organizadas em eixos que formam uma grelha, por exemplo, 5x5 ou 4x4, sendo que os níveis de risco mais elevados se situam, geralmente, no canto superior direito. Esta representação facilita a

discriminação entre itens com diferentes perfis de risco e apoia diretamente a tomada de decisão.

Adicionalmente, é comum associar valores numéricos de referência a cada categoria, com o objetivo de fornecer maior rigor à avaliação. Por exemplo, uma determinada categoria de probabilidade pode corresponder a um intervalo de frequências de falha, como é o caso da categoria “C”, que poderá situar-se entre 0,001 e 0,01. As matrizes podem ainda ser construídas de forma simétrica ou assimétrica, consoante se pretenda atribuir igual peso às variáveis ou valorizar mais fortemente um dos fatores, por exemplo, as consequências, nos casos em que os impactos operacionais ou ambientais sejam especialmente relevantes [46].

A matriz de risco pode, por fim, ser segmentada por categorias de criticidade, como risco baixo, médio e alto, o que contribui para uma priorização mais objetiva das intervenções, como na figura 2.6. Importa destacar que esta ferramenta representa o risco num dado instante temporal, e, como tal, deve ser periodicamente atualizada com base em novos dados operacionais, resultados de inspeções ou alterações no contexto de funcionamento dos ativos.

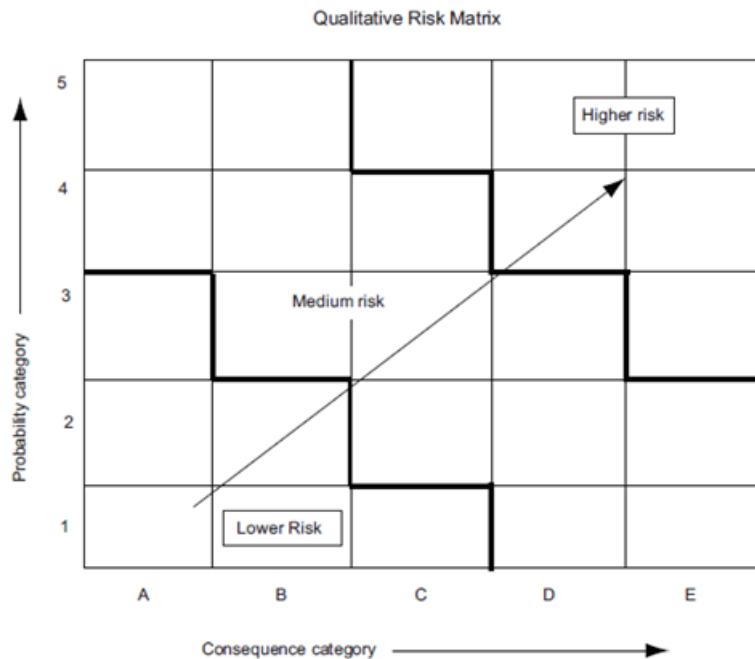


Figura 2.6: Exemplo de matriz de risco com categorias de probabilidade e consequência para representar os níveis de risco [46].

2.4.3 Avaliação de risco

Qualitativa

A avaliação de risco qualitativa constitui uma abordagem baseada principalmente no julgamento técnico e na experiência dos especialistas envolvidos, em detrimento de cálculos numéricos detalhados. Em vez de se atribuírem valores quantitativos à probabilidade de falha (PoF) e às consequências da falha (CoF), esta metodologia utiliza classificações descritivas, como baixo, médio ou elevado, ou escalas numéricas simples, como 1, 2 ou 3, [48].

A principal vantagem deste método reside na sua rapidez de execução, baixo custo inicial e na facilidade de compreensão e comunicação dos resultados, uma vez que não requer grande quantidade de dados detalhados. No entanto, trata-se de uma abordagem subjetiva, fortemente dependente da experiência e conhecimento da equipa de análise, o que pode limitar a sua repetibilidade e dificultar a atualização posterior dos resultados, especialmente após a realização de inspeções [48].

Segundo a norma API RP 580, a eficácia da análise qualitativa depende da definição clara dos objetivos da avaliação, bem como da coerência na categorização dos itens analisados. Para isso, é essencial estabelecer conjuntos de regras que assegurem consistência nos critérios aplicados à classificação do risco [47].

A abordagem qualitativa exige um maior grau de habilidade interpretativa, já que utiliza faixas de avaliação amplas, exigindo assim analistas com formação técnica adequada e competências específicas na interpretação dos resultados. Neste sentido, destaca-se a importância de contar com profissionais experientes, capazes de realizar avaliações robustas mesmo com dados limitados.

O processo metodológico básico de uma análise qualitativa de risco pode ser sintetizado em quatro etapas, [45]:

1. Listagem dos sistemas e componentes;
2. Estimativa da probabilidade de falha (PoF);
3. Estimativa das consequências da falha (CoF);
4. Construção de uma matriz de risco qualitativa.

Quantitativa

A avaliação quantitativa do risco consiste numa abordagem orientada por modelos, em que, sempre que existam dados e ferramentas adequadas, são calculados valores numéricos concretos para a probabilidade de falha e as suas consequências. Ao contrário da abordagem qualitativa, esta metodologia permite medir o risco com maior precisão, podendo inclusive determinar com exatidão o momento em que um determinado limite de aceitação do risco será ultrapassado [48].

Os modelos quantitativos utilizam frequentemente ferramentas computacionais, que automatizam o processo de cálculo e criação de programas de inspeção. Apesar de exigirem um volume elevado de dados iniciais, oferecem a vantagem de serem sistemáticos, consistentes e facilmente atualizáveis com base nos resultados das inspeções [48]. Este grau de detalhe e rigor permite ultrapassar as limitações da abordagem qualitativa, cuja natureza subjetiva e conservadora pode levar a estimativas menos precisas do risco real [45].

Tipicamente, a avaliação quantitativa é precedida por uma análise qualitativa, a qual permite uma primeira categorização do risco em termos amplos. A partir desta base, é possível então avançar para uma modelação mais detalhada, atribuindo valores numéricos específicos à CoF, frequentemente associados a custos, e utilizando modelos lógicos que representam com-

binacões de eventos e cenários de falha. Estes modelos são avaliados de forma probabilística, criam resultados que podem ser apresentados tanto em termos qualitativos como quantitativos, conforme a necessidade de comunicação e decisão [45].

A exatidão e fiabilidade da análise quantitativa dependem diretamente da qualidade e quantidade dos dados disponíveis, pelo que esta abordagem é particularmente adequada em contextos onde exista um histórico consolidado de operação e falhas, bem como ferramentas de gestão de ativos informatizadas.

2.4.4 Princípios para a implementação do RBM

A RBM assenta num conjunto de sete princípios fundamentais, que estruturam a sua aplicação prática e orientam a tomada de decisão no âmbito da gestão de ativos, [43]:

1. A avaliação de risco, considerando simultaneamente a probabilidade de ocorrência e as consequências da falha, deve constituir o critério orientador principal das decisões de manutenção. Com base nesta avaliação, é possível priorizar intervenções, selecionar estratégias adequadas e otimizar recursos. Equipamentos de maior criticidade devem, assim, ser alvo de manutenção mais frequente e rigorosa.

2. A RBM é concebida como um programa de manutenção abrangente, que integra tanto estratégias de manutenção corretiva como de manutenção preventiva. Adicionalmente, incorpora abordagens específicas por tipo de equipamento, como a integridade funcional para elementos de barreira técnica, a inspeção baseada no risco para equipamentos de processo estáticos, e ainda a manutenção centrada na fiabilidade e baseada na condição para equipamentos de produção.

3. Trata-se de um programa de manutenção ajustável, desenvolvido em conformidade com a estratégia e política global da organização, incluindo objetivos de segurança, ambiente, produção e controlo de custos.

4. A RBM é estruturada como um programa cíclico, no qual o fluxo de dados percorre todo o ciclo de gestão da manutenção: desde as estimativas iniciais, passando pelo registo de intervenções, até à análise dos resultados e à geração de conhecimento que alimenta o processo de melhoria contínua.

5. É também um programa orientado pela aprendizagem contínua, transformando dados históricos e experiências operacionais em melhorias práticas e conhecimento técnico.

6. A RBM adota uma abordagem proativa, incentiva a realização de análises de desde a fase de projeto, com o objetivo de identificar causas, mecanismos e modos de falha, e permitir o desenvolvimento de ativos mais robustos, mantendo critérios de redundância, facilidade de manutenção e suporte técnico adequado.

7. Por fim, trata-se de um programa baseado em funções e requisitos operacionais, que permite modificações e atualizações ao longo do tempo, garantindo flexibilidade e adaptabilidade às exigências do ciclo de vida dos ativos.

2.5 FMECA

2.5.1 Origem da FMECA

A origem da metodologia FMECA (*Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*) remonta à década de 1950, no contexto militar dos Estados Unidos, tendo como principal objetivo a melhoria da fiabilidade dos sistemas de armamento. A primeira formalização do método ocorreu com a publicação do documento MIL-P-1629, em 1949, intitulado “*Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*”, o qual estabelecia diretrizes para a identificação de modos de falha, os respetivos efeitos e a criticidade associada. A metodologia foi inicialmente aplicada em sistemas militares, com vista à classificação das falhas em função do seu impacto na segurança dos operadores, na integridade dos equipamentos e no sucesso das missões [49].

Durante a década de 1960, a FMECA foi adotada de forma sistemática pela NASA, tendo sido integrada em diversos programas espaciais, tais como Apollo, Viking, Voyager, Magellan e Galileo. Nestes projetos, tornou-se essencial garantir a fiabilidade de componentes que não poderiam ser sujeitos a manutenção após o lançamento. A formalização do seu uso no setor aeroespacial surgiu em 1966, com a definição de procedimentos específicos orientados para a eliminação de falhas críticas que pudessem comprometer a segurança da tripulação e a viabilidade da missão [49] [50] [51].

Paralelamente, a metodologia começou a ser incorporada na aviação civil. Em 1967, a *Society for Automotive Engineers* (SAE) publicou o documento SAE ARP926, a primeira norma a tratar especificamente da aplicação da FMECA ao setor aeronáutico civil. Este esforço resultaria, posteriormente, na publicação de outras normas de referência, como a SAE ARP4761, que estabelece diretrizes integradas para a utilização da FMEA e de outras técnicas de análise de segurança em sistemas aeronáuticos.

A padronização da metodologia ocorreu em 1980, com a publicação da norma militar MIL-STD-1629A, que substituiu os documentos MIL-STD-1629 (1974) e MIL-STD-2070 (1977). Esta norma definiu, de forma sistemática, os requisitos e procedimentos aplicáveis à realização da FMECA, abrangendo desde a identificação de modos de falha até à avaliação dos seus impactos na missão, segurança, desempenho e manutenção. Apesar de formalmente revogada em 1998, a MIL-STD-1629A continua a ser amplamente utilizada em contextos militares e aeroespaciais, devido à sua relevância prática [49] [52].

No domínio das normas civis e internacionais, a International Electrotechnical Commission (IEC) publicou, em 1985, a IEC 812, posteriormente atualizada para IEC 60812, a qual se tornou a principal referência global para a aplicação da FMEA e da FMECA em engenharia

de sistemas. O *British Standards Institute* (BSI) contribuiu igualmente para a disseminação da metodologia, com a publicação da norma BS 5760-5, em 1991, [50].

Com o avanço dos sistemas de gestão da qualidade, a FMEA ganhou maior relevância. A introdução da norma ISO 9000, em 1988, incentivou as organizações a implementar abordagens preventivas na gestão da qualidade, nas quais a FMEA se inseria como ferramenta central. A norma QS-9000, desenvolvida especificamente para a indústria automóvel, passou a exigir a sua aplicação no contexto do Planeamento Avançado da Qualidade do Produto (APQP), [53].

Em 1993, a Automotive Industry Action Group (AIAG) publicou um manual específico para aplicação da FMEA no setor automóvel, o qual foi complementado, em 1994, pela norma SAE J1739, que passou a fornecer orientações detalhadas para a realização de FMEAs em atividades de conceção, produção e montagem. Este documento resultou da colaboração entre os principais fabricantes automóveis norte-americanos e os seus fornecedores, e teve como objetivo harmonizar práticas e reforçar a fiabilidade dos produtos [51].

Atualmente, a FMECA encontra-se amplamente consolidada como uma das metodologias mais eficazes para a avaliação de riscos e a gestão da fiabilidade de sistemas complexos. A sua aplicação é transversal a diversos setores críticos, incluindo o aeroespacial, automóvel, energia, defesa, saúde e nuclear, onde a mitigação de falhas e a segurança operacional assumem carácter prioritário [50].

2.5.2 FMECA

A Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade, constitui uma metodologia estruturada e sistemática de identificação, avaliação e priorização de falhas potenciais em sistemas técnicos e organizacionais. Esta abordagem tem como finalidade principal reforçar a fiabilidade e a segurança dos sistemas, antecipando falhas antes que estas ocorram, e propondo medidas corretivas ou preventivas para minimizar os seus impactos.

A FMECA combina duas análises distintas, a análise de modo de falha e efeitos (FMEA) e a análise de criticidade (CA). A FMECA vai além da FMEA tradicional ao incorporar uma avaliação da criticidade das falhas, classificando-as conforme a probabilidade de ocorrência e a gravidade das suas consequências [50]. A FMEA consiste numa abordagem ascendente (*bottom-up*), que parte da análise de funções específicas de componentes ou subsistemas, identificando modos de falha possíveis, as respetivas causas e os efeitos associados à ocorrência de tais falhas. Posteriormente, a CA classifica a criticidade dessas falhas com base na frequência estimada de ocorrência, severidade dos efeitos e facilidade de deteção, podendo recorrer tanto a dados empíricos como a julgamentos especializados [49].

Embora a metodologia possa ser aplicada a qualquer tipo de sistema, a sua utilidade revela-se particularmente evidente em contextos de elevada complexidade e criticidade operacional. Nestes cenários, a FMECA deve ser iniciada assim que existam dados preliminares de projeto, mantendo-se como um documento dinâmico e evolutivo, atualizado à medida que novas informações se tornam disponíveis ao longo do ciclo de vida do sistema [49] [54].

Além do contributo direto para a fiabilidade e manutenibilidade do sistema, a FMECA

assume também um papel documental e de evidência formal no âmbito da gestão do risco. Em situações onde ocorram falhas com consequências severas, sejam danos materiais ou humanos, é comum que entidades seguradoras exijam documentação detalhada que comprove a existência de processos sistemáticos de mitigação de risco e de barreiras técnicas ou organizacionais [54].

Do ponto de vista metodológico, a FMECA adota uma perspectiva *bottom-up*, iniciando-se nos componentes mais elementares do sistema, com vista à análise das suas interações e propagação de falhas até aos níveis superiores. Para este efeito, diversas técnicas e modelos têm sido integrados à FMECA, tais como os diagramas de blocos de fiabilidade (RBD), as árvores de falhas, ou ainda modelos baseados em redes de Petri, [55].

É importante referir que, embora diferentes sistemas possam apresentar modos de falha semelhantes, como no caso de rolamentos, por exemplo os efeitos dessas falhas variam de acordo com a função desempenhada em cada sistema específico. Assim, a análise deve sempre ser contextualizada em função da operação real do sistema, assegurando que a criticidade atribuída reflète de forma precisa o impacto potencial de cada falha [56].

A simplicidade, flexibilidade e aplicabilidade transversal da FMECA fazem desta uma das ferramentas mais utilizadas na fase inicial de projetos de engenharia, permitindo uma avaliação precoce de riscos e a identificação de obstáculos críticos ao desempenho esperado do sistema [54]. Nas fases subsequentes, a análise é fundamental para a validação da confiabilidade dos componentes antes da sua produção e colocação em operação.

Ainda que o objetivo principal da FMECA não seja a redução de custos, a sua implementação sistemática contribui geralmente para melhorias operacionais e económicas, promovendo maior disponibilidade do sistema, menor tempo de inatividade e redução de custos associados à manutenção corretiva [49].

Análise de Criticidade

De acordo com a norma MIL STD 1629, a Análise de Criticidade é definida como um procedimento pelo qual cada modo de falha potencial é classificado segundo a influência combinada da gravidade dos seus efeitos e da probabilidade de ocorrência.

A Análise de Criticidade (CA) é fundamental para planear e concentrar esforços segundo um conjunto de prioridades, com o objetivo de reduzir o risco de falhas e assegurar que aquelas com maior risco recebam a atenção máxima. Para tal, a CA recorre tanto a métodos qualitativos como quantitativos [50].

Na abordagem qualitativa, o risco dos modos de falha é estimado com base na experiência de campo e no conhecimento específico do ambiente, avaliando fatores como a probabilidade de ocorrência, a gravidade dos efeitos e, eventualmente, a capacidade de deteção. Este método é especialmente útil quando não estão disponíveis dados precisos sobre as taxas de falha [50].

Por outro lado, a abordagem quantitativa baseia-se num método de cálculo que requer uma base de dados robusta para medir as taxas de falha e a probabilidade de ocorrência de cada modo de falha. Estes cálculos podem ser suportados por dados provenientes de fontes

confiáveis, análises de fiabilidade semelhantes ou normas específicas. Além disso, os dados de campo são cruciais para avaliar o desempenho do sistema, o que exige a implementação de sistemas de monitorização de alta qualidade para assegurar a fiabilidade da informação recolhida. Em suma, a seleção do método de avaliação da CA depende diretamente do nível e da qualidade dos dados disponíveis.

Analise de Risco RPN

O Número de Prioridade de Risco (NPR), ou do inglês *Risk Priority Number* (RPN), é um índice utilizado para quantificar e classificar a criticidade dos modos de falha, permitindo que se priorizem as ações de melhoria. Para o seu cálculo, avaliam-se três parâmetros:

Severidade (S): Indica a intensidade com que o modo de falha afeta o sistema, tabela 2.4.

Classificação	Critério
1	Efeito não detetável
2 a 3	Severidade Baixa: provoca leve perturbação na produção
4 a 6	Severidade Moderada: perturbação com perda de desempenho perceptível
7 a 8	Severidade Alta: perturbação elevada com perda de desempenho quase total
9 a 10	Severidade Muito Alta: potencial risco para a segurança e problemas de não conformidade

Tabela 2.4: Tabela dos níveis de severidade [57]

Probabilidade de Ocorrência (O): Reflete a frequência com que a falha se manifesta, tabela 2.5.

Classificação	Critério
1	Probabilidade Remota de Falhar
2	Frequência Muito Baixa: 1 vez a cada 5 anos
3	Pouco Frequente: 1 vez a cada 2 anos
4	Frequência Baixa: 1 vez por ano
5	Frequência Ocasional: 1 vez por semestre
6	Frequência Moderada: 1 vez por mês
7	Frequente: 1 vez por semana
8	Frequência Elevada: algumas vezes por semana
9	Frequência Muito Elevada: 1 vez ao dia
10	Frequência Máxima: várias vezes ao dia

Tabela 2.5: Tabela dos níveis de ocorrência [57]

Dificuldade de Detecção (D): Mede a capacidade de identificar o modo de falha antes que ele cause consequências, tabela 2.6.

Classificação	Critério
1	Detecção quase certa do modo de falha
2	Probabilidade muito alta de detetar o modo de falha
3	Alta probabilidade de detetar o modo de falha
4	Moderadamente alta probabilidade de detetar o modo de falha
5	Moderada probabilidade de detetar o modo de falha
6	Baixa probabilidade de detetar o modo de falha
7	Probabilidade muito baixa de detetar o modo de falha
8	Probabilidade remota de detetar o modo de falha
9	Probabilidade muito remota de detetar o modo de falha
10	Não é possível detetar o modo de falha

Tabela 2.6: Tabela dos níveis de deteção de falha [57]

Cada um desses parâmetros pode ser classificado numa escala de 1 a 10, sendo que valores mais elevados correspondem a maiores riscos. O RPN é então calculado pela multiplicação dos três valores:

$$RPN = SOD \quad (2.3)$$

Onde S é a severidade, O é a ocorrência e D, a detetabilidade.

Dessa forma, os modos de falha que obtêm um RPN mais elevado são considerados mais críticos, permitindo à empresa adotar estratégias específicas para eliminar ou mitigar as causas das falhas [51] [55].

2.5.3 Implementação da FMECA

A FMECA constitui uma metodologia sistemática amplamente utilizada na engenharia para identificar modos potenciais de falha em sistemas, processos ou produtos, avaliando os seus efeitos e a criticidade associada. O principal objetivo desta abordagem é apoiar a tomada de decisão no sentido de priorizar ações corretivas que visam a mitigação de riscos operacionais [58] [59].

A implementação da FMECA decorre de forma estruturada e sequencial, garantindo a abrangência da análise e a coerência dos resultados obtidos. As fases principais são as seguintes, [58][59][60]:

1. Definição do sistema - Nesta fase procede-se à caracterização do sistema em análise, identificando-se as suas funções internas, interfaces, limitações operacionais, bem como os critérios que definem o seu eventual insucesso funcional.

Aplicação da Metodologia FMECA na DS Smith

2. Análise funcional - Realiza-se uma descrição detalhada das atividades operacionais e das interdependências entre entidades funcionais. Esta análise é essencial para compreender o modo de funcionamento do sistema em diferentes estados operacionais.

3. Identificação dos potenciais modos de falha - Os modos de falha correspondem às formas pelas quais um componente, subsistema ou processo pode não cumprir a sua função prevista. A identificação destes modos envolve igualmente o levantamento das suas causas e efeitos.

4. Caracterização dos efeitos e das causas de falha - Para cada modo de falha, devem ser definidos os efeitos associados, em diferentes níveis do sistema, e identificadas as suas causas prováveis, de forma clara e exaustiva.

5. Avaliação da severidade (S) - A severidade representa o impacto potencial de uma falha caso esta ocorra. A sua avaliação é normalmente feita através de uma escala ordinal de 1 a 10, sendo 10 correspondente ao impacto mais grave.

6. Avaliação da ocorrência (O) - Este parâmetro mede a probabilidade ou frequência com que um modo de falha pode ocorrer. Tal como a severidade, pode ser quantificado numa escala de 1 a 10.

7. Avaliação da deteção (D) - A deteção refere-se à capacidade de identificar a falha antes que esta origine consequências adversas. Uma pontuação mais elevada indica menor capacidade de deteção.

8. Cálculo do número de prioridade de risco (RPN) - O RPN é obtido através do produto dos três parâmetros anteriores RPN. Este valor permite hierarquizar os modos de falha por ordem de criticidade, orientando os esforços de mitigação.

9. Priorização dos modos de falha - Uma vez calculado o RPN para cada modo de falha, procede-se à sua ordenação por ordem decrescente de risco. Com frequência, verifica-se que uma minoria dos modos de falha é responsável pela maioria do risco total, sendo, por isso, alvo prioritário de intervenção.

10. Definição de ações de melhoria - Nesta fase são propostas medidas corretivas ou preventivas que permitam eliminar, mitigar ou detetar antecipadamente os modos de falha mais críticos. A redução da ocorrência pode ser conseguida com melhorias ao nível do projeto, enquanto a deteção pode ser reforçada através da introdução de mecanismos de monitorização e controlo.

11. Reavaliação do RPN após a implementação das medidas - Após a aplicação das ações corretivas, deve ser efetuada uma nova avaliação dos parâmetros S, O e D, e consequentemente do RPN. Esta reavaliação permite quantificar os efeitos das medidas adotadas. Tipicamente, espera-se uma redução significativa dos valores iniciais.

2.5.4 Benefícios e Limitações

Como qualquer ferramenta de apoio à decisão, apresenta benefícios relevantes, mas também limitações e críticas metodológicas, [52][59][60].

Benefícios da FMECA

A implementação da FMECA contribui significativamente para a melhoria da fiabilidade, segurança e desempenho de produtos, processos e sistemas. Entre os principais benefícios identificados destacam-se os seguintes:

- Melhoria de produto e processo: a FMECA permite detetar falhas em fases precoces do desenvolvimento, possibilitando a sua mitigação ainda em fase de conceção, o que resulta em produtos mais fiáveis, seguros e de maior qualidade.

- Redução de custos e desperdícios: a identificação antecipada de modos de falha contribui para a redução do tempo de desenvolvimento, minimização de custos de reformulação do projeto, de garantias e de desperdícios em processos produtivos, alinhando-se com os princípios da filosofia Lean.

- Aumento da satisfação do cliente: produtos mais fiáveis e seguros promovem maior satisfação e fidelização dos clientes, além de reforçarem a imagem e a competitividade da organização.

- Suporte à tomada de decisão técnica: a metodologia fornece dados estruturados que facilitam a definição de prioridades de intervenção, desenvolvimento de planos de controlo, estratégias de manutenção, requisitos de ensaio e análise de crescimento da fiabilidade.

- Apoio a atividades complementares: os dados e conhecimentos obtidos através da FMECA são úteis no desenvolvimento planos de manutenção, planos de testes automáticos (*built-in test*) e procedimentos de identificação e correção de falhas.

Limitações da FMECA

Apesar das suas claras vantagens, a FMECA apresenta também limitações práticas e críticas metodológicas, que devem ser consideradas na sua aplicação:

- Elevado esforço de implementação: o processo de construção de uma FMECA é geralmente extenso e intensivo em recursos humanos e técnicos, exigindo a participação de equipas multidisciplinares com profundo conhecimento dos sistemas analisados.

- Excesso de cenários irrelevantes: a metodologia pode identificar múltiplos cenários de falha que, na prática, têm pouca ou nenhuma relevância operacional, que levam ao risco de dispersão da análise.

- Volume elevado de dados e complexidade de gestão: a análise pode tornar-se difícil de gerir caso não exista uma relação clara entre causas, efeitos e modos de falha. A complexidade do sistema pode comprometer a objetividade e a eficácia da análise.

- Limitações na cobertura de falhas: a FMECA, normalmente não abrange falhas relacionadas com erro humano.

- Críticas metodológicas ao cálculo do RPN:

- o Os três parâmetros que compõem o RPN são considerados com igual peso, o que nem sempre reflete a realidade do risco.

- o Pequenas variações num dos parâmetros podem provocar grandes oscilações no RPN final, comprometendo a coerência da priorização.

- o A avaliação dos parâmetros pode ser subjetiva, especialmente quando não há dados históricos disponíveis ou quando há divergências entre especialistas.

3

Caso de Estudo

3.1 Enquadramento

O presente caso de estudo desenvolve-se no contexto da aplicação da metodologia RCM a uma área funcional crítica do processo industrial da DS Smith, concretamente à subzona V022-05, Filtragem e Alimentação das Lamas ao Forno, inserida na zona V022, Caustificação e Forno da Cal. Esta zona, pertencente à unidade de recuperação química, representa uma área relativamente recente na fábrica, o que proporciona condições favoráveis para a implementação de uma análise estruturada.

Neste âmbito, a ferramenta FMECA foi integrada como suporte fundamental ao processo de tomada de decisão no RCM, permitindo identificar, avaliar e priorizar modos de falha com base na sua criticidade. A seleção desta área como piloto justifica-se pela sua relevância operacional, complexidade técnica e potencial de impacto na continuidade produtiva, prevendo-se ainda que os resultados obtidos possam ser replicados noutras zonas da instalação industrial, contribuindo para a disseminação de boas práticas de manutenção centradas na fiabilidade.

3.2 Processo Produtivo

A produção de papel envolve uma série de processos complexos e interligados que vão desde a preparação da matéria-prima, madeira, até à recuperação química. Este processo é essencial para o fabrico de papéis de alta qualidade, destinados à indústria de embalagens de cartão canelado.

A matéria-prima utilizada no processo é, essencialmente, madeira de pinho, recebida em várias formas, rolaria com e sem casca, aparas e costaneiras de serração, complementada com madeira de eucalipto. A capacidade de armazenamento da fábrica é de cerca de 250.000 esterres. A madeira é descascada, lavada e reduzida a aparas pequenas, que são crivadas para separar os finos e a serradura, sendo depois enviadas pneumáticamente para as pilhas de aparas. A dosagem da madeira é feita por transportadores de correntes e balanças contínuas. A casca e a fração rejeitada na crivagem são trituradas e, juntamente com biomassa proveniente do exterior,

enviadas para a caldeira de biomassa, onde são queimadas para a produção de vapor.

As aparas provenientes das pilhas são crivadas por espessuras e, em seguida, transportadas para o digestor. A pasta é produzida pelo processo Kraft ao sulfato, num digestor contínuo *Kamyr* de alta pressão, 70 metros de altura e 1290m³ de capacidade volumétrica., utilizando lixívia à base de soda cáustica e sulfureto de sódio. Após o cozimento, a pasta é lavada em contracorrente no próprio digestor, depois de descarregada a pasta é desfibrada e refinada a quente em refinadores de disco. A classificação da fibra é feita por crivagem, e a lavagem é processada em filtros rotativos de vácuo e numa prensa, alcançando uma consistência de 30%. A pasta final é armazenada com 12% de consistência.

Na fase seguinte, na preparação de pasta, a partir das torres de alta consistência a pasta é diluída e enviada para os circuitos separados de preparação das duas camadas que constituem a folha de papel, camada de base e cobertura. Nesta fase, as operações mais importantes são a refinação e a adição de alguns produtos químicos para conferir características de resistência ao papel. A pasta da camada de base é adicionada pasta de fibra secundária proveniente da instalação de reciclagem de papel velho. Seguidamente, a pasta sofre uma forte diluição nas bombas de mistura, após o que é crivada e enviada para as caixas de chegada da máquina de papel.

A capacidade de produção de papel da fábrica pode chegar a 70 toneladas por dia. O papel é formado por duas camadas, sendo a camada base lançada sobre a teia que roda sobre a mesa de formação inferior, e a camada de cobertura lançada num formador superior. A junção das camadas ocorre sobre na mesa de base a cerca de um terço do seu final. A drenagem da água é realizada por gravidade e vácuo, obtido através de “*foils*” e de caixas de sucção. Em 2009, foi instalado um *Topformer* que aumentou a capacidade de drenagem, permitindo aumentar a velocidade da máquina para 1100 m/min.

Após a formação, o papel passa por prensas que removem parte da água, sendo transferida para os feltros. A folha segue depois para a secção de secagem, composta por 72 cilindros aquecidos a vapor, reduzindo a humidade do papel a 8%. Após a secagem, o papel é refinado para obter um acabamento de alta qualidade e enrolado em carretéis de 3,2 metros de diâmetro. O controlo automático do ritmo de produção, da humidade e da gramagem é feito através de um sistema de controlo de Qualidade Honeywell Experion Mx, com testes imediatos no laboratório de controlo local que utiliza um sistema automático Autoline para ensaio das mais importantes propriedades de papel.

Terminando, o papel é transferido para uma bobinadora com uma capacidade de enrolamento de 2300 m/min, com controlo automático da tensão e da dureza das bobinas, sendo cortado conforme as especificações dos clientes. A produção é planificada por um sistema ERP, o *Optivision*, que faz a gestão as encomendas, dos programas da máquina de papel e da comunicação com os equipamentos da linha de acabamentos.

Na recuperação química, figura 3.1, a lixívia negra extraída do digestor, com 14% de sólidos, é concentrada até 68% numa bateria de evaporadores de 6 efeitos e num concentrador de lamelas, com capacidade de evaporação de 150 t-água/h. A lixívia concentrada é misturada com sulfato de sódio e sólidos recuperados do electrofiltro, antes de ser queimada numa cal-

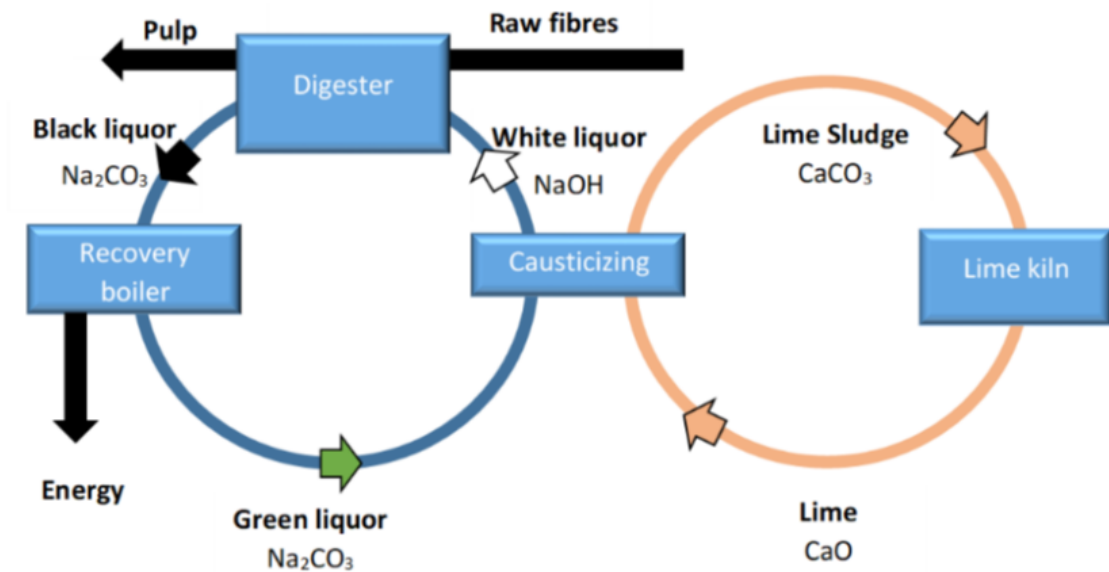


Figura 3.1: Diagrama de recuperação química com ciclo de lixívia e cal. Fonte: documento interno.

deira de recuperação, que tem capacidade para queimar 700 t-sólidos/dia. Durante a queima, são produzidos vapor de alta pressão e recuperados sais inorgânicos, que são recolhidos no tanque de "smelt".

A lixívia verde resultante da dissolução com lixívia branca fraca é transformada em lixívia branca para o cozimento, através de uma reação de caustificação, com controlo automático do grau de caustificação realizado por um sistema Kemotron. A capacidade da instalação é de 1300 m³/dia de lixívia branca. Para manter o índice de sulfuridade da lixívia, adiciona-se controladamente carbonato de sódio e/ou soda cáustica. As lamas de carbonato de cálcio formadas na reação são calcinadas num forno rotativo, com uma capacidade produção de 130 t-cal/dia para regenerar a cal necessária à caustificação, com a adição de uma pequena quantidade de calcário moído para compensar as perdas no processo.

Sustentabilidade e Eficiência de Recursos

A reciclagem de papéis recuperados tem como objetivo aproveitar as fibras celulósicas de papéis e cartões usados para a produção de novos papéis, contribuindo para a conservação de recursos naturais, energéticos e para a proteção do ambiente, além de reduzir os resíduos sólidos urbanos. A instalação de processamento de papéis velhos tem capacidade para produzir 450 toneladas de pasta seca por dia.

As principais operações incluem desfibrção, crivagem, depuração e espessamento da pasta. Na desfibrção, os papéis são submetidos a forte turbulência para separar as fibras, que removem também arames e materiais estranhos. A crivagem separa as partículas maiores que as fibras, com o uso de crivos de pressão com furos de 2,6 mm para crivagem grossa e ranhuras de 0,15 mm para crivagem fina. A depuração elimina partículas pesadas e leves, com

o uso de depuradores centrífugos. Por fim, a pasta é espessada e armazenada em torres de alta consistência.

A fábrica tem investido em tecnologias de ponta para otimizar a gestão de energia, vapor e água, visando uma operação mais sustentável e eficiente. A maior parte do vapor utilizado na produção é gerada pela Caldeira de Recuperação, que queima a lixívia negra do processo, produzindo 106 toneladas de vapor por hora. Além disso, a caldeira de biomassa, instalada em 2006, queima resíduos de madeira, casca, materiais provenientes da reciclagem de papéis velhos e outros resíduos, com uma capacidade de 42,5 toneladas de vapor por hora. Em 2005, foi implementado um sistema de cogeração a gás natural (CHP I), composto por uma turbina de 30,3 MW e uma caldeira recuperativa, permitindo a produção de vapor em dois níveis de pressão, além da geração de energia elétrica excedente, que passou a ser comercializada.

A produção de vapor originada por essas caldeiras alimenta um turbogerador de 26,5 MW, que distribui o vapor para o processo fabril em diferentes pressões. Em 2010, foi implementado um segundo ciclo combinado a gás natural (CHP II), que contribui com uma turbina de 30,3 MW e gera mais vapor e eletricidade.

A água utilizada no processo é captada do Rio Lima, tratada e reutilizada para refrigeração e outros processos internos, com a água excedente sendo resfriada em torres de refrigeração. A fábrica também mantém uma subestação elétrica externa para suprir as necessidades energéticas, com a capacidade de injetar eletricidade excedente na rede nacional.

A DS Smith Energia Viana é a responsável pela produção e comercialização de energia elétrica e térmica para a unidade industrial, sendo uma parte crucial do processo de cogeração.

Este processo integrado de produção de papel é um exemplo de como a indústria pode alinhar eficiência, controlo de qualidade e sustentabilidade ambiental. O uso de fibras recicladas, a recuperação de químicos e energia, e o controlo rigoroso de parâmetros de produção não só asseguram a qualidade do produto final, como também minimizam os impactos ambientais. Com esta abordagem, a indústria é capaz de satisfazer a crescente demanda por embalagens mais ecológicas, sem comprometer os padrões de desempenho exigidos pelo mercado.

3.3 Equipamentos a estudar

3.3.1 *Lime Mud Drum Filter*

O Filtro de Lamas é um filtro de vácuo com tambor rotativo, utilizado no processo de lavagem e desidratação da lama de cal. A filtração ocorre através da pressão negativa gerada por uma bomba de vácuo, que suga o líquido através da camada de pré-revestimento e da tela filtrante, separando os sólidos. O filtrado passa pela tubagem interna até um separador de filtrado, enquanto a lama de cal acumulada no tambor é removida por lâminas raspadoras (*doctor blades*).

A lama de cal em suspensão é bombeada para o tanque do filtro. Os sólidos acumulam-se no tambor rotativo, enquanto o líquido passa juntamente com o ar através da camada de pré-

revestimento e da tela filtrante, percorrendo a tubagem interna até ao separador de filtrado. A lama de cal deposita-se sobre o pré-revestimento e, durante a rotação do tambor, é lavada com água quente ao passar pelos chuveiros de lavagem (*cake wash showers*).

À medida que o tambor gira, a lama de cal é desidratada pelo ar que a bomba de vácuo suga através do filtro. A lama de cal lavada e desidratada é então removida por lâminas raspadoras (*doctor blades*), que estão fixadas à mesa raspadora no outro lado do tanque do filtro. A lama de cal cai então sobre um transportador, que a transfere para o alimentador do forno de cal (*kiln feed screw*). Alternativamente, a lama de cal pode ser descarregada através de uma calha para uma área de despejo ou contentor.

Para garantir e prolongar a vida útil do tambor do filtro, o nível do tanque é mantido sob controlo através de um sistema de controlo de nível. Para evitar vaporização indesejada na tela filtrante, o mesmo licor utilizado para controlar o nível no tanque é também utilizado para arrefecer o fluxo de alimentação. A água quente é resfriada por água de arrefecimento fria antes de entrar no fluxo de alimentação do filtro.

O sistema de renovação da camada de pré-revestimento do tambor (*Drum Precoat Renewal System*) garante o funcionamento contínuo do filtro, ao renovar a camada de pré-revestimento e limpar a tela filtrante com água de alta pressão. Este sistema é composto por uma mangueira com suportes de bicos pulverizadores, onde um bico remove a camada de pré-revestimento antiga e o outro bico limpa a tela filtrante. A mangueira move-se a uma velocidade variável, controlada por uma unidade motriz externa ao filtro.

O filtro de lamas é composto pelos seguintes componentes principais:

- Tanque com agitador do tipo berço e redutor de engrenagens
- Tambor com tubagens internas ligadas a uma saída de filtrado e um redutor de engrenagens
- Redutor de engrenagens para acionamento principal e agitador
- Grelhas de suporte em polipropileno e tela filtrante
- Mesa raspadora com lâminas raspadoras (*doctor blades*)
- Coletor de lavagem (*cake wash header*)
- Sistema de renovação da camada de pré-revestimento do tambor, responsável por renovar a camada de pré-revestimento e lavar a tela filtrante durante a operação
- Filtro duplo antes da bomba de alta pressão, que garante que a tela filtrante não seja danificada por partículas
- Unidade de lubrificação
- Capota de proteção

Além disso, o sistema do filtro inclui:

- Separador de filtrado
- Unidade de bomba de vácuo
- Transportador de lama de cal
- Ventilador

3.3.2 Bomba de Vácuo de Anel Líquido

As bombas de vácuo de anel líquido são equipamentos amplamente utilizados em processos industriais que exigem a criação e manutenção de ambientes de vácuo. O seu princípio de funcionamento baseia-se na rotação de um rotor excêntrico dentro de um corpo preenchido parcialmente com um líquido de vedação (geralmente água ou outro líquido compatível com o processo). À medida que o rotor gira, o líquido forma um "anel" que veda as câmaras de compressão entre as pás do rotor e o corpo da bomba. Essa configuração permite a compressão e a remoção contínua de gases e vapores do sistema, produzindo o vácuo necessário para o processo.

Uma das principais vantagens das bombas de anel líquido reside em sua robustez, simplicidade construtiva e capacidade de operar com gases húmidos e contaminados, que seriam problemáticos para outras tecnologias de produção de vácuo. Além disso, apresentam baixo nível de vibração e operação relativamente silenciosa, tornando-se ideais para aplicações exigentes e contínuas.

No contexto da presente tese, a bomba de vácuo de anel líquido em estudo é o modelo NASH 2BE, uma bomba de grande capacidade projetada especificamente para aplicações industriais de alta demanda, como as indústrias de papel e celulose, química, mineração e produção de energia.

Este modelo representa uma evolução em relação aos modelos anteriores da série 2BE da NASH, pois oferece uma eficiência energética aprimorada (melhorias de até 6 a 8%), maior fiabilidade operacional e facilidade de manutenção. A capacidade operacional da bomba 2BE varia de 1.950 a 32.100 m³/h, permitindo que ela atenda tanto a aplicações de médio porte quanto a sistemas industriais de grande escala.

Características técnicas e operacionais

O modelo NASH 2BE apresenta uma série de características que justificam a sua adoção em ambientes industriais exigentes:

- Função 2 em 1: Atua simultaneamente como bomba de vácuo e compressor;
- Capacidade de vácuo dividido;
- Alta robustez e baixa manutenção;
- Revestimento anticorrosivo;
- Flexibilidade de instalação;
- Operação silenciosa.

3.3.3 Secador *Flash* (*Flash Dryer*)

O *Flash Dryer* é um sistema de secagem amplamente utilizado na indústria de celulose e papel, projetado para remover rapidamente a humidade da fibra de celulose por meio de um fluxo controlado de ar quente. O *Flash Dryer* usa um princípio de secagem em suspensão: as fibras húmidas são introduzidas em um fluxo de ar de alta velocidade e elevada temperatura, o que permite uma transferência de calor extremamente eficiente e uma rápida redução do teor

de humidade.

Entre os equipamentos comerciais disponíveis no mercado, destaca-se o *Flash Dryer* da Valmet, que representa uma solução técnica avançada e energeticamente eficiente para a secagem de fibras tanto mecânicas quanto químicas. Este sistema oferece uma alternativa de investimento mais econômica em comparação com as linhas tradicionais de secagem, apresentando vantagens significativas em termos de flexibilidade, eficiência e custos operacionais.

Projetado para se adaptar facilmente a layouts industriais já existentes, o *Flash Dryer* da Valmet permite a instalação de grande parte de sua estrutura em ambientes externos, inclusive em regiões sujeitas a condições climáticas adversas. Sua operação é altamente automatizada, com sistemas de controle avançados (*APC - Advanced Process Control*) que garantem uma inicialização automática e um funcionamento estável, exigindo uma intervenção mínima.

Do ponto de vista operacional, o sistema destaca-se por sua alta fiabilidade: parâmetros críticos como temperatura e pressão são rigorosamente monitorizados e controlados em todas as etapas do processo, assegurando uma secagem homogênea e consistente. Além disso, o projeto incorpora tecnologias de recuperação de energia, como a reutilização do ar de secagem e a recuperação de calor a partir de ciclones, o que contribui para uma elevada eficiência energética e reduz significativamente o consumo específico de energia.

Outro aspecto relevante é o baixo custo de propriedade associado ao sistema. O *Flash Dryer* apresenta baixos requisitos de manutenção, perdas mínimas de fibra e uma área ocupada reduzida, o que resulta em uma solução de secagem altamente competitiva ao longo do ciclo de vida do equipamento.

3.4 Organização do Setor de Manutenção

A organização da manutenção da DS Smith encontra-se estruturada de forma funcional, conforme representado na figura 3.2. A área de manutenção contava, à data, com um total de 53 colaboradores, distribuídos por vários departamentos com funções diferenciadas e coordenados pela estrutura de gestão de manutenção.

A gestão de manutenção supervisiona quatro grandes áreas funcionais: o departamento de intervenção local, o departamento de engenharia de manutenção, o departamento de automação e a área das oficinas.

O departamento de intervenção local desempenha um papel central na estrutura da manutenção da unidade industrial, sendo responsável pela realização de intervenções de manutenção corretiva e de rotina nas áreas operacionais da fábrica. Este departamento é essencial para garantir a continuidade e a fiabilidade dos processos produtivos, intervindo diretamente nos equipamentos e infraestruturas sempre que ocorrem avarias ou são necessárias ações preventivas previamente planeadas.

É o departamento com o maior número de recursos humanos e conta com um total de 25 colaboradores, organizados em três grupos técnicos distintos. A área de mecânica é composta por 13 elementos, dos quais três exercem funções de supervisão e os restantes dez executam

MAINTENANCE ORGANIZATION CHART

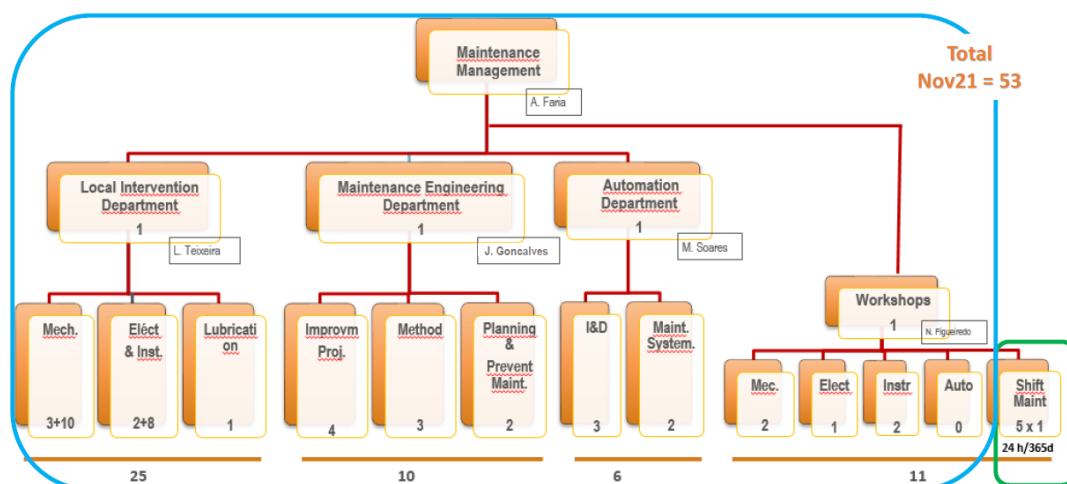


Figura 3.2: Organização do Departamento de Manutenção. Fonte: documento interno.

tarefas de carácter operacional. A área de eletricidade e instrumentação integra dez colaboradores, sendo dois responsáveis pela coordenação das atividades e oito técnicos. Por sua vez, a área de lubrificação é assegurada por um técnico especializado, exclusivamente dedicado à execução das rotinas de lubrificação dos equipamentos industriais.

Para além da intervenção direta, cabe também a este departamento planear, preparar e registar todas as atividades de manutenção corretiva e preventiva nas especialidades sob a sua responsabilidade. É igualmente da sua competência diagnosticar avarias e implementar melhorias com vista à eliminação das causas de origem, promovendo a fiabilidade e a eficiência dos ativos. Participa ainda na execução das ações previstas nos planos de inspeção e manutenção preventiva, garantindo o cumprimento das orientações técnicas e dos prazos definidos.

No que respeita às paragens programadas, o departamento é responsável pela sua preparação, execução, coordenação e supervisão também os serviços prestados por entidades externas durante os períodos de maior carga de trabalho. É igualmente responsável pela identificação e planeamento das intervenções a realizar durante as paragens programadas e/ou anuais, bem como pela supervisão da respetiva execução.

Adicionalmente, este departamento assegura a manutenção dos sistemas de lubrificação automática e coordena as equipas externas responsáveis pelas rotinas de lubrificação. Compete-lhe também a coordenação dos serviços subcontratados de limpeza industrial e apoio operacional, bem como a gestão de pequenos projetos de investimento e a participação em projetos de maior dimensão no âmbito das respetivas especialidades técnicas.

O departamento de engenharia de manutenção tem como principal missão assegurar o planeamento estratégico, a normalização de processos e a melhoria contínua das atividades de manutenção, contribuindo para a fiabilidade, segurança e eficiência dos ativos da unidade industrial. Este departamento é composto por uma equipa multidisciplinar de dez colaboradores, distribuídos por três áreas funcionais: 4 colaboradores nos projetos, 3 nos métodos, e 2 no

planeamento e manutenção preventiva.

Entre as suas principais responsabilidades encontra-se o desenvolvimento, gestão e atualização dos planos de manutenção preventiva, das inspeções associadas a requisitos legais e dos planos de lubrificação, assegurando a sua implementação eficaz e a sua otimização contínua. Paralelamente, compete-lhe alimentar e manter atualizada a estrutura funcional do sistema SAP, inserindo informação relativa a equipamentos existentes, novos equipamentos ou instalações, e garantindo a atualização da respetiva árvore de equipamentos.

O departamento define também os parâmetros de gestão da reserva em stock e presta apoio técnico ao departamento de compras na análise técnica de componentes e materiais. Realiza análises periódicas aos artigos em stock com baixa rotatividade, promove a sua eliminação sempre que aplicável, e organiza o inventário anual de peças de reserva. É igualmente responsável pela manutenção das bases de dados técnicas dos equipamentos industriais, incluindo desenhos, manuais, catálogos e outra documentação de apoio.

No contexto das paragens anuais programadas, o departamento de engenharia de manutenção tem a responsabilidade de planear e preparar as atividades a executar, bem como acompanhar os contratos de prestação de serviços, recolhendo e centralizando os relatórios provenientes dos respetivos responsáveis operacionais. Além disso, presta apoio técnico à equipa de intervenção local no diagnóstico de avarias e problemas complexos.

Este departamento assume ainda a responsabilidade pelo desenvolvimento de projetos de melhoria dos equipamentos e instalações existentes, desde a fase de conceção até à sua implementação. Participa também em projetos de investimento de maior dimensão, colaborando nas fases de desenvolvimento e execução técnica, dentro das especialidades de manutenção.

Ao nível da manutenção preditiva, é responsável pela configuração de equipamentos e parâmetros nos sistemas de monitorização, como por exemplo a análise de vibrações, pela recolha manual de dados e respetiva análise, com vista à identificação precoce de falhas e ao estudo das suas causas de origem.

Finalmente, este departamento coordena a implementação e dinamização de iniciativas de melhoria contínua, nomeadamente através da organização de planos de atividade relacionados com metodologias 5S e TPM (*Total Productive Maintenance*), promovendo uma cultura de excelência operacional e envolvimento das equipas.

O departamento de automação é responsável pela gestão e pelo suporte técnico aos sistemas automatizados da instalação industrial, assegurando o seu correto funcionamento, manutenção e desenvolvimento contínuo. Trata-se de uma área essencial para garantir a eficiência operacional, a fiabilidade dos processos de controlo e a sua permanente adaptação às exigências produtivas e tecnológicas. Este departamento é composto por seis colaboradores, distribuídos por duas áreas funcionais, investigação e desenvolvimento, e sistemas de manutenção.

A área de investigação e desenvolvimento, composta por três elementos, dedica-se à análise, conceção e implementação de soluções tecnológicas inovadoras, tendo como principais objetivos a modernização dos processos produtivos e a melhoria do desempenho dos sistemas de automação. Já a área de sistemas de manutenção é constituída por dois técnicos especia-

lizados, cuja principal missão é assegurar a operação, manutenção corretiva e preventiva dos sistemas de controlo e monitorização existentes na unidade industrial, incluindo plataformas como DCS (*Distributed Control System*), QCS (*Quality Control System*), PLC (*Programmable Logic Controller*), SIS (*Safety Instrumented System*), FC (*Field Controllers*), FF&D (*Fieldbus Foundation & Device*), sistemas de supervisão e robótica.

As responsabilidades deste departamento incluem a atualização permanente e a manutenção, tanto corretiva como preventiva, dos sistemas de controlo industrial, com vista a garantir elevados níveis de disponibilidade e desempenho. Compete-lhe também realizar estudos e propor melhorias orientadas para o aumento da funcionalidade e fiabilidade dos equipamentos e instalações, recorrendo, sempre que necessário, a modificações nos sistemas de automação.

O departamento de automação tem igualmente um papel ativo na adaptação dos sistemas de controlo às necessidades de produção, efetuando as alterações necessárias em função das exigências operacionais. Adicionalmente, supervisiona os contratos de manutenção relativos aos sistemas de controlo industrial, garantindo a qualidade e a conformidade técnica das intervenções externas.

Em articulação com os restantes departamentos da estrutura de manutenção, presta apoio à equipa de intervenção local no diagnóstico de avarias, através da análise de software de automação, e colabora com o departamento de engenharia de manutenção na implementação de novos projetos, nomeadamente em tudo o que respeita à componente de automação. Apoiar ainda a gestão de sobresselentes específicos da área de automação, assegurando a sua disponibilidade e adequação técnica.

Outra das suas atribuições consiste na substituição dos engenheiros eletrotécnicos da equipa de intervenção local sempre que necessário, garantindo a continuidade da resposta técnica nas áreas transversais. Por fim, o departamento é responsável pelo desenvolvimento e implementação de projetos de investimento associados a melhorias ou expansões dos sistemas de automação existentes na instalação industrial.

Esta diversidade de responsabilidades e competências torna o departamento de automação um elemento estratégico para a manutenção e evolução tecnológica da unidade industrial, assegurando uma integração eficiente entre os sistemas técnicos e os requisitos operacionais da produção.

A área das Oficinas constitui uma componente essencial da estrutura de manutenção, sendo responsável por assegurar o apoio técnico necessário às diferentes equipas de intervenção, nomeadamente através da execução de reparações, do recondicionamento de equipamentos e da realização de outros serviços especializados de suporte técnico. Esta área garante igualmente uma resposta imediata a avarias, contribuindo decisivamente para a continuidade e fiabilidade operacional da unidade industrial.

A equipa é composta por um total de onze colaboradores, distribuídos por diversas especialidades técnicas. Integra dois técnicos na área de mecânica, um técnico na área de eletricidade e dois técnicos na área de instrumentação. A este núcleo juntam-se ainda cinco técnicos dedicados à manutenção por turnos, que operam em regime de funcionamento contínuo de 24 horas por dia, durante os 365 dias do ano, assegurando assim, uma capacidade permanente de

resposta a falhas e ocorrências fora do horário normal de trabalho.

Entre as suas principais responsabilidades destaca-se a reparação de equipamentos danificados provenientes de todas as especialidades e zonas da instalação fabril, assegurando o registo destas intervenções no sistema SAP e a posterior devolução dos equipamentos ao stock. A área das Oficinas presta também apoio direto às equipas de intervenção local, realizando operações de reparação específicas e disponibilizando recursos e ferramentas técnicas especializadas sempre que necessário.

Adicionalmente, esta área pode assumir a responsabilidade pela execução de pequenos projetos de investimento, colaborando também em projetos de maior dimensão no âmbito das suas áreas técnicas. No que respeita à manutenção por turnos, os técnicos têm autonomia para intervir diretamente nas avarias e, sempre que a situação o justifique, ativar as equipas de prevenção para apoio suplementar.

A combinação entre capacidade técnica especializada, versatilidade funcional e elevada disponibilidade operacional confere à área das Oficinas um papel determinante no suporte à manutenção industrial, contribuindo para a estabilidade, segurança e eficiência da operação.

3.5 Metodologia

3.5.1 Seleção da área e seus limites

O trabalho concentra-se na análise detalhada da área designada V022-05, inserida no contexto mais amplo da zona V022, Caustificação e Forno da Cal, conforme a classificação estabelecida pelo SAP da DS Smith. O foco específico recai sobre a subzona V022-05, intitulada Filtragem e Alimentação das Lamas ao Forno. Para fins de organização e compreensão dos processos, a subzona V022-05 encontra-se subdividida em sete componentes funcionais principais, descritos a seguir:

- V022-05-01 – Unidade de Bombagem de Lamas para Filtro de Lamas
- V022-05-02 – Filtro de Lamas
- V022-05-03 – Unidade de Produção de Vácuo
- V022-05-04 – Unidade de Bombagem de Filtr. Lamas para Caixa Mistura
- V022-05-05 – Transportador de Lamas
- V022-05-06 – Alimentador de Lamas
- V022-05-07 – Secagem de Lamas

Uma FMECA pode tornar-se bastante complexa, dependendo da extensão da sua abrangência, como tal é necessário definir fronteiras do sistema, como apresentado na figura 3.3. Para simplificar, as ações de melhoria serão incidentes sobre os modos falhas mais problemáticos, sendo os menos problemáticos deixados para uma futura revisão da análise.

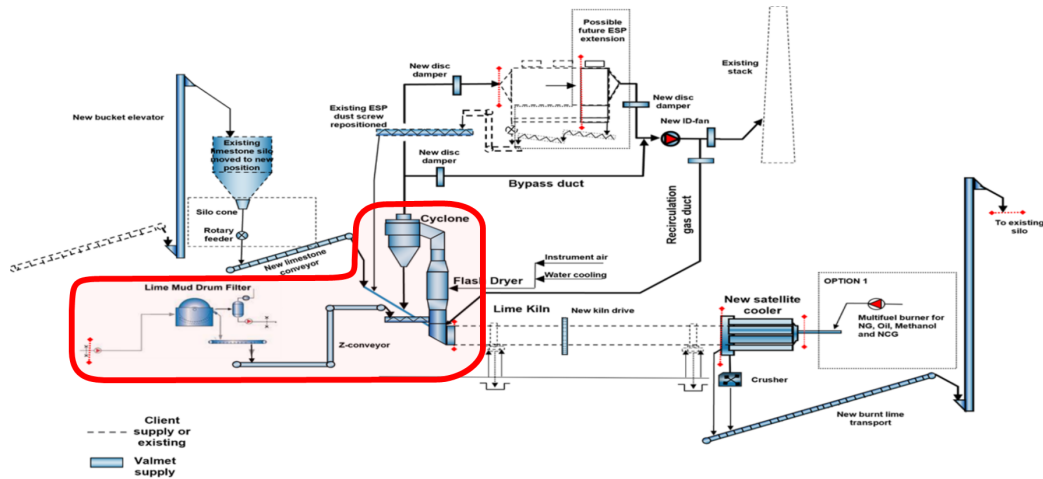


Figura 3.3: Limite do Sistema. Fonte: documento interno.

3.5.2 Levantamento e identificação dos equipamentos

O levantamento abrangeu 60 equipamentos principais, bem como as tubagens, e circuitos auxiliares relacionados às funções de aspiração, distribuição, descarga e transporte de água. Esses elementos estão distribuídos ao longo de sete componentes funcionais principais, os quais constituem a base operacional da área estudada.

A identificação dos ativos foi efetuada com base na base de dados SAP da organização, a partir da qual se extraiu a lista completa dos equipamentos, suas respectivas localizações. Isto permitiu um mapeamento físico e lógico da infraestrutura, essencial para o entendimento do comportamento dos sistemas e a avaliação de suas vulnerabilidades.

Para além do suporte documental obtido via SAP, a ferramenta Autodesk Navisworks teve um papel fundamental na identificação, localização e compreensão estrutural dos equipamentos na área funcional. Através da visualização tridimensional da instalação, foi possível localizar componentes como bombas de vácuo (Fig 3.4), filtros de lamas (Fig 3.5) ou mesmo sistemas mais complexos como o *Flash Dryer* (Fig 3.6). Esta representação facilitou não só a validação da informação técnica, mas também a interpretação espacial dos circuitos entre sub-sistemas (Fig 3.7), especialmente útil em zonas de acesso limitado ou elevada densidade de equipamento.

A integração entre as informações recolhidas digitalmente, via SAP e Navisworks, e a observação no terreno permitiu uma caracterização técnica mais robusta da área funcional, assegurando uma base sólida para as etapas seguintes da análise de criticidade e aplicação da metodologia FMECA.

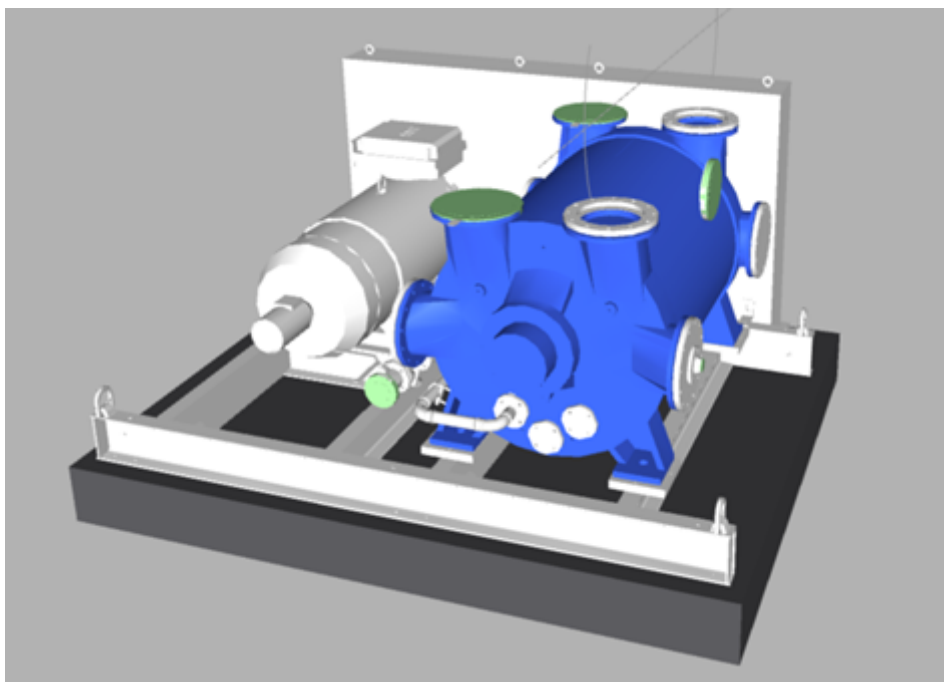


Figura 3.4: Modelo tridimensional da bomba de vácuo representado no Navisworks.
Fonte: documento interno.

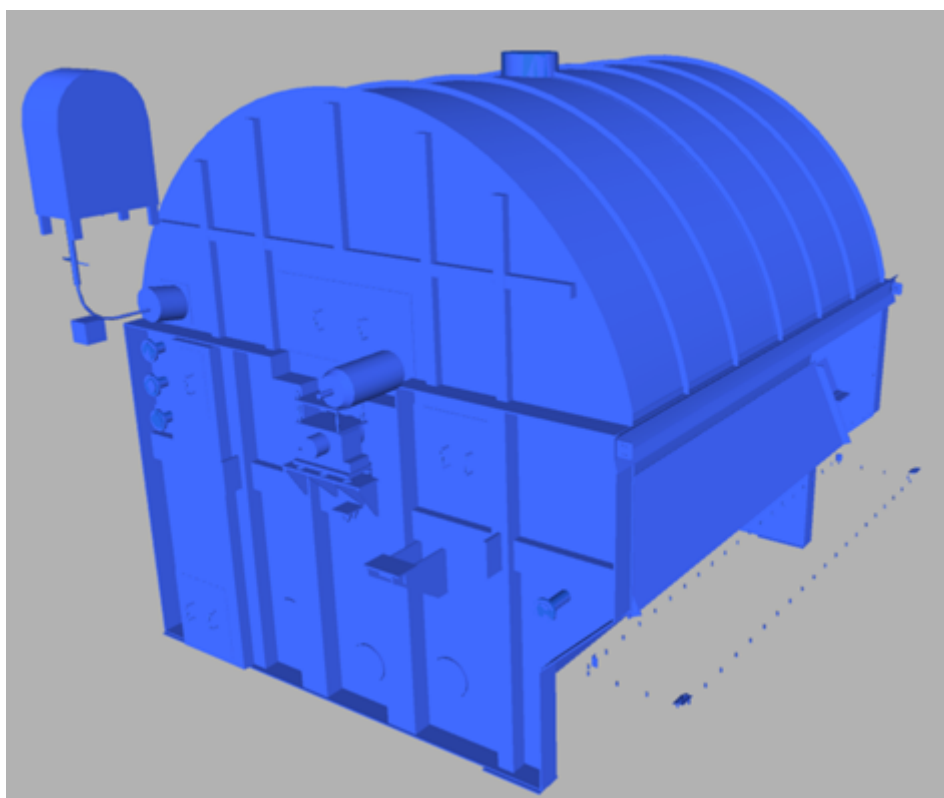


Figura 3.5: Modelo tridimensional do filtro de lamas representado no Navisworks.
Fonte: documento interno.

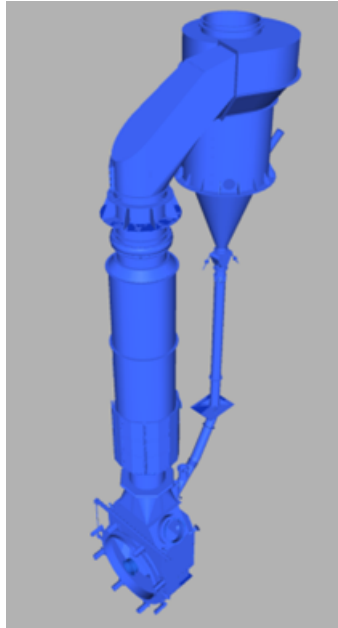


Figura 3.6: Modelo tridimensional do *flash dryer* representado no Navisworks. Fonte: documento interno.

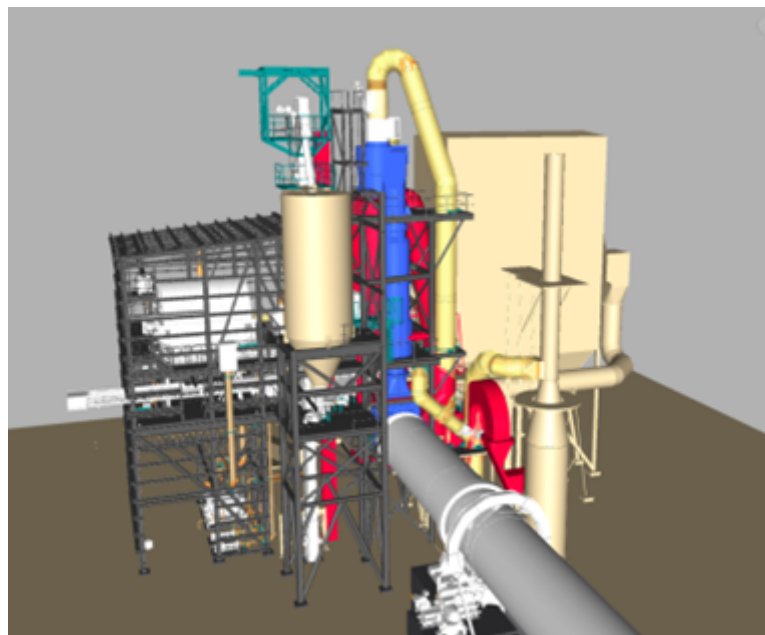


Figura 3.7: Modelo tridimensional da área funcional representado no Navisworks. Fonte: documento interno.

3.5.3 Definição de tabelas e critérios

Após a identificação e levantamento dos equipamentos, procedeu-se à definição dos critérios utilizados na avaliação da sua criticidade e risco. Para tal, foi realizada uma análise comparativa de diferentes modelos de avaliação de ativos previamente utilizados pela organização. Estes modelos, provenientes de outras unidades ou projetos internos, permitiram compreender as práticas em vigor e identificar fatores comuns relevantes.

Aplicação da Metodologia FMECA na DS Smith

Entre os exemplos analisados, a principal referência metodológica adotada foi o modelo "*Minimum Standard*" da DS Smith. Este modelo estabelece um conjunto estruturado de parâmetros, escalas e valores que orientam a avaliação da performance e criticidade dos equipamentos. No presente trabalho, os critérios definidos por este modelo foram integralmente mantidos, assegurando alinhamento com a norma corporativa.

Embora o conteúdo técnico, incluindo parâmetros, escalas e ponderações não tenha sido alterado, a sua organização foi adaptada para facilitar a aplicação prática e tornar a informação mais clara e operacionalmente útil.

Com base neste referencial, foram definidos quatro parâmetros fundamentais para a avaliação da criticidade de uma potencial falha, o meio ambiente, saúde e segurança, impacto na produção e custo de manutenção. Estes domínios refletem os principais eixos de impacto associados à falha de um equipamento, sendo utilizados como base para a construção do índice de criticidade.

Segundo a figura 3.8 a classificação de cada parâmetro foi realizada em quatro níveis, de 1 a 4, correspondentes a graus crescentes de criticidade: baixo, médio, alto e muito alto.

- O parâmetro meio ambiente avalia as consequências ambientais de uma falha, indo desde a ausência de impacto até à ocorrência de um evento ambiental grave, com violação de normas.
- Em saúde e segurança, o critério considera a gravidade do risco físico para os trabalhadores, desde situações sem ferimentos até incidentes com risco de vida ou morte.
- O impacto na produção tem em conta o tempo de indisponibilidade provocado por uma falha, classificado em função das horas de perda de produção, podendo variar entre, sem perda de produção e perda superior a 24 horas.
- Por fim, o critério custo de manutenção analisa o impacto económico associado à intervenção corretiva, este é segmentado por faixas de custo, desde valores inferiores a €5.000 até montantes superiores a €100.000.

Grau	Criticality index	Meio Ambiente	Saúde e Segurança	Impacto na Produção	Custo de Manutenção
1	Baixo	Sem consequências ambientais	Sem ferimento	Sem perda de produção	Menos de € 5000
2	Médio	Consequência internas	Ferimento Ligeiro	Menos de 3 horas de perda de produção	€ 5k - € 50k
3	Alto	Consequências externas	Acidente grave	3 - 24h perda de produção	€ 50k - € 100k
4	Muito Alto	Evento ambiental grave (violação de norma)	Lesão com risco de vida ou Morte	Mais de 24h de perda de produção	Mais de € 100k

Figura 3.8: Tabela de classificação dos parâmetros de severidade.

Após a atribuição dos valores individuais a cada um dos quatro parâmetros, foi aplicada uma lógica de decisão estruturada com o objetivo de determinar o índice de criticidade. Esta lógica baseia-se num conjunto de regras condicionais que avaliam simultaneamente a soma

total dos valores atribuídos aos parâmetros e os limites máximos individuais de cada critério.

O processo classifica os equipamentos em quatro categorias de criticidade desde baixa, média, alta e muito alta, consoante o grau de severidade combinado. Como ilustrado na figura 3.9, o modelo estabelece, por exemplo, que um equipamento só pode ser classificado com criticidade baixa se a soma dos quatro parâmetros for inferior ou igual a 4, e nenhum dos critérios de saúde, ambiente, produção ou custo ultrapassar o nível 2. À medida que estes valores aumentam, o modelo percorre novos níveis de decisão até à atribuição do grau muito alto, reservado para casos com valores críticos.

Esta abordagem permite uma análise equilibrada e contextualizada do risco, garantindo que a criticidade atribuída reflete não apenas a severidade total, mas também a presença de fatores isoladamente críticos.

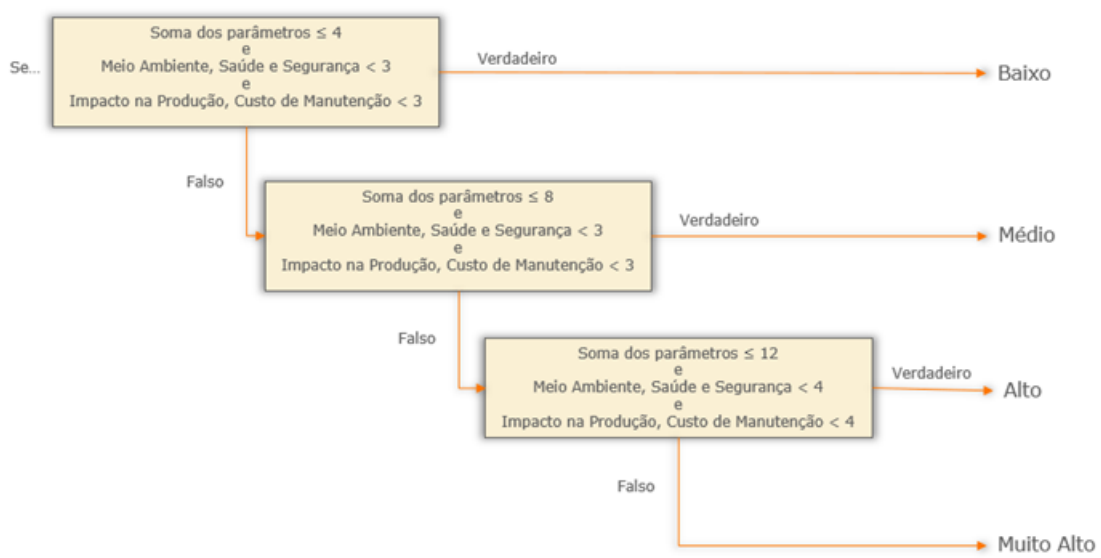


Figura 3.9: Esquema de decisão para a classificação do Índice de Criticidade.

Para além da severidade das falhas, a avaliação de risco considerou também a frequência de ocorrência, medida através do MTBF. Este indicador representa o tempo médio entre falhas de um determinado equipamento e permite quantificar a sua fiabilidade ao longo do tempo. Segundo a figura 3.10 a classificação do MTBF foi dividida em quatro níveis, nível 0 que correspondente a equipamentos com mais de três anos entre falhas, nível 1 para equipamentos com MTBF entre um e três anos, nível 2 entre seis meses e um ano e nível 3 correspondente a equipamentos que falham a cada seis meses ou menos.

Aplicação da Metodologia FMECA na DS Smith

Nível	MTBF
0	Mais de 3 anos
1	1 ano - 3 anos
2	6 meses - 1 ano
3	Menos de 6 meses

Figura 3.10: Tabela de classificação do MTBF.

Após a atribuição do índice de criticidade e da classificação do MTBF, ambas as variáveis foram cruzadas numa matriz de risco, fig 3.11. Esta matriz permitiu associar a consequência de uma falha à sua probabilidade de ocorrência, classificando o risco em quatro níveis, insignificante, moderado, severo e crítico, fig 3.12.

Estes níveis de risco foram representados graficamente através de uma escala de cores, do verde sendo insignificante ao vermelho sendo crítico, permitindo uma leitura rápida e objetiva dos resultados. A aplicação desta matriz possibilitou a priorização dos equipamentos que, apresentam maior risco, orientando assim a seleção dos ativos que requerem intervenção prioritária e análise aprofundada no âmbito da metodologia FMECA.

MTBF	3	M	S	C	C
	2	M	M	S	C
	1	I	M	S	C
	0	I	I	S	S
		Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
		Índice de Criticidade			

Figura 3.11: Matriz de risco.

Risco	
Insignificante	I
Moderado	M
Severo	S
Crítico	C

Figura 3.12: Tabela de classificação do risco.

Para além da frequência de falhas, foi considerado um conjunto de fatores operacionais que influenciam o impacto real de uma falha na produção, o que permite uma avaliação mais completa e alinhada com a realidade da operação. Estes fatores complementares refletem a capacidade da organização em responder a uma falha e mitigar os seus efeitos, sendo especialmente relevantes em contextos de produção contínua ou com recursos críticos. Os três critérios analisados foram a disponibilidade de peças de reposição, tempo médio de reparação (MTTR) e existência de redundâncias funcionais, figura 3.13.

Nível	Criticality index (Produção)	Disponibilidade de Peças de Reposição	MTTR	Existência de Redundâncias
0		Peça de reposição não disponível / tempo de entrega longo	Mais de 24 horas	Nenhuma unidade pode falhar sem efeito funcional
1		Peça de reposição não disponível / tempo de entrega curto	12 - 24 horas	
2		Peças de reposição disponíveis no local	4 - 12 horas	
3		Equipamento de reserva disponível no local	Menos de 4 horas	Uma unidade pode falhar sem efeito funcional

Figura 3.13: Classificação dos fatores operacionais que influenciam o impacto na produção.

A disponibilidade de peças de reposição refere-se à facilidade com que os componentes necessários para a reparação de um equipamento podem ser obtidos. Quanto maior for o tempo de espera por uma peça, maior o potencial de impacto negativo na produção. Assim, equipamentos cujas peças estão disponíveis no local (fábrica/armazém), ou que possuem unidades de reserva completas em armazém, representam menor risco operacional do que aqueles cuja reparação depende de fornecedores externos ou longos prazos de entrega.

O MTTR corresponde ao tempo médio necessário para restaurar a funcionalidade do equipamento após uma falha. Este valor pode variar significativamente consoante a complexidade do ativo, o tipo de intervenção necessária e os recursos disponíveis. Equipamentos com tempos de reparação superiores a 24 horas apresentam maior impacto, sendo considerados mais críticos neste parâmetro.

A existência de redundâncias representa a capacidade do sistema de manter o seu funcionamento mesmo perante a falha de um ou mais equipamentos. Sistemas redundantes permitem absorver falhas sem interrupção da produção, enquanto sistemas sem qualquer redundância são imediatamente afetados por qualquer avaria.

Por fim também foi considerado o critério de detetabilidade, que avalia a probabilidade de uma falha ser identificada antes de provocar consequências significativas no sistema. Este parâmetro, é particularmente relevante para determinar a capacidade preventiva de um sistema de manutenção ou monitorização. A classificação da detetabilidade foi organizada na mesma em quatro níveis, conforme apresentado na figura 3.14, nível 0 corresponde a situações em que a falha nunca é detetada antecipadamente, enquanto o nível 3 representa cenários em que a falha é sempre detetada. A inclusão da detetabilidade no modelo permite uma visão mais completa do risco, ao reconhecer que a possibilidade de antecipar uma falha pode ser tão crítica quanto a sua frequência ou gravidade.

Nível	Detetabilidade
0	Nunca
1	Poucas Vezes
2	Muitas Vezes
3	Sempre

Figura 3.14: Classificação da detetabilidade.

3.5.4 Recolha de dados históricos

Este estudo baseou-se na análise de dados históricos extraídos do sistema SAP, que abrangem um período de 24 anos, com registos compreendidos entre 02/10/2001 e 07/03/2025. Os dados dizem respeito, em particular, às notas, que são criadas para notificar um problema que ocorreu, e ordens de avaria, são essenciais para o planeamento detalhado de tarefas a executar num objetivo técnico, associadas à área dos equipamentos em análise, designada por V022-05. Estes registos são inseridos pelos operadores e contêm informações relevantes para a caracterização dos modos de falha.

Entre os dados disponíveis, encontra-se o número de identificação da nota e da ordem, a data do registo da ocorrência, a descrição da intervenção solicitada, o local de instalação do equipamento, bem como os custos totais planeados e os custos reais associados à intervenção. Essas informações foram exportadas e organizadas numa planilha no Excel, a fim de facilitar o tratamento e a análise crítica dos dados, conforme apresentado na figura 3.15.

O principal objetivo da análise destes registos foi identificar padrões de falha, avaliar a

frequência das intervenções por tipo de avaria e caracterizar os principais problemas associados a cada equipamento, de forma a apoiar a definição dos modos de falha na FMECA. Durante o processo de organização dos dados, foram encontrados registos duplicados ou incompletos e filtradas apenas as ocorrências diretamente relacionadas com os equipamentos da área V022-05. Para estruturar a informação e facilitar a leitura dos dados, foram elaborados diagramas de Pareto, figura 3.16 e figura 3.17, permitindo segmentar as falhas por tipo.

Nota	Data da nota	Ordem	Descrição	Loc. instalação	Custos tot.plan	Cust.tot.reais	Data da Nota
9006227	00000000	1047614	Reparação motor nº.50424	V022-05-06-16	0,18	0,20	00/00/0000
10000026	20011002	1000501	bomba de vac*	V022-05-03-05			02/10/2001
10000027	20011002	1000501	substituir correias m22053	V022-05-03-05	0,00	0,00	02/10/2001
20000028	20011010	1000606	Verificar funcionamento DIC2236	V022-05-01			10/10/2001
10000116	20011010	1000606	Inspeccionar funcionamento do DIC2236	V022-05-01-32	0,00	0,00	10/10/2001
10000116	20011010	1000606	reparar densimetro Dic-2236	V022-05-01-32			10/10/2001
10000154	20011011	1000693	Substituir o Fixe da Bomba de Vácuo	V022-05-03-05	245,40	0,00	11/10/2001
10000209	20011015	1000792	densimetro dic-22236 não controla densid	V022-05-01-32	2 701,35	2 617,55	15/10/2001
10000243	20011016	1000821	Recuperar Redutor de veios paralelos coa	V022-05-06-15	0,00	0,00	16/10/2001
10000243	20011017	1000846	calibrar FR-2237	V022-05-01-31			17/10/2001
10000334	20011023	1001004	Retirar Chapa na Cuba do Filtro de Lamas	V022-05-02-01	0,00	0,00	23/10/2001
30000057	20011031	1001239	Reparação do motor nº.50424	V022-05-06-16			31/10/2001
100000535	20011105	1001434	Linhas de Ar aos bicos na C.de Poeiras	V022-05-06-01			05/11/2001
100000542	20011106	1001442	DIC-2236 (Densimetro de lamas)	V022-05-01			06/11/2001
100000634	20011111	1001442	Motor do filtro de lamas (Forno da cal).	V022-05-02-11	125,70	0,00	11/11/2001
9000137	20011114	1001527	reparar redutor e22059	V022-05-06-15	239,08	359,73	14/11/2001
100000842	20011126	1001723	Verificar bomba do m22046	V022-05-01-15	83,80	0,00	26/11/2001
10000979	20011205	1001913	Reparar acoplamento do E2259A	V022-05-05-01	17,83	36,16	05/12/2001
10000984	20011205	1001932	Montagem de Interruptor V. Nula 22059	V022-05-06-01	0,00	0,00	05/12/2001
100000535	20011205	1001434	By-pass C.de Poeiras para ar/água	V022-05-06-72	1 845,05	1 023,14	05/12/2001
10001068	20011211	1002002	Rep. Fuga Camisa do Aliment. E22059A	V022-05-05-01	543,68	543,65	11/12/2001
10001260	20011223	1002200	Substituir o acoplamento do M22059	V022-05-06-15			23/12/2001
10001260	20011226	1002200	Substituir o acoplamento do M22059	V022-05-06-01	0,00	0,00	26/12/2001
10001284	20011226	1002222	REPARAÇÃO DO REDUTOR	V022-05-06-15			26/12/2001
10001284	20011227	1002222	REPARAÇÃO DO REDUTOR	V022-05-06-15	630,25	984,95	27/12/2001
10001469	20020109	1002447	Inspec. / Benef Alim/Red/Motor 59/59/A	V022-05-06-01			09/01/2002

Figura 3.15: Registo das notas e ordens de avaria.

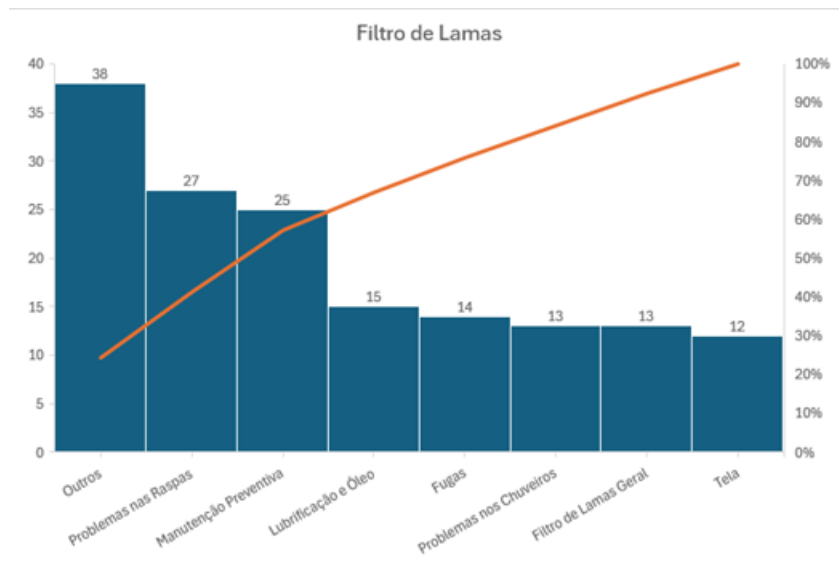


Figura 3.16: Diagrama de Pareto do filtro de lamas.

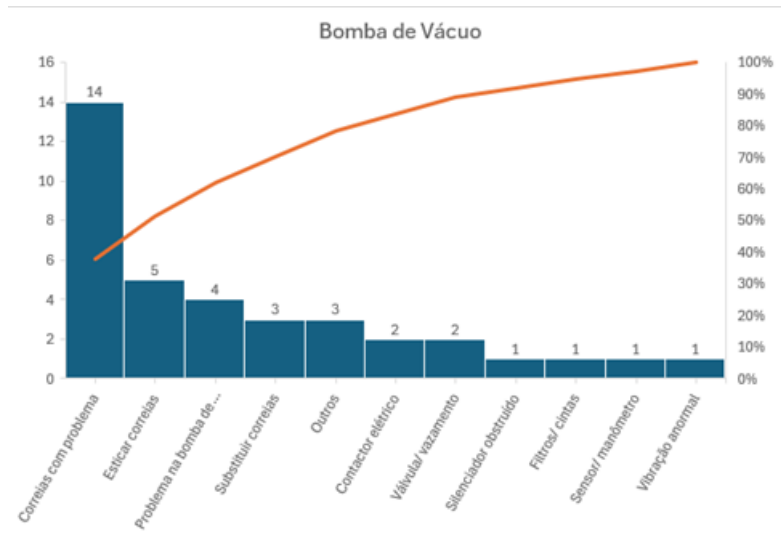


Figura 3.17: Diagrama de Pareto de bomba de vácuo.

3.5.5 Avaliação e seleção dos equipamentos críticos

A avaliação e seleção dos equipamentos críticos foi conduzida com base nos critérios previamente definidos, tendo como principal objetivo identificar os ativos com maior potencial de impacto na operação da unidade. Numa primeira fase, procedeu-se à análise dos parâmetros de meio ambiente, saúde e segurança, impacto na produção e custo de manutenção, os quais permitiram calcular o índice de criticidade de forma preliminar. Atendendo ao número elevado de equipamentos abrangidos, esta análise inicial considerou apenas o modo de falha mais severo associado a cada ativo, de forma a tornar o processo mais ágil e focado nos cenários de maior gravidade.

Após esta primeira avaliação, os valores de criticidade foram cruzados com o valor do MTBF, de modo a incorporar a frequência de falha na análise de risco. Sempre que possível, o MTBF foi determinado com base em dados históricos reais, recolhidos através de ordens de manutenção e registos de avarias existentes no sistema SAP da organização. Nos casos em que não existiam dados suficientes ou em que o equipamento nunca havia falhado, a estimativa do MTBF foi obtida através de brainstorming, utilizando o conhecimento prático como referência para atribuição de um valor coerente.

A conjugação entre o índice de criticidade e o valor do MTBF permitiu aplicar a matriz de risco previamente definida, possibilitando a classificação do risco dos equipamentos. Esta análise resultou na identificação de um conjunto de equipamentos com risco considerado crítico. Contudo, reconhecendo a necessidade de uma abordagem exequível e ajustada aos recursos disponíveis, foi realizada uma seleção restrita dos equipamentos que efetivamente seguiriam para as fases seguintes da metodologia. Assim, apenas os equipamentos que, para além de apresentarem risco elevado, revelaram maior relevância operacional foram considerados críticos e incluídos na análise detalhada.

3.5.6 Identificação dos modos de falha, causas e efeitos

A identificação dos modos de falha, respetivas causas e efeitos exigiu, como etapa preliminar, um processo de recolha de informação técnica, com o objetivo de fornecer uma base sólida e fundamentada para o preenchimento da tabela FMECA. Esta recolha de dados foi realizada a partir de diversas fontes complementares. Inicialmente, recorreu-se à análise de documentação técnica, nomeadamente os manuais dos fabricantes dos equipamentos, bem como a fontes bibliográficas. Paralelamente, com trocas de conhecimento com técnicos com experiência consolidada sobre os ativos em estudo.

Com base nos dados recolhidos, foi possível obter uma visão abrangente sobre os modos de falha mais prováveis, as causas associadas e os respetivos efeitos sobre o sistema. No entanto, para garantir consistência terminológica e alinhamento com os registos históricos da organização, foi utilizada uma lista padronizada de modos de falha e causas de avaria existente no sistema SAP. Esta lista, composta por categorias predefinidas de falhas e causas, foi analisada cuidadosamente, sendo selecionadas apenas as opções que se mostraram compatíveis com o tipo de equipamento e o modelo específico em análise. A utilização deste repositório permitiu garantir a uniformização da linguagem e facilitar, no futuro, a integração dos resultados no sistema de gestão da manutenção.

É importante referir que, neste modelo, o modo de falha corresponde essencialmente à manifestação visível da anomalia ou ao sintoma do dano observado no equipamento. A cada modo de falha identificado foi associada uma causa principal, selecionada a partir das opções disponíveis na lista padronizada do sistema SAP, tendo como critério a sua gravidade.

Sempre que existiam múltiplas causas possíveis para um mesmo modo de falha, foi adotada uma abordagem conservadora e orientada para o risco, optando-se pela causa mais crítica do grupo. Por exemplo, no caso de falhas relacionadas com rolamentos, foram identificadas causas como gaiola partida, folgas, gripados ou fratura dos rolamentos. Contudo, por representar a situação mais severa e com maior impacto no desempenho do equipamento, a causa “rolamentos partidos” foi a selecionada como referência principal.

3.5.7 Construção da tabela FMECA

A construção da tabela FMECA foi organizada de forma sequencial, refletindo todas as fases de análise desenvolvidas ao longo da metodologia. Esta estrutura foi desenhada para permitir não só uma avaliação inicial do risco, mas também para acompanhar a sua evolução ao longo das diferentes etapas de estudo, nomeadamente com a inclusão de propostas de melhoria.

A tabela inicia-se com os campos extraídos do sistema SAP, que identificam e classificam cada equipamento. Esta primeira parte inclui a designação da área funcional, o grupo e subgrupo de equipamentos, a função de cada ativo, a sua localização funcional e a respetiva descrição técnica. Esta organização assegura a rastreabilidade dos ativos e o enquadramento do equipamento no seu contexto produtivo.

Seguidamente, são apresentados os modos de falha, as respetivas causas e os efeitos asso-

ciados. Tanto os modos de falha como as causas foram selecionados a partir de listas padronizadas existentes no sistema SAP, garantindo consistência com a base de dados de manutenção da organização. Os modos de falha correspondem essencialmente às manifestações visíveis das anomalias ou sintomas identificados nos equipamentos, enquanto as causas foram escolhidas com base numa abordagem conservadora, priorizando a mais crítica entre as opções disponíveis. Os efeitos, por sua vez, descrevem as consequências práticas da falha no funcionamento do sistema, o que permite determinar o seu impacto potencial nas dimensões operacionais e produtivas.

A etapa seguinte corresponde à avaliação dos quatro parâmetros de severidade, impacto no meio ambiente, saúde e segurança, impacto na produção e custo de manutenção com o objetivo de determinar o índice de criticidade. Estes são classificados segundo uma escala de quatro níveis, conforme definido previamente. Em paralelo, é calculado o MTBF com base nos registos históricos de falhas ou, quando inexistentes, por consulta a operadores internos. A combinação do índice de criticidade com o MTBF permite aplicar a matriz de risco, resultando na primeira classificação de risco associada a cada falha.

Posteriormente, são analisados os fatores que impactam a produção, nomeadamente a disponibilidade de peças de reposição, MTTR e a existência de redundâncias. Esta avaliação permite uma nova análise do impacto da falha. Com base nesta atualização, é novamente determinado o índice de criticidade e o risco ajustado.

Segue-se a avaliação da detetabilidade atual, isto é, a capacidade do sistema ou da equipa de manutenção para detetar a falha antes que cause danos. Esta informação é complementada com a descrição das medidas atualmente implementadas, o seu impacto na mitigação do risco e uma nova reavaliação do índice de criticidade e risco.

Por fim, a última secção da tabela contempla as sugestões de melhoria e as recomendações baseadas em documentação técnica dos fabricantes. Estas propostas são avaliadas quanto à sua eficácia na melhoria da detetabilidade e na redução das consequências da falha. Procedem-se, assim, a uma última reavaliação do índice de criticidade e do risco, já considerando o efeito das medidas propostas.

A repetição do índice de criticidade e do risco ao longo da tabela tem como objetivo permitir uma leitura clara da evolução teórica do risco, desde a situação inicial até ao cenário projetado com a introdução de medidas de melhoria e recomendações técnicas. Esta abordagem dinâmica procura apoiar a priorização das intervenções e possibilitar uma avaliação teórica do impacto que essas ações poderiam ter na mitigação dos riscos associados a cada equipamento.

3.5.8 Propostas de Melhoria

Na sequência da construção da tabela FMECA, e com base nos resultados obtidos na avaliação de criticidade e risco dos equipamentos, foi definido um conjunto de ações de melhoria orientadas para a redução do risco associado aos modos de falha identificados. Estas ações surgem como complemento à análise, permitindo simular cenários futuros mais controlados e identificar oportunidades de intervenção.

Para além das melhorias sugeridas na tabela FMECA, importa destacar a relevância da aplicação de ensaios não destrutivos, como ultrassons, videografia, termografia, entre outros, como ferramentas complementares para a monitorização do estado dos equipamentos. Estas técnicas permitem detetar sinais precoces de desgaste, fissuras ou anomalias internas sem necessidade de desmontar o equipamento, sendo particularmente úteis em componentes de difícil acesso ou sujeitos a condições de operação exigentes.

Adicionalmente, foi elaborado um plano de rotinas de inspeção periódica, com o objetivo de sistematizar as ações a realizar em cada equipamento crítico. Apesar de algumas destas inspeções já serem executadas de forma proativa pela equipa de manutenção, não existia até ao momento um plano formalizado, com indicação clara do que deve ser verificado, por quem, com que frequência e com que critérios. A frequência das inspeções sugeridas teve como referência principal as recomendações dos fabricantes, embora se reconheça que esta poderá ser ajustada ao longo do tempo, com base na experiência operacional e no histórico de desempenho dos ativos, mediante validação técnica.

A figura 3.18 apresenta o plano desenvolvido, no qual se encontram definidas as tarefas, a periodicidade e os responsáveis. Com o intuito de aproximar esta proposta com a realidade operacional da empresa, foi ainda concebido um exemplo de folha de registo prático, figura 3.19, estruturado de forma semelhante ao modelo atualmente utilizado, permitindo uma aplicação imediata pela equipa de manutenção.

DS Smith							Mês	
Areá	Local	Un. Funcioni	TAG	Descrição	Responsável	Diá	Semana	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	Verificar Válvula de Saída no Eixo - Lado de	Produção/ Manutenção		diário	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	Verificar Fugas de Óleo	Produção/ Manutenção		2 em 2 dias	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	Verificar Fugas de Fluido/ Pasta	Produção/ Manutenção		2 em 2 dias	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	Verificar Ruidos e Vibrações	Produção/ Manutenção		2 em 2 dias	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	Verificar se as Vedações Mecânicas estão	Produção/ Manutenção		2 em 2 dias	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	Verificar se as Peças Móveis de Máquina e não	Produção/ Manutenção		2 em 2 dias	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	Inspeccionar Vácuo	Produção/ Manutenção		2 em 2 dias	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	Inspeccionar Tela	Produção/ Manutenção		semanal	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	Inspeccionar Rolamentos por Ultrassom	Produção/ Manutenção		mensal	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	Limpar Bocais	Produção/ Manutenção		trimestral	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	Lavagem da Cuba (Quando Aplicável)	Produção/ Manutenção		trimestral	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	Verificar Estado das Facas Raspadoras	Produção/ Manutenção		trimestral	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	Lubrificar Articulação	Lubrificador		mensal	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	Lubrificar Chumaceira Apoio Filtro de Lamas	Lubrificador		mensal	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	Verificar Óleo do Carter Redutor	Lubrificador		mensal	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	Mudar Óleo do Carter Redutor	Lubrificador		anual	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	Amostra de Óleo do Carter Redutor para Análise	Lubrificador		anual	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	PCRS - Verificar se há Fuga de Mangueiras e	Produção/ Manutenção		2 em 2 dias	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	PCRS - Verificar se há Deformação nas	Produção/ Manutenção		2 em 2 dias	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	PCRS - Verificar Limpeza da Unidade	Produção/ Manutenção		2 em 2 dias	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	PCRS - Verificar Ruído e Vibrações	Produção/ Manutenção		2 em 2 dias	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-02-01	E22050	PCRS - Verificar Pressão da Bomba	Produção/ Manutenção		2 em 2 dias	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-03-05	E22053	Verificar Pressão da Bomba	Produção/ Manutenção		2 em 2 dias	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-03-05	E22053	Verificar a Temperatura do Líquido de Selagem	Produção/ Manutenção		2 em 2 dias	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-03-05	E22053	Verificar Ruído da Bomba	Produção/ Manutenção		2 em 2 dias	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-03-05	E22053	Verificar se as Vedações Mecânicas estão	Produção/ Manutenção		semanal	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-03-05	E22053	Verificar Acúmulo de Cálcio por Boroscopia	Produção/ Manutenção		semestral	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-03-05	E22053	Lubrificar Chumaceira da Bomba	Lubrificador		trimestral	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-03-05	E22053	Lubrificar Chumaceira Motor	Lubrificador		semestral	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-03-05	E22053	Mudar Massa de Chumaceira da Bomba	Lubrificador		3 anos	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-07-01	E22715	Inspeccionar Soldaduras e Chapas	Produção/ Manutenção		mensal	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-07-01	E22715	Inspeção Visual e Auditiva Geral	Produção/ Manutenção		quinzenal	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-07-01	E22715	Verificar Ruidos	Produção/ Manutenção		quinzenal	
22	Filtragem e Alimentação Lamas ao Forno	V022-05-07-01	E22715	Inspeção Termográfica	Produção/ Manutenção		mensal	

NP rotinas (pr dia)

Figura 3.18: Plano de rotinas.

Aplicação da Metodologia FMECA na DS Smith

DS Smith		Rotinas					data prevista realização:	23/06/2025	
Área	Local	Un. Funcional	TAG	Descrição	Rotina	Designação	Registo		
22		V022-05-02-01	E22050	Verificar Válvula de Saída no Eixo - Lado de Saída			OK	NOK	NOTAS
				diário	10	Verificar Válvula de Saída no Eixo - Lado de Saída			
				Atenção: Equipamento em funcionamento.	20	Ajustar Molas se Necessário			
22		V022-05-02-01	E22050	Verificar Fugas de Óleo			OK	NOK	NOTAS
				2 em 2 dias	10	Verificar Fugas de Óleo			
				Atenção: Equipamento em funcionamento.					
22		V022-05-02-01	E22050	Verificar Fugas de Fluido/ Pasta					NOTAS
				2 em 2 dias	10	Verificar Fugas de Fluido			
				Atenção: Equipamento em funcionamento.	20	Verificar Fugas de Pasta			
22		V022-05-02-01	E22050	Verificar Ruidos e Vibrações					NOTAS
				2 em 2 dias	10	Verificar Ruidos			
				Atenção: Equipamento em funcionamento.	20	Verificar Vibrações			
22		V022-05-02-01	E22050	Verificar as Vedações Mecânicas					NOTAS
				2 em 2 dias	10	Verificar se as Vedações Mecânicas estão Limpas			
				Atenção: Equipamento em funcionamento.	20	Verificar se as Vedações Mecânicas estão Funcionais			
					30	Verificar se as Vedações Mecânicas não Vazam			
22		V022-05-02-01	E22050	Verificar Peças Móveis de Máquina sem Tampa					NOTAS
				2 em 2 dias	10	Limpeza das Peças			
				Atenção: Equipamento em funcionamento.	20	Lubrificação das Peças			
22		V022-05-02-01	E22050	Inspecionar Vácuo			OK	NOK	NOTAS
				2 em 2 dias	10	Inspecionar Vácuo			
				Atenção: Equipamento em funcionamento					

Figura 3.19: Folha de Rotinas.

No entanto, importa referir que o método atualmente utilizado para o registo das inspeções, baseado em folhas físicas preenchidas manualmente, não é o mais eficiente. Esta abordagem está sujeita a perdas de informação, duplicação de dados e dificuldades no seu armazenamento e análise. Uma alternativa mais eficaz passaria pela digitalização do processo, através da utilização de dispositivos móveis, como tablets, que disponibilizem as rotinas digitalmente, permitindo o registo automático das verificações realizadas e a sua integração direta no sistema de gestão de manutenção.

No seguimento da análise realizada, foi considerada a necessidade de uma maior sensorização de equipamentos críticos, como forma de reforçar a monitorização contínua. A medição permanente de variáveis como vibração, temperatura, pressão ou consumo energético permite uma deteção antecipada de anomalias e uma tomada de decisão mais informada, baseada em dados em tempo real.

Neste contexto, propõe-se a instalação de um sensor de vibrações no suporte das lâminas do filtro de lamas, com o objetivo de acompanhar o estado das lâminas e antecipar falhas por desgaste ou deformações. De igual modo, na bomba de vácuo de anel líquido, é recomendada a instalação de um sensor de temperatura, para acompanhar a temperatura do líquido de selagem. O rendimento da bomba diminui progressivamente com o aumento da temperatura do líquido de selagem, sendo o valor ideal de funcionamento de 15°C e o intervalo operacional admissível compreendido entre 0°C e 65°C.

Passando para equipamentos em específico, no filtro de lamas, verificou-se que não estavam a ser realizadas análises de óleo, no carter redutor, devido à omissão dessa tarefa no plano de lubrificação. Apesar de a equipa de manutenção estar ciente de que esta análise deveria ser feita anualmente, a sua ausência no plano impediu a execução regular. Trata-se de uma tarefa

importante para a deteção precoce de contaminações, degradação do lubrificante ou desgaste interno, sendo por isso essencial que passe a constar formalmente no plano de lubrificação.

Paralelamente, verificou-se que as lâminas raspadoras constituem um dos principais elementos associados às ocorrências de falha registadas neste equipamento, justificando uma atenção reforçada no âmbito das ações de manutenção. Nestes tipos de equipamentos estas lâminas são responsáveis pela remoção do resíduo acumulado na superfície tela filtrante, sendo sujeitas a desgaste contínuo. As versões convencionais, tendem a afiar-se com o uso, aumentando o risco de danificar a tela e, conseqüentemente, de comprometer a eficiência do processo.

Face a esta limitação, têm sido desenvolvidas soluções técnicas mais robustas, nomeadamente lâminas raspadoras de dupla densidade, projetadas para assegurar maior durabilidade e desempenho. Estas lâminas apresentam uma ponta concebida para se desgastar de forma controlada, reduzindo significativamente o risco de danos no tecido filtrante, prolongando a vida útil do mesmo e assegurando níveis consistentes de eficiência de separação. A adoção deste tipo de componente representa, assim, uma oportunidade de melhoria no desempenho do sistema e na redução da frequência de falhas.

No caso da bomba de vácuo de anel líquido, constatou-se que não existem ordens de trabalho associadas a este equipamento durante as paragens anuais programadas, o que representa uma oportunidade de melhoria. Considerando o papel fundamental da bomba no circuito, seria recomendável aproveitar essas paragens para realizar inspeções preventivas a componentes como polias e correias, bem como a eventuais sinais de calcificação ou cavitação. Esta sugestão é reforçada pelos dados históricos, que indicam que, das 37 notas de avaria registadas no SAP para este equipamento, 22 estão relacionadas com problemas nas correias, desde correias partidas, danificadas ou com folgas. A introdução de inspeções periódicas ao estado das correias, com verificação do alinhamento e tensionamento regular, permitiria reduzir significativamente a ocorrência destas falhas.

Para além das inspeções, importa considerar soluções disponibilizadas pelo próprio fabricante, Nash, com vista à melhoria do desempenho térmico e da eficiência da bomba. Uma das opções técnicas sugeridas é a instalação de um permutador de calor. Este componente permite regular a temperatura do líquido de selagem, através da transferência de calor entre dois meios separados, garantindo que o líquido permanece dentro do intervalo operacional recomendado. A estabilidade térmica é essencial, uma vez que o rendimento da bomba está associado com a temperatura do líquido de selagem.

Outra solução é a integração de um ejetor a vapor e a ar, formando um sistema de vácuo híbrido. Esta configuração, combina o funcionamento da bomba de anel líquido com o ejetor, permite aumentar a eficiência do sistema, reduzir fenómenos de cavitação, melhorar a estabilidade do vácuo compensar variações térmicas e reduzir o consumo de energia. Os ejetores apresentam ainda outras vantagens relevantes: construção simples, facilidade de manutenção, ausência de partes móveis, e um investimento inicial relativamente baixo, com reduzidos custos de operação. A incorporação de uma destas soluções, representa um potencial significativo de melhoria da fiabilidade e desempenho deste equipamento.

Quanto ao *flash dryer*, verificou-se que não existem, até ao momento, ações específicas de

melhoria ou monitorização. Esta ausência poderá estar relacionada com o facto de se tratar de um equipamento recente, com baixo registo de falhas e um nível reduzido de conhecimento técnico acumulado. No entanto, e apesar da sua aparente robustez, recomenda-se a implementação de um plano mínimo de monitorização preventiva, que permita acompanhar o comportamento do equipamento ao longo do tempo e detetar eventuais desvios operacionais de forma antecipada.

Neste âmbito, podem ser implementadas inspeções periódicas por termografia, de forma a identificar pontos de aquecimento anormal associados a sobrecargas ou falhas de isolamento térmico. Em alternativa, poderá ser considerada a instalação de câmaras termográficas fixas, o que permite uma monitorização contínua da distribuição térmica do equipamento e a emissão de alertas automáticos sempre que forem ultrapassados os limites definidos. Esta abordagem seria particularmente útil no contexto de um equipamento de operação contínua, com difícil acesso durante o funcionamento.

Com base nas análises desenvolvidas e nas ações propostas, constata-se que a redução do risco associado aos equipamentos críticos passa pela combinação de medidas estruturadas de inspeção, monitorização e modernização tecnológica. A integração de rotinas formais, ensaios não destrutivos, sensorização e soluções técnicas recomendadas pelos fabricantes permite não só aumentar a fiabilidade dos ativos, como também antecipar falhas e otimizar a resposta da manutenção

4

Discussão de resultados

Com base na figura 4.1 , que mostra a distribuição dos níveis de severidade atribuídos aos quatro parâmetros do índice de criticidade, é possível retirar algumas conclusões quanto à percepção do risco associado a cada dimensão. Importa salientar, que estes dados resultam da análise de todos os modos de falha identificados durante o levantamento inicial, abrangendo não apenas os equipamentos selecionados para estudo detalhado, mas a totalidade dos ativos avaliados. Esta abordagem permitiu obter uma perspectiva mais abrangente sobre o panorama geral da criticidade dos equipamentos.

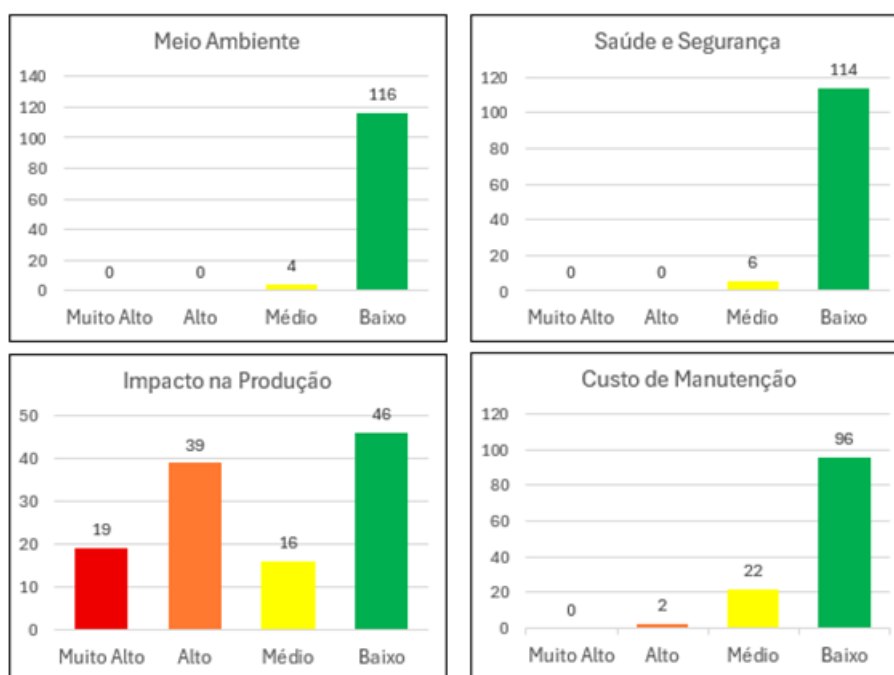


Figura 4.1: Distribuição dos parâmetros de criticidade.

Nos parâmetros meio ambiente e saúde e segurança, a maioria das avaliações foi classificada como de severidade baixa, com 116 e 114 ocorrências respectivamente, em 120 caso analisados. Não foram identificadas situações com grau alto ou muito alto em nenhuma destas categorias, e apenas surgem quatro casos classificados como médio no parâmetro ambiental e

seis na dimensão de segurança. Este padrão sugere que, para os equipamentos analisados, os modos de falha identificados não apresentam, de forma geral, consequências relevantes para o meio ambiente nem para a integridade física dos operadores, o que pode ser interpretado como uma evidência de que os riscos nestas áreas estão razoavelmente controlados.

Em contraste, o parâmetro impacto na produção revelou-se mais distribuído. Foram identificados 19 casos com grau muito alto e 39 com grau alto, o que representa quase metade das análises realizadas. Este dado reforça a ideia de que a maioria das falhas avaliadas tem um potencial impacto significativo na disponibilidade dos ativos e na continuidade do processo produtivo, sendo este o fator mais determinante na elevação do índice de criticidade global.

Já no que respeita ao custo de manutenção, o padrão volta a aproximar-se do observado nos dois primeiros parâmetros. A grande maioria dos casos, 96, foram classificados como baixo, outros 22 foram classificados como médio e apenas dois foram considerados altos, não se verificando qualquer caso com grau muito alto. Esta distribuição indica que, embora existam custos de manutenção associados às falhas analisadas, estes tendem a situar-se em patamares relativamente controlados, sem impacto financeiro elevado.

Em síntese, a análise gráfica revela que os riscos ambientais, de segurança e de custos de manutenção apresentam uma severidade globalmente baixa, sendo o Impacto na Produção o principal vetor de criticidade. Este resultado reforça a importância de concentrar os recursos de manutenção nos equipamentos com maior impacto na produção, permitindo priorizar intervenções que garantam a continuidade operacional e minimizem tempos de paragem não programados.

Passando para o índice de criticidade, a figura 4.2 apresenta a sua evolução ao longo das diferentes etapas do trabalho, nomeadamente, a análise inicial, após consideração do impacto na produção, com a inclusão da detetabilidade atual e, por fim, com a introdução das melhorias sugeridas. Esta sequência permite observar de forma clara a forma como a perceção da criticidade vai sendo ajustada ao longo da metodologia adotada, refletindo o contributo de cada etapa para a mitigação dos riscos inicialmente identificados.

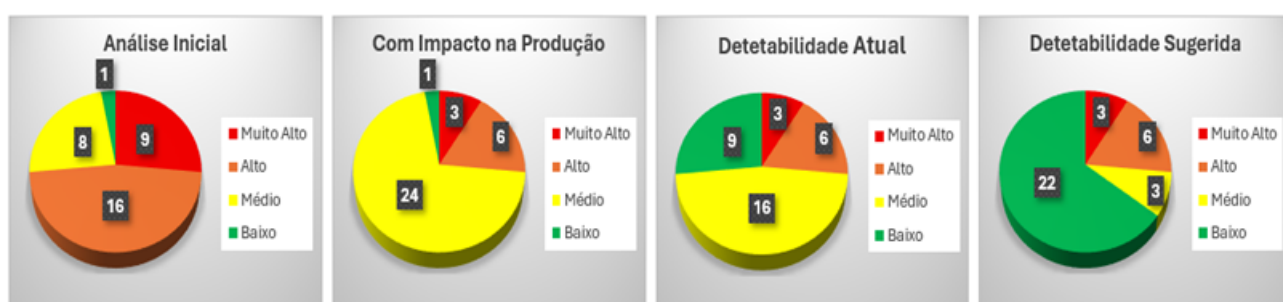


Figura 4.2: Evolução do índice de criticidade.

Na análise inicial, os dados revelam uma distribuição marcada por níveis elevados de criticidade, com um total de 9 casos classificados como muito alto e 16 como alto, o que é explicado pelo cenário onde ainda não foram consideradas medidas mitigadoras. Apenas um caso

foi classificado como baixo nesta fase.

Com a introdução do parâmetro impacto na produção, observa-se uma alteração significativa na distribuição passando a ter 24 classificados como médio e o número de ocorrências nos níveis muito alto e alto reduz para 3 e 6, respetivamente. Esta redistribuição deve-se à integração de três fatores já existentes na realidade operacional da empresa, a disponibilidade de peças de reposição, o MTTR e a existência de redundâncias. A análise destas condições permitiu refinar a avaliação do impacto real das falhas sobre o processo produtivo, revelando que, em muitos casos, a criticidade inicialmente percecionado como elevado se encontra, na prática, atenuada por mecanismos ou recursos já disponíveis na instalação.

Na fase seguinte, com a introdução do parâmetro de detetabilidade atual, verificam-se novas alterações na distribuição dos níveis de criticidade. O número de casos classificados como baixo aumentou de 3 para 9, refletindo a influência positiva da capacidade de deteção já existente. Os casos de criticidade média, diminuíram com o aumento dos casos baixos, passando de 24 para 16, enquanto os de nível muito alto e nível alto mantêm-se constantes, com 3 e 6, respetivamente. Esta redistribuição mostra que, apesar de os mecanismos de deteção ainda não estarem totalmente formalizados ou automatizados, a sua existência contribui para mitigar o risco associado a vários modos de falha.

Por fim, tendo em conta das ações de melhoria propostas, verifica-se uma redução acentuada da criticidade, onde 22 casos são classificados como baixo, apenas 3 permanecem como médio e mantêm-se os 3 e 6 casos considerados muito alto e alto, respetivamente. Esta evolução demonstra o potencial das ações propostas para melhorar significativamente a fiabilidade dos equipamentos, bem como a eficácia da metodologia aplicada na identificação e mitigação dos riscos.

A análise da evolução do índice de criticidade ao longo das diferentes fases demonstra uma melhoria evidente nos níveis mais baixos de risco, com o aumento dos casos classificados como baixo e a redução progressiva dos níveis médio. Esta evolução reflete o contributo positivo da avaliação do impacto na produção e da introdução de mecanismos de deteção, tanto atuais como sugeridos. Contudo, os casos classificados como muito alto e alto mantêm-se inalterados ao longo de todas as fases. Esta permanência deve-se ao facto de que, nos modos de falha em causa, não foram identificadas condições operacionais favoráveis à redução da criticidade, como MTTR reduzidos, nenhuma disponibilidade de peças de reposição ou existência de redundância funcional.

Pelo contrário, nos casos em que estas condições estavam presentes, foi possível reduzir a severidade inicialmente atribuída. Já nas fases seguintes centradas na avaliação da detetabilidade, constatou-se que os mecanismos existentes ou propostos não foram suficientes para alterar os níveis de criticidade mais elevados. Tal pode dever-se à limitada capacidade de deteção aplicada a esses modos de falha, mas também a limitações no próprio modelo de avaliação, que poderá não atribuir peso suficiente à detetabilidade para provocar reclassificações relevantes. Assim, esta constatação reforça a importância de, por um lado, considerar intervenções mais estruturais nos modos de falha críticos e, por outro, continuar a refinar a metodologia aplicada.

Na avaliação da evolução do risco, fig 4.3, ao longo das diferentes fases da análise evidencia tendências consistentes com as observadas no índice de criticidade. Na fase inicial, verifica-se uma forte concentração, com 25 casos classificados como risco severo, com um número reduzido de ocorrências nos níveis moderado e insignificante, 2 e 7 respetivamente. Esta distribuição traduz uma abordagem prudente na identificação de riscos, em que ainda não foram considerados os fatores mitigadores existentes nem as condições operacionais específicas da instalação.

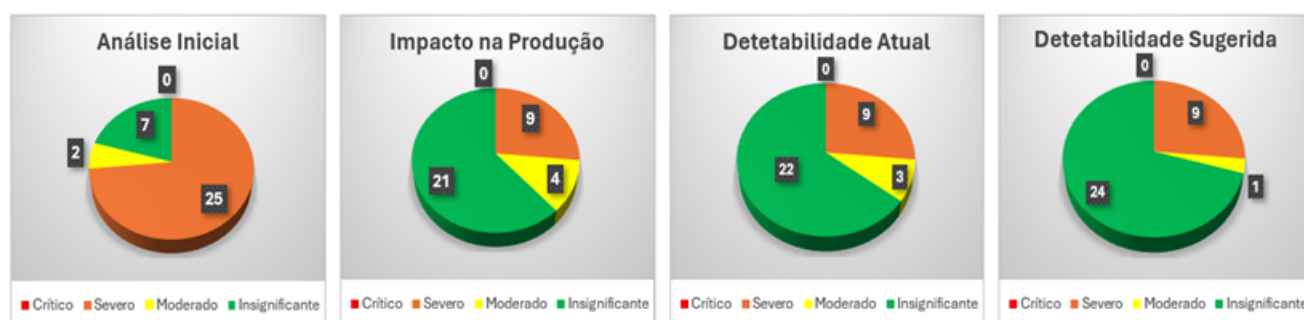


Figura 4.3: Evolução do Risco.

A introdução do parâmetro impacto na produção conduz a uma reclassificação significativa, com uma redução acentuada dos casos severos, de 25 para 9 e um aumento expressivo no número de situações consideradas de risco insignificante, de 7 para 21. Esta melhoria resulta da integração dos três fatores operacionais já existentes na realidade da empresa. A consideração destes elementos permitiu uma avaliação mais realista do risco, aproximando-a do comportamento efetivo dos equipamentos no contexto produtivo.

Nas etapas seguintes, relativas à avaliação da detetabilidade atual e da detetabilidade sugerida, os ganhos revelam-se menos expressivos. O número de situações classificadas como severo mantém-se inalterado, com 9 casos, e apenas se verifica um aumento mínimo dos casos classificados como insignificante.

A permanência dos níveis de risco mais elevados, mesmo após a introdução das medidas de deteção, confirma a tendência já identificada na análise da criticidade, estas ações isoladas não são suficientes para mitigar de forma eficaz, os modos de falha mais severos. Esta limitação pode estar associada, por um lado, à própria natureza crítica dos equipamentos avaliados e, por outro, a limitações metodológicas do modelo adotado.

5

Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e aplicar uma metodologia baseada na FMECA para apoiar a definição de estratégias RCM numa área da fabrica. Através da recolha e análise de dados históricos, da identificação dos modos de falha, suas causas e efeitos, e da avaliação sistemática da criticidade e risco, foi possível construir uma base sólida para a tomada de decisões orientada à mitigação de falhas e à melhoria da disponibilidade dos ativos.

A construção da tabela FMECA permitiu integrar diferentes dimensões de análise desde ambientais, de segurança, impacto na produção e custos de manutenção, às quais se acrescentaram uma análise MTBF, fatores que impactam a produção e parâmetros de detetabilidade, tanto atuais como sugeridos. Esta abordagem progressiva possibilitou não apenas uma leitura detalhada da situação atual dos equipamentos, mas também a simulação de cenários de melhoria com base em propostas realistas e alinhadas com a realidade operacional da empresa.

Os resultados demonstraram que o impacto na produção é o parâmetro mais determinante na elevação da criticidade, ao contrário das dimensões ambiental, de segurança e de custos de manutenção, que se mantêm, na generalidade, em níveis controlados. Verificou-se ainda que, embora as ações de deteção existentes e sugeridas contribuam para melhorar os níveis globais de risco e criticidade, estas se revelaram insuficientes para alterar os casos mais severos. Este facto realça a necessidade de considerar intervenções mais estruturais, como a sensorização adicional de equipamentos, a formalização de planos de inspeção e a integração de soluções tecnológicas propostas pelos fabricantes.

Durante o desenvolvimento do trabalho, foram também identificadas algumas limitações relevantes. Destaca-se a ausência de acesso direto ao sistema SAP, a dispersão de dados operacionais, bem como a qualidade variável dos registos históricos. Estas limitações dificultaram o tratamento eficiente da informação e aumentaram a subjetividade da avaliação, devido à escassez de elementos estatísticos robustos que permitissem sustentar de forma mais objetiva os parâmetros definidos. Acresce ainda a falta de informação técnica detalhada para alguns equipamentos, como o *flash dryer*, o que limitou a profundidade da análise em determinadas situações.

Adicionalmente, a metodologia aplicada revelou-se útil para priorizar intervenções e identificar oportunidades de melhoria, embora se reconheçam limitações associadas ao mo-

delo adotado, nomeadamente quanto ao peso relativo de certos parâmetros na reavaliação da criticidade e do risco. Apesar disso, a ferramenta desenvolvida representa um primeiro passo estruturado rumo a uma abordagem mais sistemática e proativa da manutenção, estando alinhada com os objetivos da organização e aberta a ajustes futuros à medida que mais dados e experiência forem sendo acumulados.

Em síntese, este trabalho contribui para a construção de uma base metodológica sólida que poderá ser replicada noutras áreas funcionais, sendo um ponto de partida para a implementação gradual de práticas de RCM.

Referências bibliográficas

- [1] D. Smith, “Fabricas de papel em portugal,” <https://www.dssmith.com/pt/produtos-e-servicos/produtos-de-papel/fabricas-de-papel-da-ds-smith>, 2025, acessado em 10-02-2025.
- [2] D. Smith, “Mercados,” <https://www.dssmith.com/pt/tecnicarton/mercados>, 2025, acessado em 10-02-2025.
- [3] B. Duignan, “Empresa internacional de papel,” 2025. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/money/International-Paper-Company>
- [4] I. P. da Qualidade (IPQ), “Np en 13306 - manutenção: Terminologia de manutenção,” Tech. Rep., 2021.
- [5] S. Mostafa, J. Dumrak, and H. Soltan, “Lean maintenance roadmap,” *Procedia Manufacturing*, vol. 2, no. 1, pp. 434–444, Jul. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.076>
- [6] M. Mercurio, “Towards predictive maintenance using long short-term memory autoencoder and streaming explainability,” 2022.
- [7] Z. Mian, S. Jia, X. Shi, C. Tang, J. Chen, and Y. Gao, “A model-based rcm analysis method,” in *2020 IEEE 20th International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C)*. IEEE, 2020, pp. 301–307.
- [8] S. O. Duffuaa and A. Raouf, “Reliability-centered maintenance,” in *Planning and Control of Maintenance Systems: Modelling and Analysis*. Springer, 2015, pp. 245–260.
- [9] J. Morais, “Avaliação de riscos a agentes cancerígenos presentes em resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos-uma nova abordagem,” Master’s thesis, Instituto Superior de Educação e Ciências Lisboa, Lisboa, Portugal, 2023.
- [10] B. P. Bowen and D. Verma, “Manufacturing process improvement through the application of the failure mode, effects, and criticality analysis,” in *Flexible Automation and Integrated Manufacturing 1994*. Begell House.
- [11] C. Davis, “Using fmeca to derive criticality-based maintenance programs,” in *Safety and Reliability*, vol. 33, no. 4. Taylor & Francis, 2013, pp. 4–11.

- [12] E. M. L. Alejandro José Poveda Guevara, “Aplicação da metodologia de manutenção centrada em confiabilidade para o desenvolvimento de aviões de manutenção,” Escola Superior Politécnica do Litoral, Guayaquil, Equador, Tech. Rep., 2012.
- [13] T. C. Garcia, “Aplicação dos conceitos de rcm e a ferramenta fmea no aumento de confiabilidade em equipamentos de uma indústria química,” Master’s thesis, Universidade Estadual Paulista (Unesp), São Paulo, Brasil, 2013.
- [14] D. R. Iswidiby, G. Nugroho, A. Al Imam, H. Juniarto, R. I. Astutik, T. Hadi, and K. Puspasari, “Developing autonomous maintenance through fmea-rcm models to reduce% machine breakdown in food and beverages industry,” 2020.
- [15] W. Pujadas and F. F. Chen, “A reliability centered maintenance strategy for a discrete part manufacturing facility,” *Computers & industrial engineering*, vol. 31, no. 1-2, pp. 241–244, 1996.
- [16] L. Sielaff, “Maintenance strategy selection based on fmea/fmeca approach using time dependent failure probability,” *Engineering Proceedings*, vol. 24, no. 1, p. 21, 2022.
- [17] S. S. Patil, A. K. Bewoor, R. Kumar, M. H. Ahmadi, M. Sharifpur, and S. PraveenKumar, “Development of optimized maintenance program for a steam boiler system using reliability-centered maintenance approach,” *Sustainability*, vol. 14, no. 16, aug 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su141610073>
- [18] O. Bohrey and A. Chatpalliwar, “Application of reliability centred maintenance in improving aircraft availability with preventive maintenance intervention,” *J Adv Res Appl Sci Eng Technol*, vol. 42, no. 1, pp. 115–129, 2024.
- [19] A. V. Prasmoro, “Analisa sistem perawatan pada mesin las mig dengan metode failure mode and effect analysis: Studi kasus di pt. te,” *Journal Operations Excellence: Journal of Applied Industrial Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 13–27, 2020.
- [20] A. Ali Ahmed Qaid, R. Ahmad, S. A. Mustafa, and B. A. Mohammed, “A systematic reliability-centred maintenance framework with fuzzy computational integration—a case study of manufacturing process machinery,” *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 30, no. 2, pp. 456–492, 2024.
- [21] L. Pinciroli, P. Baraldi, and E. Zio, “Maintenance optimization in industry 4.0,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 234, p. 109204, Jan. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109204>
- [22] A. Tripathi and M. Hari Prasad, “Rcm based optimization of maintenance strategies for marine diesel engine using genetic algorithms,” *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol. 15, no. 8, pp. 3757–3775, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s13198-024-02374-z>
- [23] M. Mołęda, B. Małysiak-Mrozek, W. Ding, V. Sunderam, and D. Mrozek, “From corrective to predictive maintenance—a review of maintenance approaches for the

- power industry,” *Sensors*, vol. 23, no. 13, p. 5970, jul 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s23135970>
- [24] F. J. Martins and E. Fabro, “Uso do sensor inteligente na manutenção preditiva do motor de uma extrusora,” *Scientia cum Industria*, vol. 8, no. 2, pp. 1–9, jun 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18226/23185279.v8iss2p1>
- [25] L. R. A. Manickam, “Proposal for the fourth generation of maintenance and the future trends & challenges in production,” *MDH. DiVA-Portal.org*, pp. 1–76, sep 2012. [Online]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:569965/fulltext01.pdf>
- [26] M. Vitvar, “Article 2 why use reliability-centered maintenance (rcm) programs?” *Blue Weibull*, apr 2024. [Online]. Available: <https://www.blueweibull.com>
- [27] J. Moubray, *Reliability-centered maintenance*. New York: Industrial Press Inc., 2001.
- [28] C. O. Machado, S. C. M. Junior, Y. Vinicius, S. Celestino, J. A. B. de Andrade, and A. S. R. Junior, “Manutenção prescritiva: A evolução da manutenção na industria 4.0,” *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, vol. 9, no. 9, pp. 4444–4458, sep 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.51891/rease.v9i9.11476>
- [29] S. Dunn, “The fourth generation of maintenance,” in *Proceedings of the Plant Maintenance Conference*. www.plant-maintenance.com, 2003.
- [30] J. M. T. Farinha, *Asset Maintenance Engineering Methodologies*. CRC Press.
- [31] A. M. Smith, *Reliability-centered maintenance*. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [32] F. Backlund, “Managing the introduction of reliability-centred maintenance, rcm: Rcm as a method of working within hydropower organisations,” *Luleå tekniska universitet, Luleå, Sweden, Tech. Rep.*, Jan. 2003.
- [33] Z. Sajaradj, L. N. Huda, and S. Sinulingga, “The application of reliability centered maintenance (rcm) methods to design maintenance system in manufacturing (journal review),” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 505, no. 1. IOP Publishing, 2019, p. 012058.
- [34] J. Igba, K. Alemzadeh, I. Anyanwu-Ebo, P. Gibbons, and J. Friis, “A systems approach towards reliability-centred maintenance (rcm) of wind turbines,” *Procedia Computer Science*, vol. 16, pp. 814–823, march 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.01.085>
- [35] I. H. Afefy, “Reliability-centered maintenance methodology and application: a case study,” *Engineering*, vol. 2, no. 11, pp. 863–873, nov 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4236/eng.2010.211109>
- [36] B. S. Hauge, A. M. Stevens, R. J. Loomis, and A. Ghose, “Reliability-centered maintenance on the space shuttle program,” in *Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2000 Proceedings. International Symposium on Product Quality and Integrity (Cat. No. 00CH37055)*. IEEE, 2000, pp. 311–316.

- [37] O. of the Under Secretary of Defense for Acquisition and Sustainment, “Dod manual 4151.25 - reliability-centered maintenance,” Department of Defense (DoD), Washington, D.C., USA, Tech. Rep., Feb. 2024.
- [38] P. A. d. S. Pereira, “Manutenção baseada em risco aplicada em equipamentos submarinos,” *Brazilian Journal of Development*, vol. 9, no. 05, pp. 18 178–18 197, may 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.34117/bjdv9n5-249>
- [39] D. W. Handani and M. Uchida, “Development of maintenance scheduling model for the safety operational of ship machinery,” *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*, vol. 21, no. 2, pp. 92–101, apr 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14710/kapal.v21i2.61582>
- [40] R. Liao, Y. He, X. Zheng, and Y. Zhang, “Mission reliability driven risk-based maintenance approach of multi-state intelligent manufacturing system,” in *2022 13th International Conference on Reliability, Maintainability, and Safety (ICRMS)*. IEEE, 2022, pp. 93–98.
- [41] A. Tubis, S. Werbińska-Wojciechowska, P. Sliwinski, and R. Zimroz, “Fuzzy risk-based maintenance strategy with safety considerations for the mining industry,” *Sensors*, vol. 22, no. 2, p. 441, jan 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s22020441>
- [42] R. F. Silva, A. H. d. A. Melani, M. A. d. C. Michalski, and G. F. M. de Souza, “Manutenção centrada em confiabilidade e risco: um novo método para apoiar a gestão da manutenção,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 19, p. 10605, oct 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app131910605>
- [43] I. El-Thalji, “Emerging practices in risk-based maintenance management driven by industrial transitions: Multi-case studies and reflections,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 3, feb 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app15031159>
- [44] NORSOK, “Risk based maintenance and consequence classification standard z-008:2017,” NORSOK, Tech. Rep., Nov. 2017.
- [45] J. A. F. Gonçalves, “Modelos de risk based inspection e risk based inspection and maintenance aplicados a sistemas de produção de energias renováveis,” ISEL, Lisboa, Tech. Rep., 2010.
- [46] A. P. Institute, “Risk-based inspection,” American Petroleum Institute, United States of America, Tech. Rep., 2016.
- [47] J. S. G. P. Alexandre, “Análise e implementação de uma ferramenta para a gestão de activos físicos num terminal petrolífero,” Master’s thesis, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2017.
- [48] D. Norske Veritas, “Risk based inspection of offshore topsides static mechanical equipment,” DNV, Tech. Rep., 2010.
- [49] D. o. A. Headquarters, “Failure modes, effects and criticality analysis (fmeca),” C4ISR facility, Washington, DC, Tech. Rep., 2006.

- [50] M. Catelani, L. Ciani, L. Cristaldi, M. Faifer, M. Lazzaroni, and M. Khalil, "Toward a new definition of fmeca approach," in *2015 IEEE International instrumentation and measurement technology conference (i2MTC) proceedings*. IEEE, 2015, pp. 981–986.
- [51] J. B. Bowles, "The new sae fmeca standard." IEEE, jan 1998, pp. 48–53. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/RAMS.1998.653561>
- [52] R. Borgovini, S. Pemberton, and M. Rossi, *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA)*, 1993.
- [53] B. M. M. Pedrosa, "Análise dos modos de falha e seus efeitos (fmea) aplicada a um secador industrial," ISEL, Lisboa, Tech. Rep., 2014.
- [54] A. K. O. Moen, E. Sjøvold, and O. Jordheim, "Implementation of fmeca in small satellite development," Norwegian University of Science and Technology, Norway, Tech. Rep., May 2019.
- [55] H. A. Khorshidi, I. Gunawan, and M. Y. Ibrahim, "Data-driven system reliability and failure behavior modeling using fmeca," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 3, pp. 1253–1260, jun 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TII.2015.2431224>
- [56] NASA, "Rcm guide: Reliability-centered maintenance guide," NASA, USA, Tech. Rep., May 2008.
- [57] L. I. B. C. Fernandes, "Análise fmeca na unidade de produção de torneiras na roca sa," Master's thesis, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2024.
- [58] S. R. C. Silva, J. Brito, and M. Fonseca, "Metodologia fmea e sua aplicação à construção de edifícios," LNEC, Lisboa, Portugal, Tech. Rep., 2006.
- [59] B. Wijanarto, M. Zaman, and B. Cahyono, "Critically analysis for fuel oil storage facilities using fmeca method," vol. 1423, no. 1. IOP Publishing, mar 2024, p. 012037. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1423/1/012037>
- [60] E. Sartor, Marco e Cescon, "Análise de modo e efeito de falha (fmea)," in *Gestão da Qualidade: Ferramentas, Métodos e Padrões*. Emerald Publishing Limited, 2019, pp. 117–127.



**Instituto Superior
de Engenharia**

Politécnico de Coimbra