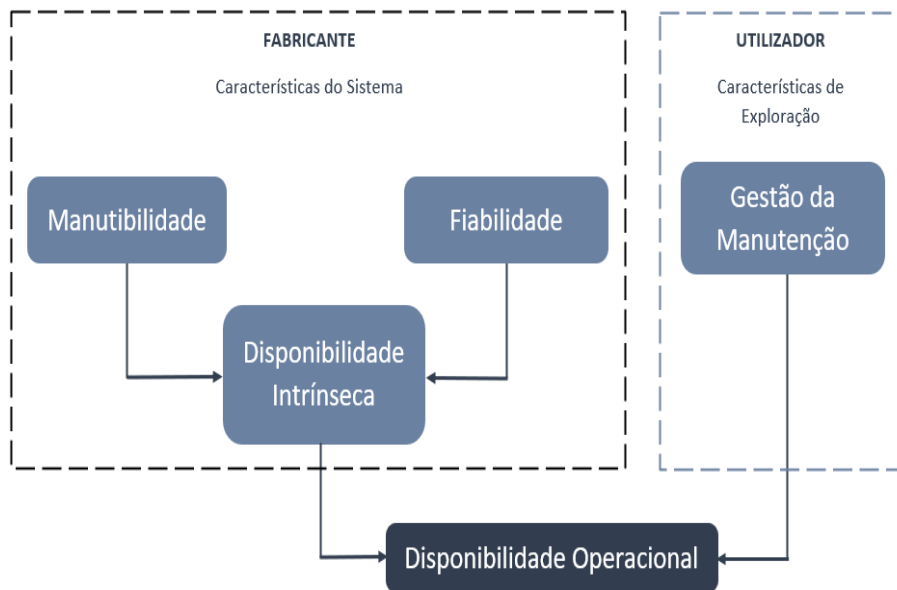




ISEL



Análise da disponibilidade operacional dos ativos físicos na Indústria Cimenteira

MARIANA SANTOS GABRIEL
(Licenciada em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial

Orientador:

Doutor António João Pina da Costa Feliciano Abreu

Júri:

Presidente: Doutor Vitor Manuel Rodrigues Anes

Vogais: Doutor Daniel Augusto Estácio Marques Mendes Gaspar

Doutor António João Pina da Costa Feliciano Abreu

novembro de 2024

Análise da disponibilidade operacional dos ativos físicos na Indústria Cimenteira

MARIANA SANTOS GABRIEL
(Licenciada em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial

Orientador:

Doutor António João Pina da Costa Feliciano Abreu
Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Politécnico de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor Vítor Manuel Rodrigues Anes
Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Politécnico de Lisboa

Vogais: Doutor Daniel Augusto Estácio Marques Mendes Gaspar
Instituto Politécnico de Viseu

Doutor António João Pina da Costa Feliciano Abreu
Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Politécnico de Lisboa

Agradecimentos

Concluir o mestrado parecia um sonho impossível de alcançar com todos os desafios que apareceram durante este percurso, no entanto tornou-se possível de realizar com o apoio das pessoas mais importantes durante o meu percurso académico, profissional e pessoal, sempre estiveram presentes para acompanhar esta jornada e levantar nos dias de maior cansaço, devo a eles o meu maior agradecimento.

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador académico, António Abreu, pela forma como esteve presente durante a realização desta dissertação, por todas as dúvidas esclarecidas e toda a ajuda tanto na elaboração desta dissertação como em todo o percurso académico deste Mestrado como professor e como coordenador.

Quero agradecer à empresa onde realizei o caso de estudo por me terem dado a oportunidade de enquadrar uma empresa com tanto prestígio nacional e internacional que me fez aprender e evoluir muito na minha vida profissional. Um agradecimento especial à minha equipa de trabalho da empresa, sem eles não seria possível aprender tanto e enfrentar os dias mais difíceis.

Tenho ainda de citar e fazer um agradecimento especial ao meu companheiro de todas as horas, Pedro Pinto, por ter ajudado na elaboração desta dissertação, pela paciência que teve comigo ao longo de todo este percurso e todos os desafios destes últimos 3 anos e por me apoiar em todas as escolhas que fiz.

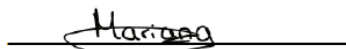
Agradecer, também, às pessoas que me proporcionaram alcançar este sonho e todos os outros até hoje, aos meus pais. Ao meu pai, João, por me ter ajudado a enquadrar uma empresa com uma dimensão mundial, por me ter ensinado tudo o que sabia, por ter ouvido todos os meus desabafos sobre este desafio e por me ter ensinado que não seria fácil, mas que no final iria compensar. À minha mãe, Cecília, por me ter mostrado que por mais que a vida nos dê desafios difíceis os temos que enfrentar sempre de cabeça erguida e a sorrir, sem nunca desistir, por ter sido e continuar a ser a minha melhor amiga em todos os momentos da minha vida, e por ser a minha guerreira principalmente nestes três anos difíceis, és e serás sempre o meu maior orgulho.

À minha irmã, Beatriz, por ter mostrado que um sonho deve ser seguido independente dos desafios que aparecem no caminho e por enfrentarmos os obstáculos que apareceram na nossa vida juntas. Aos meus avós, Alice e Avelino, por me terem educado da melhor forma com o que sabiam, por estarem sempre presentes em todos os momentos importantes da minha vida, e por nunca me terem largado a mão nos momentos difíceis mesmo longe, e à minha tia, Catarina, por ser o exemplo profissional que me fez seguir este caminho, por ter os melhores conselhos e o melhor abraço de conforto nos piores dias e conseguir ser tia, mãe, amiga, mesmo quando a vida nos pregou a maior partida.

Declaração de integridade

Declaro que esta(e) dissertação / trabalho de projeto / relatório de estágio é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Mariana", is written over a solid horizontal line.

Lisboa, 21 de novembro de 2024

Análise da disponibilidade operacional dos ativos físicos na Indústria Cimenteira

Resumo

Diante da necessidade crescente em se obter produtos e serviços cada vez mais aprimorados, processos produtivos otimizados e ativos disponíveis, as empresas têm procurado implementar, melhorias significativas que permitam uma entrega final mais competitiva. É essencial para as Organizações terem os seus ativos disponíveis e funcionais em tempo útil para garantir estes resultados, o que só se obtém através do aumento da disponibilidade operacional. A disponibilidade operacional de um ativo é afetada pelos aspetos inerentes a aplicação, manutenção e uso deste, e pelas particularidades da sua conceção e fabrico, sendo largamente condicionada por fatores com interferência direta como a operação e planeamento de produção, as ações de manutenção, a gestão dos recursos, o tipo de manutenção aplicada, pelo que a Manutenção desempenha um papel fundamental no estudo desta e no processo produtivo do ativo. É através da Manutenção que é possível melhorar as condições de funcionamento dos ativos, e acrescentar valor aos seus serviços e produtos. Desta forma, é foco desta presente dissertação, quantificar a influência dos fatores considerados na disponibilidade operacional de uma linha de produção da indústria cimenteira, através da aplicação de metodologias e ferramentas de análise de falha, especificamente a análise de *Root Cause Analysis*, que permitam aumentar a disponibilidade operacional dos ativos físicos na Indústria Cimenteira através da identificação dos modos de falha recorrentes para os ativos físicos em análise. Através desta análise, será proposto um plano de manutenção que previna os modos de falha considerados recorrentes e mitigue aqueles que não podem ser evitados na sua totalidade. A implementação desta metodologia fornecerá à manutenção informação essencial para a otimização da sua gestão e para a melhoria da qualidade das suas atividades.

Palavras-chave: Disponibilidade, Manutenção, RCA, Fiabilidade e Manutibilidade.

Analysis of the operational availability of physical assets in the Cement Industry

Abstract

Faced with the growing need to obtain increasingly refined products and services, optimized production processes, and available assets, companies have been seeking to implement significant improvements in their production chain that enable a more competitive final delivery. It is essential for organizations to have their assets available and functional in a timely manner to achieve these results, which can only be obtained by increasing operational availability. The operational availability of an asset is affected by aspects inherent to its application, maintenance, and use, as well as by the particularities of its design and manufacturing, and is largely influenced by factors such as operation and production planning, maintenance actions, resource management, and the type of maintenance applied. Maintenance, therefore, plays a fundamental role in the study of operational availability and in the production process of the asset. Through maintenance, it is possible to improve the operating conditions of assets and add value to their services and products. The focus of this dissertation is to quantify the influence of the factors considered on the operational availability of a production line in the cement industry, by applying failure analysis methodologies and tools, specifically Root Cause Analysis (RCA). This approach aims to increase the operational availability of physical assets in the cement industry by identifying recurrent failure modes for the physical assets under analysis. Based on this analysis, a maintenance plan will be proposed to prevent recurrent failure modes and mitigate those that cannot be entirely avoided. The implementation of this methodology will provide essential information to maintenance teams for optimizing their management and improving the quality of their activities.

Keywords: Availability, Maintenance, RCA, Reliability and Maintainability

Lista de Símbolos e de siglas

Siglas

CE Caderno de Encargo

DT Down-Time

ICA International Copper Association

MTBF Mean Time Between Failures

MTTR Mean Time To Repair

MWT Mean Waiting Time

RAMS Reliability Availability Maintainability and Safety

RCA Root Cause Analysis

RCM Reliability Centered Maintenance

TTR Time To Repair

UP Up-Time

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivo	2
1.3	Motivação	3
1.4	Estrutura do documento	4
2	Manutenção.....	6
2.1	Função Manutenção	6
2.1.1	Gestão da Manutenção Industrial	8
2.1.2	Tipos de Manutenção	10
2.1.3	Organização da Manutenção	13
2.1.4	Níveis de Manutenção	15
2.1.5	Planos de Manutenção	16
2.1.6	Ordens de Trabalho.....	19
2.1.7	Custos da Manutenção.....	22
2.2	Indicadores de Desempenho da Manutenção.....	26
2.2.1	Padrões Típicos de Falha	28
2.2.2	MTBF	30
2.2.3	MTTR	31
2.2.4	MWT.....	31
2.3	Modelos de Gestão da Manutenção	32
2.3.1	Modelo TPM	32
2.3.2	Modelo RCM	36
2.3.3	Manutenção Baseada na Condição (CBM).....	38
3	Gestão de Ativos Físicos.....	40
3.1	RAMS	42
3.2	Disponibilidade	44

3.2.1	Fiabilidade	47
3.2.1.1	Qualidade	50
3.2.2	Manutibilidade	52
3.3	Classificação Disponibilidade	55
3.4	Criticidade dos Ativos	57
3.4.1	Fluxograma ABC	60
3.4.2	Método de Avaliação de Risco	63
3.4.3	Método ABC	64
4	Metodologia de Análise de Falhas	67
4.1	Root Cause Analysis (RCA).....	68
4.1.1	Diagrama de Ishikawa	73
4.1.2	5 Porquês	76
4.1.3	Análise de Pareto	78
5	Indústria Cimenteira	82
5.1	Caracterização Cimento	83
5.2	Processo de Produção	85
5.2.1	Extração de Matéria-Prima Natural.....	86
5.2.2	Britagem.....	86
5.2.3	Moagem de Cru.....	88
5.2.4	Cozedura.....	89
5.2.5	Moagem de Carvão	90
5.2.6	Moagem de Cimento	91
5.2.7	Embalagem e Expedição.....	92
6	Caso de Estudo	94
6.1	Enquadramento	94
6.2	Função do Ativo.....	94
6.3	Recolha e análise dos dados.....	95
6.3.1	Identificação do problema.....	95
6.3.2	Análise da Disponibilidade Operacional.....	98
6.4	Metodologia RCA	100

6.4.1	Aplicação do RCA	100
6.4.2	Implementação das medidas	107
6.5	Plano de Manutenção.....	108
6.6	Análise dos Resultados	114
7	Conclusões e Trabalhos Futuros	120
7.1	Conclusões.....	120
7.2	Trabalhos Futuros	121
	Referências Bibliográficas.....	123
	ANEXO I - RCA.....	127

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Estrutura da Dissertação.....	5
Figura 2.1- Estratégia de Manutenção baseada no modelo de Framework.....	7
Figura 2.2- Modelo de Gestão de Manutenção.....	9
Figura 2.3 - Tipos de Manutenção	11
Figura 2.4 - Tipos de Manutenção na “Curva da Banheira”.....	13
Figura 2.5 - Exemplo de Organograma Manutenção.....	14
Figura 2.6 - Etapas Implementação de um Plano de Manutenção.....	18
Figura 2.7 - Exemplo de Fluxo de uma Ordem de Trabalho Padrão.....	21
Figura 2.8 - Relação entre os custos de perda de produção e os custos de manutenção.....	23
Figura 2.9 - Iceberg de custos	25
Figura 2.10 - Custos de Manutenção	26
Figura 2.11 - Padrões típicos de falha.....	28
Figura 2.12 - Tempos de funcionamento e de reparação.....	30
Figura 2.13 - Pilares do TPM	33
Figura 3.1 - Princípios da Gestão dos Ativos Físicos	41
Figura 3.2 - Ciclo de Vida do Ativo	41
Figura 3.3 - Conceitos associados ao RAMS.....	43
Figura 3.4 - Relação da Disponibilidade de um Ativo	45
Figura 3.5 - Principais Fatores que influenciam a fiabilidade nas fases de Projeto e Fabrico e Exploração.....	48
Figura 3.6 - Fatores da Qualidade nas três áreas principais	52
Figura 3.7 - TTR de um equipamento.....	53
Figura 3.8 - Relação da Disponibilidade Operacional com a Disponibilidade Intrínseca e a Gestão da Manutenção.....	56
Figura 3.9 - Exemplo Fluxograma ABC.....	63
Figura 3.10 - Exemplo Matriz de Risco de Criticidade	64
Figura 4.1 - Principais Objetivos da RCA	71
Figura 4.2 - Diagrama de Ishikawa	75
Figura 4.3 - Exemplo da aplicação da técnica 5 Porquês para o problema de Produtos com não-conformidades nos testes de qualidade de uma organização	77
Figura 4.4 - Fatores em análise na Análise de Pareto.....	80
Figura 4.5 - Percentagem Acumulada de Frequência de Ocorrências.....	80
Figura 4.6 - Exemplo Diagrama de Pareto	81
Figura 5.1 - Etapas de Produção de Cimento.....	86

Figura 5.2 - Interior de um Britador em funcionamento	87
Figura 5.3 - Exemplo de uma cinta transportadora de material.....	87
Figura 5.4 - Esquemática do funcionamento do silo	88
Figura 5.5 - Interior de um Moinho de Cru	88
Figura 5.6 - Esquema pormenorizado de um forno rotativo, torre de ciclones e arrefecedor	89
Figura 5.7 - Interior de um Moinho de Cimento.....	92
Figura 5.8 - Separador.....	92
Figura 5.9 - Expedição de cimento.....	93
Figura 6.1 - Constituição de um Doseador.....	94
Figura 6.2 - Rotor do Doseador.....	95
Figura 6.3 - Gráfico de Pareto para as ocorrências do forno 8.....	96
Figura 6.4 - Gráfico de Pareto das causas das falhas do Doseador	96
Figura 6.5 - Caracterização da Falha registada	101
Figura 6.6 - Descrição da Falha	102
Figura 6.7 - Consequência resultantes da falha	103
Figura 6.8 - Custos resultantes da falha.....	103
Figura 6.9 - Diagrama de Ishikawa para a falha em análise.....	104
Figura 6.10 - Diagrama de Falha resultante da falha em análise.....	105
Figura 6.11 - Análise da Lista de Causas.....	106
Figura 6.12 - Aplicação dos 5 Porquês na falha em análise	106
Figura 6.13 - Medidas Corretivas Imediatas aplicadas na resolução da falha	107
Figura 6.14 - Plano de Manutenção em vigor para o Doseador	108
Figura 6.15 - Medidas Preventivas a serem aplicadas para prevenir a falha.....	108
Figura 6.16 - Lista de tarefas do Plano de Manutenção para o Pfister.....	109
Figura 6.17 - Alteração do Plano de Manutenção Preventivo do Pfister.....	113
Figura 6.18 - Programação do Plano de Manutenção	114
Figura 6.19 - Gráfico de Pareto para as ocorrências do Forno 8 nos primeiros 6 meses de 2024	118
Figura 6.20 - Gráfico de Pareto para as ocorrências do Forno 8 nos primeiros 6 meses de 2024	118

Índice de Tabelas

Tabela 2-1 - Indicadores gerais de manutenção.....	28
Tabela 3-1 - Relação entre Fiabilidade, Manutibilidade e Disponibilidade	46
Tabela 3-2 - Princípios Gerais da Manutibilidade e da Fiabilidade	46
Tabela 3-3 - Fatores de criticidade e a sua ponderação	59
Tabela 3-4 - Valores de pontuação e criticidade	59
Tabela 3-5 - Conceitos da arborescência dos ativos.....	60
Tabela 3-6 - Categorias classificação final do ativo.....	61
Tabela 3-7 - Critérios de avaliação de acordo com os fatores definidos	62
Tabela 3-8 - Critérios de classificação ABC	65
Tabela 3-9 - Critérios de classificação ABC e consequência	65
Tabela 4-1 - Relação entre a RCA e a Gestão de Riscos	69
Tabela 4-2 - Principais Termologias utilizadas na RCA.....	71
Tabela 4-3 - Classificação Análise de Pareto.....	79
Tabela 5-1 - Composição do clínquer em percentagem	83
Tabela 5-2 - Composição química do cimento.....	84
Tabela 5-3 - Classificação dos tipos cimento de acordo com a NE 197-1:2000.....	84
Tabela 5-4 - Resumo do processo de cozedura do cru	90
Tabela 6-1 - Dados Recolhidos das paragens do Forno 8 para a causa em análise.....	97
Tabela 6-2 - Uptime, Downtime, Tempo de Reparação e Número de Avarias do para o intervalo de tempo em análise	98
Tabela 6-3 - Disponibilidade, MTBF e MTTR calculados	99
Tabela 6-4 - Método de Classificação de cada critério	111
Tabela 6-5 - Aplicação do método ABC ao Ativo Físico em estudo	112
Tabela 6-6 - Uptim, Downtime, Tempo de Reparação e Número de Avarias obtido para os intervalos de tempo em análise para os Ativos Físicos em estudo	115
Tabela 6-7 - Disponibilidade, MTBF e MTTR calculados	116
Tabela 6-8 - Disponibilidade Operacional obtida para o intervalo de tempo em análise ...	117
Tabela 6-9 - Top 5 das Maiores Paragens do Forno 8 em Abril	118
Tabela 6-10 - Dados da Paragem registado do Ativo K8U01	119

1 Introdução

1.1 Enquadramento

Para diversas organizações, a gestão de ativos é considerada a próxima fronteira na criação de valor e redução de riscos e será imperativo no ramo de negócios. Independentemente do seu tamanho, a organização deverá encontrar uma ou mais formas adequadas ao seu caso na adoção de gestão de ativos. Com isto, alguns benefícios podem ser avaliados e quantificados como, por exemplo, a redução de capital investido em custos de manutenção, aumento da disponibilidade do ativo e a redução da exposição ao risco. (IAM, 2015)

Ao longo das últimas décadas, devido à globalização dos mercados, a Manutenção Industrial tem sofrido diversas mudanças no seu processo e organização devido à necessidade constante em se obter processos produtivos mais fiáveis, melhor qualidade do produto final e menores custos operacionais, o que leva a que os engenheiros e técnicos operacionais sejam desafiados constantemente para encontrar soluções para temas cruciais na indústria mundial, com o auxílio de novas tecnologias e estratégias. Um dos temas que se destaca é a Manutenção dos Ativos Físicos nas Indústrias uma vez que assegurar a disponibilidade operacional requer o conhecimento do padrão de falhas dos equipamentos ou instalações bem como a sua análise crítica, o que poderá ajudar no direcionamento do processo de manutenção a ser implementado. Manter os ativos de forma correta e diligente permite criar e fortalecer um dos principais pilares para a melhoria do desempenho das empresas, sendo que uma estrutura que apresenta uma boa disponibilidade dos seus ativos físicos, conseguida através de manutenção focalizada e eficaz, melhora a competitividade e a criação de valor à Organização.

Sendo que para a manutenção exercer a sua função de manter os ativos operacionais, é necessário que esta conheça aprofundadamente os ativos existentes e compreenda o comportamento destes perante as ações tomadas. São importantes nesta análise os fatores relacionados com a operação e manutenção, que são presença constante na organização e na interação homem-máquina que influenciam o desempenho do ativo, traduzido na sua disponibilidade.

Uma das estratégias mais utilizadas pela indústria de forma a valorizar o serviço ou o produto é a Manutenção Centrada na Fiabilidade, graças a sua abordagem sistemática que permite garantir que os ativos mantenham as suas funções, baseando-se na análise de potenciais falhas e nas suas consequências (Arunraj & Maiti, 2013). Desempenha, assim, a função de identificação da funcionalidade ou desempenho requerido por um determinado equipamento em funcionamento, os seus modos de falha e as causas

prováveis de avaria do mesmo de forma a analisar os efeitos e consequências da falha e por conseguinte melhorar o desempenho operacional, o que permite avaliar a criticidade das falhas e identificar consequências significativas que afetam a segurança, a disponibilidade e o custo operacional, que representam diversos constrangimentos para a empresa.

A Implementação de metodologias como a Manutenção Centrada na Fiabilidade deve ser efetuada de forma integrada, ou seja, acompanhada desde a fase de conceção do projeto, de forma a possibilitar a otimização da eficiência e dos custos de manutenção do sistema avaliado. Todavia, para que esta técnica seja desenvolvida e implementada de modo correto e reflita em resultados é necessário conhecer conceitos relativos à Fiabilidade, Manutibilidade e Disponibilidade.

O objetivo deste trabalho centra-se, assim, no estudo da gestão de ativos físicos e da disponibilidade operacional destes recorrendo à aplicação de metodologias de análise de falhas, nomeadamente a RCA, aplicadas à indústria cimenteira. Pretende-se apresentar uma metodologia que, recorrendo à aplicação de ferramentas de análise de falhas, permita aumentar a disponibilidade operacional dos ativos físicos na indústria abordada através da identificação dos modos de falha recorrentes para os ativos físicos em estudo. Neste processo será analisado o impacto das diversas variáveis do processo de fabrico da indústria, de como a fiabilidade pode afetar diretamente os resultados organizacionais e de como o trabalho vocacionado na eliminação das falhas e das consequências destas permite que o ativo cumpra o papel esperado e proporcione vantagem à organização.

Com o conhecimento dos períodos de falhas, a metodologia RCA permite trabalhar na antecipação, correção, mitigação e até mesmo na eliminação total da mesma. Desta forma, será utilizada a RCA (*Root Cause Analysis*) com diversas ferramentas integradas na mesma para compreender os modos de falha, a causa raiz, as consequências da ocorrência da falha e a forma de mitigar estas mesmas consequências. Esta análise fornecerá à manutenção informação essencial para a otimização da sua gestão e para a melhoria da qualidade das suas operações.

1.2 Objetivo

O objetivo da presente dissertação consiste em quantificar a influência dos fatores considerados na disponibilidade operacional de uma linha de produção da indústria cimenteira, através da análise de *Root Cause Analysis* baseados em diversas ferramentas, como por exemplo, o Diagrama de Ishikawa, os 5 Porquês e a Análise de Pareto, que permitem determinar os modos de falha dos ativos, a sua causa raiz, as consequências provenientes da falha e as ações de mitigação destas mesmas

consequências. Através desta análise, será proposto um plano de manutenção que previna os modos de falha considerados recorrentes e mitigue aqueles que não podem ser evitados na sua totalidade.

Para se proceder à análise em questão, será necessário descrever alguns conceitos básicos de Manutenção, de Modelos de Gestão de Manutenção, nomeadamente o TPM, RCM e CBM, de Gestão de Ativos Físicos Industriais, da Disponibilidade dos Ativos Físicos, da Metodologia de Análise de Falha escolhida para ser aplicada no caso de estudo, a RCA, e da Indústria onde será realizado o caso de estudo. Este conjunto de conhecimentos servirá de ponto de partida no desenvolvimento de um modelo aplicável a outros ativos físicos industriais que preencham as mesmas características que o analisado nesta dissertação, no qual o seu padrão de falha seja conhecido.

Para comprovar e suportar este objetivo, será realizado um caso de estudo em ativos físicos industriais de uma fábrica inserida no setor cimenteiro, com dados factuais, utilizando-se dados de falhas compreendidos entre janeiro e dezembro de 2023 na aplicação da metodologia de falha, e dados do ano de 2024 para ser possível identificar as melhorias obtidas com a implementação da metodologia. Por se tratar de dados de falhas atuais, de existência comprovada e os ativos físicos em questão estarem em plena operação, e tendo em consideração a elevada dimensão da empresa na indústria cimenteira mundial, será mantida a confidencialidade da proveniência, protegendo e garantindo o anonimato de informações pormenorizadas, sendo estes dados gentilmente confiados pelo corpo técnico da referida organização.

1.3 Motivação

A motivação para a elaboração da presente dissertação proveio da necessidade de enquadrar o conhecimento, e a experiência adquirida pela prática do dia a dia da manutenção, em conjunto com a necessidade de solucionar o problema da reduzida disponibilidade operacional dos ativos físicos da indústria cimenteira e possibilitar, assim, uma maior qualidade de execução da manutenção e um aumento exponencial de produção.

O desfasamento entre a teoria e a prática contribuíram para motivar ainda mais a realização desta dissertação, visto que em muitas situações de manutenção a realidade não corresponde ao que é pensado e planeado, quer na execução de trabalhos de natureza corretiva ou preventiva, quer em alterações de equipamentos. Ter a capacidade de identificar quais os fatores que interferem diretamente no desempenho de uma máquina, quantificando a sua influência, prevenir a ocorrência de falha, foi um dos maiores motivos para concluir este estudo.

1.4 Estrutura do documento

A dissertação encontra-se estruturada em 7 Capítulos, conforme representado na Figura 1.1, subdivididos em subcapítulos, para que o leitor possa compreender os conceitos básicos de Manutenção, Gestão de Ativos Físicos, Disponibilidade, Metodologias de Avaliação de Falhas, nomeadamente a RCA, e por fim o caso de estudo onde todos os conceitos anteriores serão utilizados de forma direta ou indireta.

No primeiro Capítulo enquadra-se o tema a partir da relação da necessidade das organizações em manter os seus ativos e do ganho obtido em disponibilidade, fiabilidade, segurança das operações, por meio da utilização da metodologia RCM. Finalizando com a referência ao principal objetivo da presente dissertação, sendo este a análise da disponibilidade operacional dos ativos físicos da linha de produção na indústria cimenteira.

No segundo Capítulo são abordados conceitos da gestão da manutenção industrial bem como os principais indicadores da manutenção que permitem avaliar a performance dos ativos físicos. Neste Capítulo são também abordados os vários Modelos de Gestão de Manutenção, nomeadamente os modelos TPM, RCM e CBM.

No terceiro Capítulo são abordados conceitos da Gestão de Ativos e a relação desta com a abordagem RAMS. É descrito, também, o conceito de Disponibilidade para um ativo bem como a classificação desta e os conceitos a ele associados, como o caso da Manutibilidade e da Fiabilidade. Por fim, é analisado como são classificados os ativos em ativos críticos e as principais metodologias utilizadas na classificação de criticidade dos ativos.

No quarto Capítulo analisa-se ao detalhe a metodologia de análise de falhas que será aplicada no caso de estudo, RCA, os conceitos básicos e os princípios desta. Nesta análise são apresentadas três ferramentas enquadradas na RCA que permitem identificar a causa raiz de uma falha, sendo estas ferramentas o Diagrama de Ishikawa, os 5 Porquês e a Análise de Pareto.

No quinto Capítulo enquadra-se a Indústria Cimenteira, setor no qual será realizado o caso de estudo. Neste capítulo é realizada uma breve apresentação sobre esta Indústria, a caracterização do produto comercializado e o processo de produção.

No sexto Capítulo apresenta-se o caso de estudo. No caso de estudo será realizada uma recolha de dados para o ativo principal do processo de produção que representa uma maior taxa de falha e de indisponibilidade operacional sendo aplicado a metodologia RCA de forma a identificar a causa raiz das falhas e proceder-se a eliminação ou minimização destas, a partir de medidas corretivas e preventivas obtidas na RCA e posteriormente implementadas. Esta análise irá levar às melhores práticas de manutenção para o ativo físico em estudo da organização.

Por fim, no sétimo Capítulo são apresentadas as considerações finais e algumas perspectivas de trabalhos futuros.



Figura 1.1 - Estrutura da Dissertação

2 Manutenção

2.1 Função Manutenção

“A Manutenção eficaz numa organização é um fator crucial para garantir a fiabilidade e a longevidade dos ativos industriais, desempenhando um papel fundamental na continuidade das operações, na segurança dos processos e na redução dos custos operacionais. As Estratégias de Manutenção adequadas ao contexto organizacional contribuem, não só para a conservação dos ativos, mas também para a eficiência dos sistemas produtivos”. (Patra & Kumar, 2015)

No contexto em que se insere a economia global, o tema da Manutenção sempre teve ao longo dos anos relevante importância na indústria mundial visto que a sua correta execução permite, de forma positiva, o posicionamento estratégico da organização que aplica os seus conceitos de forma correta e precisa, devido à otimização dos processos de manutenção ser um dos principais pilares na procura da redução dos custos de produtividade de uma empresa, tornando-a competitiva no mercado onde se insere.

Segundo a norma europeia NP EN 13306 (2021) a manutenção é a combinação de todas as ações de carácter técnico, administrativo ou de gestão, que são aplicadas a um ativo durante o ciclo de vida, com o objetivo de mantê-lo ou repô-lo, num estado em que possa executar a sua função requerida. Decidir o como, quando, quanto irá custar e até que ponto valerá a pena realizar atividades de manutenção num ativo, deverá sempre ser objetivo de avaliação dos gestores de manutenção para que a tomada de decisão seja suportada por indicadores como índice de produtividade, tempo de disponibilidade do ativo, tempo de retorno do investimento na atividade de reparação e o tipo de manutenção mais adequada a cada ativo / componente.

Todas as organizações, seja com ou sem fins lucrativos, indústria ou serviços, têm ativos que utilizam para alcançar os seus objetivos. Para que esses ativos possam desempenhar adequadamente as funções para as quais foram adquiridos, necessitam de ser mantidos ou repostos nas condições adequadas para o fazer. O papel da manutenção é, assim, assegurar que os ativos operam de forma eficaz e eficiente, prevenindo a ocorrência de falhas e reduzindo, assim, o custo total de operação ao manter o desempenho e a disponibilidade em níveis ótimos. (Moubroy, 2017)

No âmbito das metodologias de melhoria contínua, considera-se ainda como responsabilidade da função manutenção a aplicação de alterações aos ativos que visam aumentar a eficiência do processo, sem, no entanto, alterarem a sua função original. Para Garza-Reyes (2015) a manutenção tem como finalidade:

- Redução de custos;
- Aumento da produtividade;
- Melhoria da qualidade de produção;
- Melhoria da fiabilidade dos ativos;
- Garantia da segurança operacional;
- Maximização da eficiência dos processos;
- Redução dos tempos de paragens por falhas não programadas;
- Aumento do tempo de vida do equipamento.

Para qualquer plano de negócios de uma organização, é primordial as necessidades e desejos dos clientes, acionistas e outras partes interessadas, pelo que a manutenção deve estar sempre alinhada com estes e deve possuir metas / objetivos que apoiem o plano de negócios da organização. A estratégia da manutenção deve permanecer flexível para mudar de acordo com a estratégia da organização, (Campbell & Reyes-Picknell (2016) defende que a estratégia de manutenção deve ser baseada no modelo estruturado na Figura 2.1, onde em primeiro lugar aparece os interesses e necessidades dos clientes, acionistas e *stakeholders*.

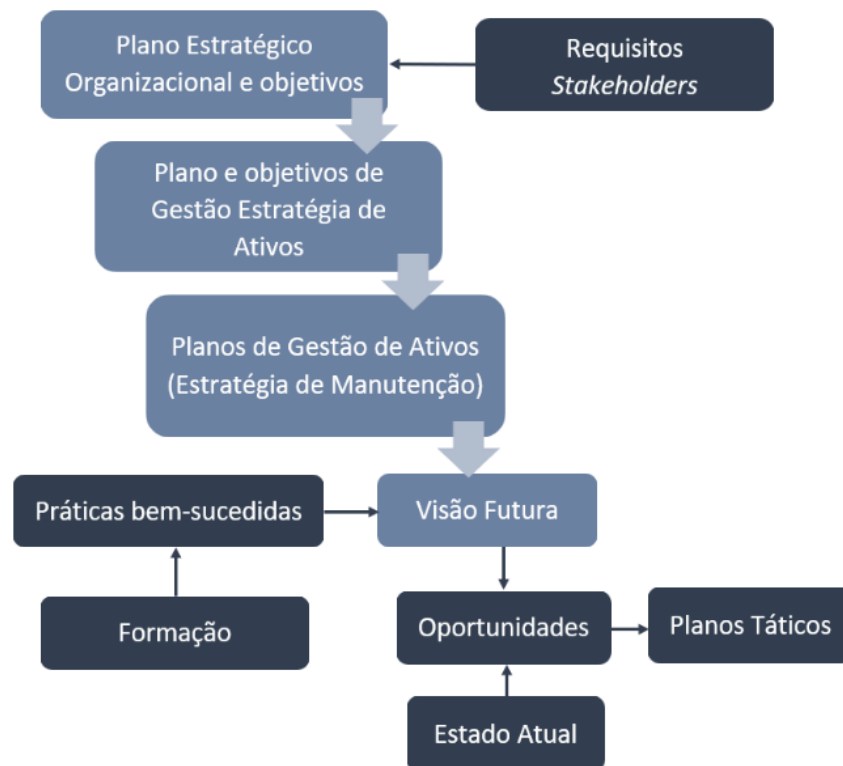


Figura 2.1- Estratégia de Manutenção baseada no modelo de Framework

Fonte: Elaboração própria, adaptado de (Campbell & Reyes-Picknell, 2016)

2.1.1 Gestão da Manutenção Industrial

“Após um longo período em que foi considerada o “mal necessário” da função produtiva, reconhece-se, hoje, na manutenção uma das áreas mais importantes e atuantes da atividade industrial através do seu contributo para o bom desempenho produtivo, a segurança, a qualidade do produto, as boas relações interpessoais, a imagem da empresa, a rentabilidade económica do processo produtivo e a preservação dos investimentos. Este reconhecimento é adicionalmente reforçado pelas crescentes exigências das normas da Qualidade no relativo à manutenção dos equipamentos produtivos”. (Cabral, 2006)

No âmbito da gestão da manutenção industrial, um dos princípios desta passa pela estratégia da manutenção da organização estar sempre alinhada com os objetivos estabelecidos para a organização, o que se deve aos objetivos da manutenção industrial estarem diretamente relacionados com os objetivos globais da organização já que a manutenção afeta a rentabilidade económica do processo produtivo por meio da sua influência no volume e na qualidade da produção como do seu custo. Desta forma, um dos principais segredos que contribui para uma boa gestão da manutenção consiste em encontrar um ponto de equilíbrio entre o benefício e o custo que maximiza o contributo positivo da manutenção para a rentabilidade geral da organização.

Para Dhillon (2006), Sellito e Fachini (2014) a gestão da manutenção industrial pode ser definida por um conjunto de atividades estrategicamente desenvolvidas e integradas, que servem para orientar as atividades de manutenção, criando um padrão ótimo de prestação de serviço dentro dos recursos existentes, visando atuar na causa dos problemas, antecipando-se às falhas.

Segundo Tsang C. H. (2002) o processo de gestão da manutenção industrial inicia através da definição da estratégia da manutenção. A escolha da estratégia de manutenção correta é fundamental, sendo que esta depende de vários fatores, nomeadamente: objetivos, prioridades e metas da organização, características dos equipamentos e condições de funcionamento das instalações, necessidade de produção, recomendações do fabricante, segurança do trabalho e meio ambiente, custos envolvidos, entre outros.

Quando definida a estratégia, a gestão da manutenção é responsável pela sua implementação, envolvendo basicamente as etapas de planeamento, programação, execução, controlo e melhoria dos processos. A Figura 2.2 representa um modelo simplificado da gestão de manutenção.

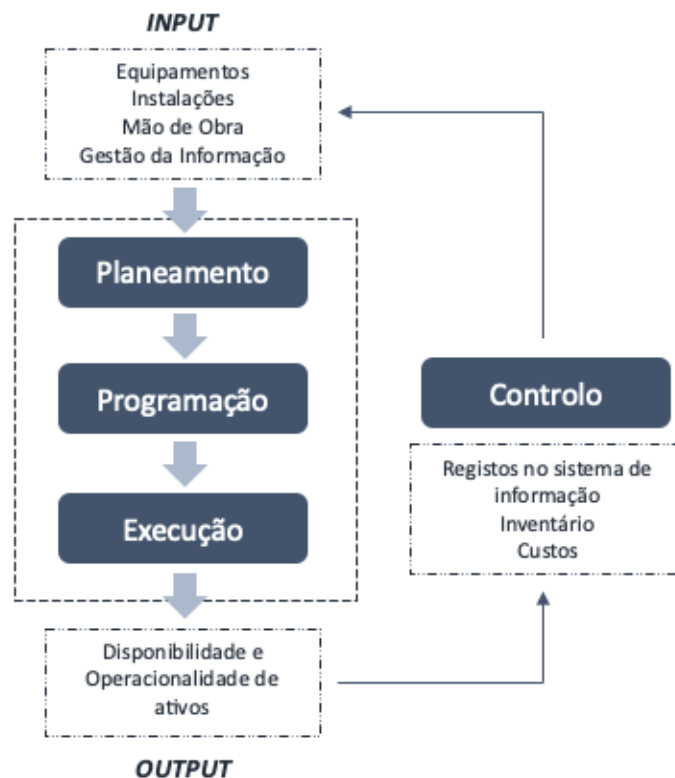


Figura 2.2- Modelo de Gestão de Manutenção

Na etapa do planeamento é determinado o plano de manutenção genérico, com base nos *inputs* obtidos e tendo em consideração as prioridades organizacionais. Desta forma, nesta etapa são tomadas decisões de como alcançar os objetivos e que tipo de estratégias devem ser utilizadas nos sistemas. Na fase de programação realiza-se a preparação dos recursos que serão utilizados e programa-se as tarefas que devem ser realizadas. Na fase da execução, a programação é executada, garantindo-se que as tarefas são realizadas corretamente, na altura definida e seguindo os procedimentos adequados. Por fim, na etapa de controlo é fechado o ciclo de gestão da manutenção, onde se organiza as informações, controla-se os resultados através do *feedback* dado pelo planeamento, o que permite identificar melhorias aos métodos implementados.

Atualmente, gerir a manutenção torna-se uma tarefa complexa que atinge um conjunto grande de disciplinas, pelo que um gestor deve ter, no mínimo, *working knowledge* (conhecimento técnico) sobre todas essas disciplinas. Algumas destas disciplinas consistem em:

- Conceitos gerais de manutenção
- Planeamento
- Gestão de pessoal
- Conhecimento geral de máquinas
- Lubrificação

- Calibração
- Gestão de materiais
- Técnicas de manutenção
- Informática

Observando em detalhe cada uma das disciplinas enumeradas, pode-se concluir que se ocorrer falta de conhecimento sobre uma delas pode condenar, globalmente, toda a eficácia da gestão. Contudo, não existe uma metodologia universal para desenhar sistemas de gestão da manutenção, no entanto o gestor deve ter como princípio, na sua gestão e liderança, o alinhamento dos objetivos da gestão de manutenção com os objetivos organizacionais.

2.1.2 Tipos de Manutenção

A manutenção assume nos dias de hoje um papel fundamental no contexto industrial de uma organização, influenciando diretamente a produtividade e os custos de fabrico. Deste modo, um dos objetivos centrais consiste em manter os ativos físicos disponíveis a maior parte do tempo de funcionamento da organização a um baixo custo, pelo que o *Modus Operandi* da Manutenção para atuar em relação a uma determinada avaria ou anomalia depende do estado de ciclo de vida do ativo em questão. Segundo Carnero (2017), este pode ser classificada em dois tipos específicas:

- Manutenção Planeada, a manutenção é efetuada tendo sido planeada antecipadamente para ocorrer no momento mais oportuno;
- Manutenção Não Planeada, a manutenção é executada sem existir um plano prévio devido a avaria ocorrer de forma súbita e imprevisível.

Enquanto a Manutenção Planeada apresenta como objetivo evitar falhas repentinas e melhorar a eficiência operacional ao permitir a programação antecipada das intervenções, através do tempo de operação e da condição do ativo, a Manutenção Não Planeada resulta em paragens inesperadas dos ativos, tornando assim mais dispendioso o custo de manutenção bem como mais elevado o tempo de inatividade dos ativos. (Carnero, 2017)

Na Figura 2.3 estão representados os tipos de manutenção aplicados na estratégia de manutenção.

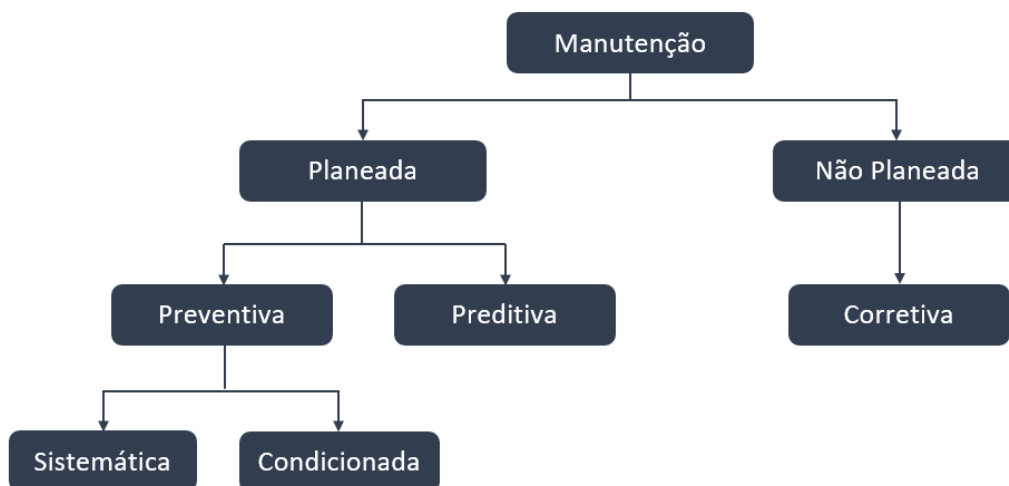


Figura 2.3 - Tipos de Manutenção

Fonte: Adaptado de (Carnero, 2017)

Desta forma, para (Carnero, 2017) as intervenções de manutenção podem ser, essencialmente, de três naturezas:

- Manutenção Corretiva, é efetuada após a constatação de uma anomalia num órgão, com o objetivo de restabelecer as condições que permitem a este cumprir a sua missão. Se a anomalia se revelar de forma catastrófica, a manutenção tem de intervir de emergência (não planeada), se a anomalia se revelar de forma progressiva a intervenção da manutenção é planeada para ocorrer no momento mais oportuno;
- Manutenção Preventiva, manutenção realizada com o objetivo de avaliar e / ou para diminuir a degradação e reduzir a probabilidade de falha de um ativo;
- Manutenção Preditiva, manutenção baseada na monitorização contínua e na análise de dados de forma a prever as falhas e a intervir antes das falhas ocorrerem.

No caso da Manutenção Preventiva, esta pode ser sistemática ou condicionada:

- Manutenção Sistemática, manutenção preventiva realizada de acordo com intervalos de tempo estabelecidos ou números de unidade de uso (estabelecido a partir do conhecimento dos mecanismos de falha do ativo), mas sem condição prévia de investigação.
- Manutenção Condicionada, manutenção preventiva que inclui a avaliação das condições físicas do ativo, análise e as possíveis ações de manutenção subsequentes, as intervenções por controlo de condição desencadeiam-se no fim de vida útil dos componentes.

A manutenção condicionada difere da manutenção sistemática devido a passar-se da execução de uma manutenção de forma sistemática para a execução de um controlo

de condição de forma sistemático, executando-se a manutenção só quando esta se torna necessária.

Para além destes tipos de manutenção, a norma NP EN 13306 (2021), defende que a estratégia adotada pela manutenção pode ser também definida com base nos seguintes tipos:

- Manutenção preditiva, manutenção baseada na condição realizada seguindo uma previsão derivada de repetidas análises ou características e avaliação conhecidas dos parâmetros significativos de degradação do ativo.
- Manutenção ativa, parte da manutenção em que as ações são diretamente realizadas em um ativo para retê-lo ou restaurá-lo para um estado em que ele possa executar a função requerida.
- Melhoria da fiabilidade, combinação de todos os aspetos técnicos, administrativos e ações de gestão, destinadas a melhorar a fiabilidade intrínseca e / ou manutibilidade e / ou segurança de um ativo, sem alterar a original função.
- Manutenção programada, manutenção realizada de acordo com um cronograma específico ou número de unidades de uso.
- Manutenção por oportunidade, manutenção preventiva ou manutenção corretiva diferida, realizada sem agendamento, enquanto as outras ações de manutenção ou eventos específicos para reduzir os custos, indisponibilidade, etc.
- Manutenção remota, manutenção de um ativo realizada sem acesso físico do pessoal ao ativo.
- Manutenção online, manutenção realizada no ativo enquanto ele estiver operacional e sem impacto no seu desempenho.
- Manutenção no local, manutenção realizada no local onde o ativo normalmente é usado ou armazenado.
- Manutenção autónoma do operador, ação de manutenção executada por um operador.
- Terceirização de manutenção, contratação total ou parcial das atividades de manutenção de uma organização, por período determinado.

Segundo Horenbeek e Pintelon (2017) as várias tipologias de Manutenção podem ser associadas à taxa de avarias de um ativo, em função do seu intervalo de tempo de funcionamento (arranque, vida útil e envelhecimento), sendo representadas pela “curva da banheira” ou “curva de mortalidade”, conforme representado na Figura 2.4.

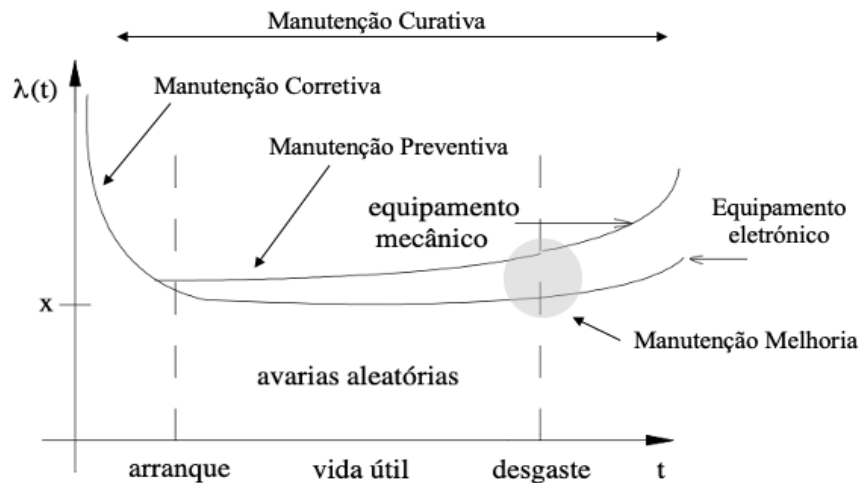


Figura 2.4 - Tipos de Manutenção na “Curva da Banheira”

Fonte: Adaptado de (Horenbeek & Pintelon, 2017)

Esta curva retrata os três períodos distintos da vida do equipamento, juventude (arranque), maturidade (vida útil) e velhice (desgaste). Na fase de juventude, a taxa de avarias é relativamente elevada devido, na maioria dos casos, a erros de projeto, falhas de montagem, incorporação de equipamentos defeituosos, défice no controlo de qualidade, entre outros.

No período de maturidade as avarias ocorrerem de forma aleatória com taxa de avarias aproximadamente constante, sendo que nesta fase a ocorrência de avarias no ativo é influenciada pela forma como é implementada a Manutenção Preventiva.

Na última fase, a fase de envelhecimento, as avarias de um ativo começam a ocorrer a uma taxa crescente por desgaste dos componentes que o constituem, sendo que nesta fase existem duas soluções possíveis: substituição do equipamento ou a reabilitação do mesmo, através de uma manutenção de melhoria, aumentando assim a sua longevidade, bem como a sua disponibilidade.

Atualmente os utilizadores, em muitos casos, já não observam a primeira fase desta curva. Isto relaciona-se com o facto de muitos ativos chegarem às mãos dos utilizadores já testados e rodados de forma a eliminar a parte de "mortalidade" inicial. A curva fica, assim, apenas com duas zonas (vida útil e desgaste).

2.1.3 Organização da Manutenção

Render, Heizer e Muson (2019) consideram que a organização da Manutenção é de extrema importância para o bom funcionamento de uma organização, devendo esta seguir uma estrutura consoante os objetivos, podendo ser realizada de três formas distintas:

- Manutenção Centralizada, todas as atividades de manutenção são coordenadas e geridas a partir de um único local central;
- Manutenção Descentralizada, as atividades de manutenção são distribuídas por áreas específicas;
- Manutenção Subcontratada, a organização terceiriza as atividades de manutenção para empresas ou prestadores de serviços externos, em vez de realizar as mesmas internamente através dos seus próprios recursos.

Desta forma, a organização da Manutenção é responsável por integrar técnicas e estratégias de manutenção e utilizá-las de forma eficaz na sua rotina, pelo que para que esta funcione de forma eficiente e permita a vitalidade dos seus ativos físicos, é necessário a organização das funções. Esta organização envolve a definição de como as tarefas de manutenção serão geridas, supervisionadas e executadas de forma a garantir que os ativos da empresa sejam mantidos em condições operacionais eficientes e seguras.

O organograma representado na Figura 2.5 referência um exemplo tipo de organização da manutenção numa empresa e as principais áreas envolvidas.

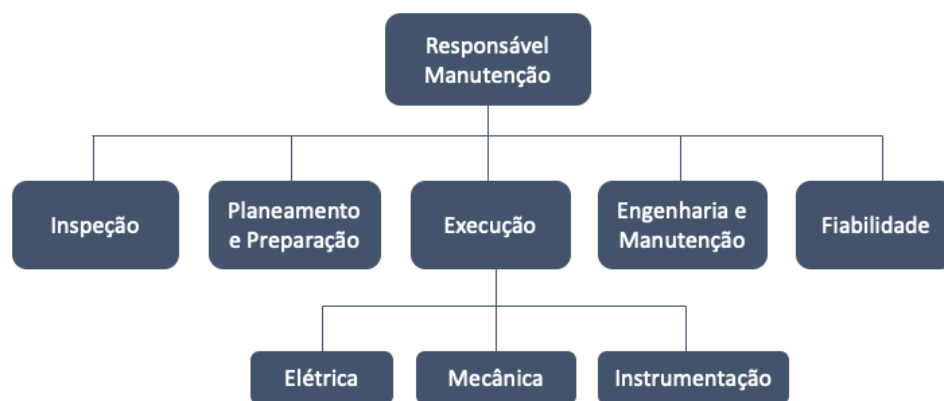


Figura 2.5 - Exemplo de Organograma Manutenção

Analisando ao detalhe cada uma das funções, obtém-se a seguinte definição:

- Responsável de Manutenção, elemento responsável por todas as decisões ligadas à manutenção;
- Planeamento e programação, área responsável pelo planeamento e programação das atividades de manutenção, incluindo a alocação de recursos e atribuição das prioridades;
- Preparação / Execução, área responsável pela preparação de trabalho com base no planeamento e programação anterior, é responsável pela execução, emissão de ordens de trabalho e realização de cadernos de encargo.
- Inspeção, responsável pela monitorização das condições dos ativos

- Engenharia e Manutenção, área responsável pela implementação de novos projetos, especificações técnicas, compra de materiais e serviços;
- Fiabilidade, analisa a fiabilidade e manutibilidade dos equipamentos, definindo soluções na vertente de melhoria contínua quando necessário.

Conforme visualizado no cronograma, todas estas funções interagem entre si o que leva a que para que exista uma gestão de manutenção saudável e sustentável da manutenção dos ativos, é necessário garantir uma organização fluída e coerente entre todas as funções.

2.1.4 Níveis de Manutenção

Para além dos diferentes tipos de manutenção, pode considerar-se diferentes níveis de intervenção. Estes níveis são definidos a partir da complexidade dos trabalhos a executar e do correspondente nível técnico do executante ou equipa técnica que o irá executar.

De acordo com a norma NP EN 13460 (2009) os trabalhos de manutenção dividem-se em cinco níveis distintos:

- **Nível 1:** representa simples afinações previstas pelo fornecedor através de elementos acessíveis sem desmontagem ou abertura do ativo, apenas com substituição de elementos consumíveis, facilmente acessíveis. Estes tipos de trabalhos são realizados pelos operadores do ativo. Operações de manutenção preventiva ou corretiva;
- **Nível 2:** corresponde a pequenas reparações de elementos previstos em operações de manutenção preventiva ou corretiva que requerem procedimentos simples e / ou ferramentas auxiliares, como lubrificação periódica ou controlo do funcionamento do ativo. Trabalhos realizados normalmente por técnicos habilitados de qualificação média ou por operadores;
- **Nível 3:** consiste na realização de operações que requerem procedimentos complexos e / ou equipamentos de suporte portáteis, sendo uma operação complexa prevista nas instruções de manutenção. Este tipo de intervenção técnica deve ser realizado por um técnico especializado. Operações de manutenção preventiva ou corretiva;
- **Nível 4:** compreende todos os trabalhos importantes de manutenção corretiva ou preventiva com a isenção de renovação e reconstrução dos ativos. Inclui também a afinação dos instrumentos de controlo e medida e a participação de outros organismos responsáveis no controlo e inspeção do plano de manutenção, sendo os responsáveis por este tipo de trabalhos equipas com

enquadramento técnico muito especializado. Operações de manutenção preventiva, corretiva ou preditiva;

- **Nível 5:** corresponde à renovação, reconstrução ou execução de reparações importantes de máquinas ou equipamentos, realizada numa oficina central ou por subcontratação. Operações cujos procedimentos envolvem Know-how, utilizando técnicas ou tecnologias específicas, processos e / ou equipamentos de suporte industrial. Trabalhos realizados com a responsabilidade de equipas altamente especializadas ou pelo fornecedor.

2.1.5 Planos de Manutenção

Segundo a NP EN 13460 (2009) um plano de manutenção consiste num documento ou conjunto de documentos que estabelecem, de forma detalhada e estruturada, todas as atividades de manutenção a serem realizadas em equipamentos, instalações ou sistemas dentro de uma organização. Trata-se, assim, de um conjunto de informações, incluindo cronogramas, procedimentos, recursos e responsabilidades, organizados para garantir que as atividades de manutenção são realizadas de forma eficaz, prevenindo falhas, garantido a segurança operacional e otimizando a vida útil dos ativos.

Os principais objetivos de um plano de manutenção, consistem assim em:

- Prevenir Falhas, identificar e realizar intervenções antes que ocorram falhas, garantindo a continuidade operacional dos ativos;
- Reduzir Custos, minimizar os custos de manutenção através de intervenções planeadas e da otimização de recursos;
- Aumentar a Fiabilidade, melhorar a fiabilidade e disponibilidade dos equipamentos, através da redução do tempo de inatividade;
- Segurança, garantir que todas as atividades de manutenção são realizadas de forma a assegurar a segurança dos operadores e das instalações.

Desta forma, para elaborar um plano de manutenção é necessário elaborarem-se várias etapas, sendo as seguintes:

1. Realizar um inventário de Ativos

Identificar todos os equipamentos, sistemas e instalações que requerem manutenção.

2. Classificar os Ativos

Classificar os ativos de acordo com a sua criticidade para determinar a prioridade das atividades de manutenção.

3. Tipos de Manutenção

Especificar o tipo de manutenção a ser aplicado de acordo com a classificação: preventiva, corretiva, preditiva, entre outros.

4. Cronograma de Manutenção

Definir os intervalos de tempo (diário, semanal, mensal, anual, entre outros) para a realização de cada atividade de manutenção, com base na criticidade do ativo e nas condições de operação.

5. Procedimentos Detalhados

Definição de instruções detalhadas sobre como cada tarefa de manutenção deve ser realizada, isto pode incluir *checklists*, especificações técnicas, normas de segurança e requisitos de conformidade.

6. Recursos Necessários

Identificação dos recursos necessários, como peça sobresselentes, ferramentas, mão de obra especializada e outros materiais, também pode incluir a alocação de pessoal responsável por cada tarefa.

7. Documentação e Registo de Manutenção

Todos os detalhes das atividades de manutenção realizadas devem ser registados, incluído data, hora, técnico responsável, tipo de intervenção, peças substituídas, entre outros. Estes registos são essenciais para a rastreabilidade e para futuras análises de desempenho.

8. Indicadores de Desempenho

Implementação de indicadores de desempenho como MTBF e MTTR para monitorizar a eficácia do plano de manutenção e identificar áreas de melhoria.

9. Análise de Resultados e Revisão

O plano de manutenção deve ser revisto periodicamente para ajustar as atividades de acordo com o desempenho observado, novas tecnologias, mudanças operacionais, ou outros fatores relevantes.

Na figura 2.6 está representado um exemplo das etapas de implementação de um Plano de Manutenção.

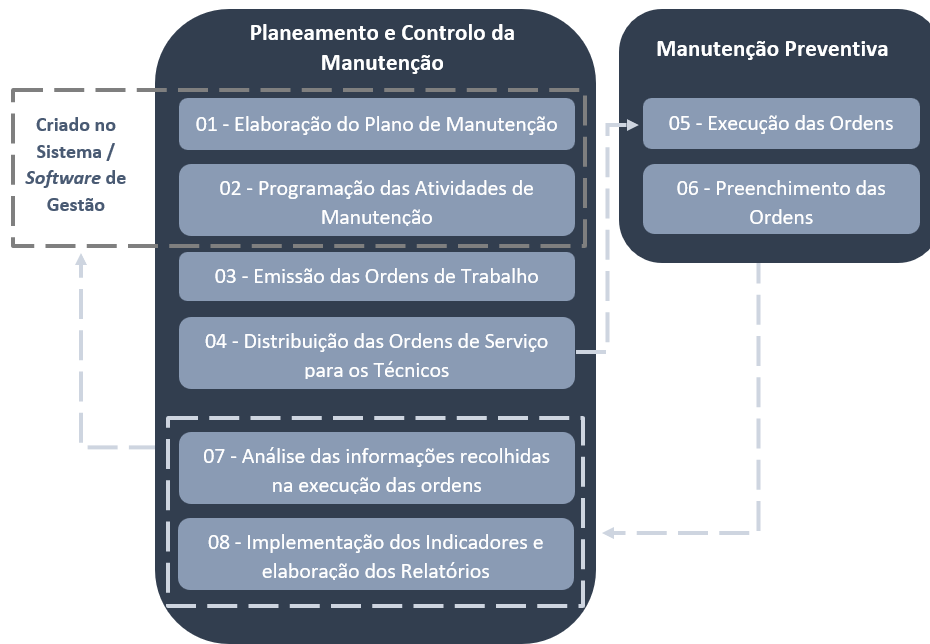


Figura 2.6 - Etapas Implementação de um Plano de Manutenção

Segundo a NP EN 13460 (2009) a elaboração de um plano de manutenção permite a organização obter diversos benefícios na sua produção, sendo os principais os seguintes:

- Aumentar a Fiabilidade dos Ativos, um plano de manutenção bem estruturado e implementado diminui significativamente a ocorrência de falhas inesperadas, garantido que os ativos funcionam de forma contínua e eficiente para além que permite prolongar o tempo de vida útil dos ativos;
- Reduzir os Custos Operacionais, como a manutenção corretiva envolve custos elevados devido à urgência e à possível necessidade de substituir peças, o plano de manutenção permite reduzir as ações corretivas e em consequência os seus custos, ao mesmo tempo que permite obter-se uma gestão mais eficiente dos recursos humanos e materiais, evitando desperdícios e paragens desnecessárias;
- Melhorar a Eficiência Operacional, a redução de paragens não planeadas permite aumentar a disponibilidade dos ativos, através da redução do tempo de inatividade e, consequentemente, melhorando a produtividade. Para além disto, as intervenções passam a ser programada para momentos de menor impacto nas operações, minimizando as interrupções de produção;
- Aumentar a Segurança, a manutenção regular ajuda a identificar e corrigir problemas antes que provoquem acidentes, protegendo, assim, a integridade física dos trabalhadores e dos ativos;

- Melhoria da Qualidade da Produção, ativos que operam dentro dos parâmetros ideais permitem garantir que a qualidade da produção é assegurada;
- Facilidade de Gestão e Planeamento dos Trabalhos, a implementação de um plano de manutenção facilita a criação de um histórico detalhado das intervenções, o que auxilia na tomada de decisões e no planeamento futuro.

Conclui-se, assim, que o objetivo da implementação de qualquer plano de manutenção é assegurar a fiabilidade do ativo em questão, a segurança e a eficiência operacional. A elaboração e implementação adequada de um plano de manutenção é fundamental para a gestão eficaz dos ativos e para a prevenção de falhas que impactem negativamente nas operações e na segurança.

2.1.6 Ordens de Trabalho

Segundo a NP EN 13460 (2009) uma ordem de trabalho consiste num documento formal que autoriza e descreve as atividades de manutenção a serem executadas num determinado ativo. Serve como um meio de comunicação entre a equipa de gestão de manutenção e os técnicos devido a permitir detalhar todas as informações necessárias para a execução da tarefa, e como suporte para o registo de diagnóstico de condição e sugestões de ações futuras.

Uma ordem deve conter na sua constituição elementos essenciais para o bom desempenho na execução da mesma, tais como:

Identificação da Ordem de Trabalho

- Número ou Código de Identificação: cada ordem de trabalho deve ter um número ou código único que permita a sua identificação.
- Data de Emissão: deve conter a data em que foi criada.

Identificação do Ativo

- Descrição do Ativo: detalhes do ativo onde a intervenção será realizada, incluindo localização e número de série.
- Criticidade: informação sobre a criticidade do ativo de modo a priorizar as tarefas.

Descrição das Tarefas

- Tipo de Manutenção: especificação do tipo de atividade que será realizada (preventiva, corretiva ou preditiva).
- Detalhe das Tarefas: descrição clara e precisa das atividades a serem realizadas.

- Instruções específicas: instruções técnicas detalhadas para a execução da tarefa, incluindo procedimentos de segurança.

Recursos Necessários

- Ferramentas e Equipamentos: lista das ferramentas e equipamentos especiais necessários para a execução da tarefa.
- Materiais e Peças de Reposição: identificação das peças ou materiais que são substituídas ou utilizados durante a intervenção.

Responsáveis pela Execução

- Técnicos Designados: nome(s) ou função(ões) dos técnicos responsáveis pela execução das tarefas.
- Supervisor: Identificação do supervisor responsável por verificar a conclusão e a qualidade da intervenção.

Prazo e Prioridades

- Data de Início e Conclusão Prevista: prazos para o início e a conclusão das atividades.
- Prioridade da Ordem de Trabalho: nível de prioridade da intervenção, baseado na criticidade do ativo e na urgência da manutenção.

Aprovação e Controle

- Aprovação: identificação da pessoa ou departamento que aprovou a emissão da ordem de trabalho.
- Controle de qualidade: procedimentos para verificar se as tarefas foram realizadas conforme especificado e com a qualidade necessária.

De forma a garantir-se um fluxo de trabalho eficiente, é necessário que sejam seguidas algumas etapas na gestão das ordens de manutenção, nomeadamente:

- Criação e emissão, a ordem de trabalho deve ser criada com base em necessidades identificadas (como falhas detetadas, resultados de inspeções ou recomendações) e emitida oficialmente para execução.
- Execução, os técnicos realizam as tarefas conforme descrito na ordem de trabalho, utilizando os recursos específicos e seguindo os procedimentos de segurança.
- Registo e Documentação, após a conclusão, todas as atividades realizadas devem ser documentadas, incluindo observações sobre o estado do ativo, anomalias encontradas, peças substituídas e tempo gasto.
- Revisão e Encerramento técnico, a ordem de trabalho é revista pelo supervisor ou pelo gestor de manutenção para garantir que todas as tarefas foram executadas corretamente. Se aprovado, a ordem é encerrada e arquivada para referência futura.

Na Figura 2.7 está representado um exemplo de fluxo eficiente de uma ordem de trabalho padrão.

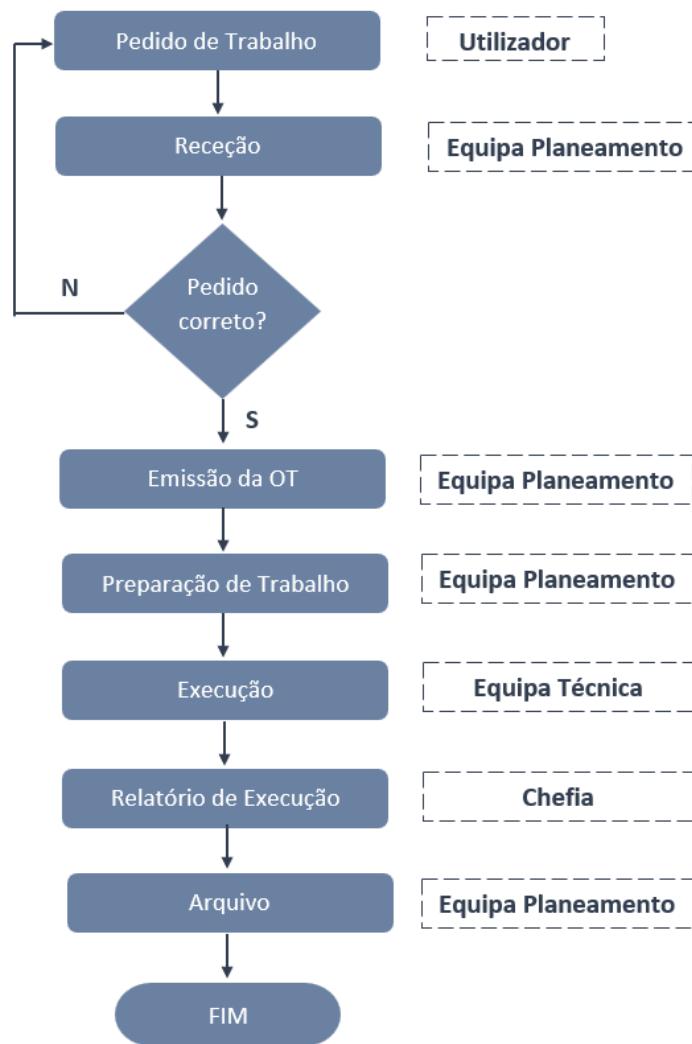


Figura 2.7 - Exemplo de Fluxo de uma Ordem de Trabalho Padrão

As ordens de trabalho são fundamentais na gestão da manutenção devido a permitirem organizar, documentar e garantir a execução eficiente e segura das atividades, a partir da otimização dos recursos. Desta forma, as ordens de manutenção permitem:

- Garantir a conformidade, assegurar que as atividades de manutenção seguem as normas técnicas e regulamentares;
- Facilitar o controlo: permitem que as intervenções sejam rastreadas e documentadas, facilitando auditorias e análises técnicas;
- Melhorar a comunicação, funcionam como um canal de comunicação formal entre a gestão e os técnicos, detalhando expectativas e requisitos;

- Apoiar a Gestão de Recursos, auxiliam na alocação eficiente de recursos, evitando desperdícios e atrasos.

As ordens de trabalho são assim essenciais para a gestão eficaz da manutenção devido a garantirem que todas as atividades de manutenção são planeadas, documentadas e executadas com precisão, contribuindo para a segurança, fiabilidade e eficiência operacional dos ativos físicos. A correta implementação e gestão destas é fundamental para garantir as boas práticas de manutenção e para otimizar os processos da organização.

2.1.7 Custos da Manutenção

Segundo Marcorin e Lima (2003) nenhum estudo de implementação de programas de manutenção, pode ser devidamente efetuado sem se considerar os custos envolvidos, pois são estes fatores os mais importantes a serem examinados para se decidir entre diferentes programas de manutenção. Os custos envolvidos são fundamentais para a decisão de realizar, ou não, atividades de manutenção.

As atividades relacionadas com a Manutenção representam uma percentagem significativa no orçamento anual de uma organização. O aumento das exigências relativas à otimização de custos e disponibilidade dos equipamentos leva a que as empresas procurem cada vez mais um equilíbrio entre os constrangimentos orçamentais e a qualidade dos serviços prestados aos equipamentos. (NP EN 4492, 2010)

Os custos de Manutenção nem sempre são fáceis de quantificar pois dependem essencialmente do tempo de utilização, da frequência do serviço e dos custos dos materiais envolvidos. Embora as avarias dos ativos não sejam possíveis de prever, podem ser estimadas estatisticamente através de cálculos de tempo médio entre avarias/falhas do ativo, bem como o tempo médio de reparações e a disponibilidade do respetivo ativo físico. Desta forma, um dos grandes desafios da política de manutenção de uma organização consiste em encontrar um ponto de equilíbrio ideal entre baixos custos de manutenção e os menores custos da perda de produção, assegurando, com isto, uma disponibilidade do ativo próxima dos 100%, sendo que os custos de manutenção são todos os gastos com reparações, peças sobresselentes, mão de obra e outras atividades que permitem o funcionamento adequado das máquinas e equipamentos, e os custos de perda de produção são todas as perdas financeiras causadas por interrupções na produção devido a falhas de equipamentos.

Na Figura 2.8 pode verificar-se, assim, a proporcionalidade inversa entre os custos da perda de produção e os custos de manutenção e o ponto ótimo que representa a chave de uma gestão eficiente.

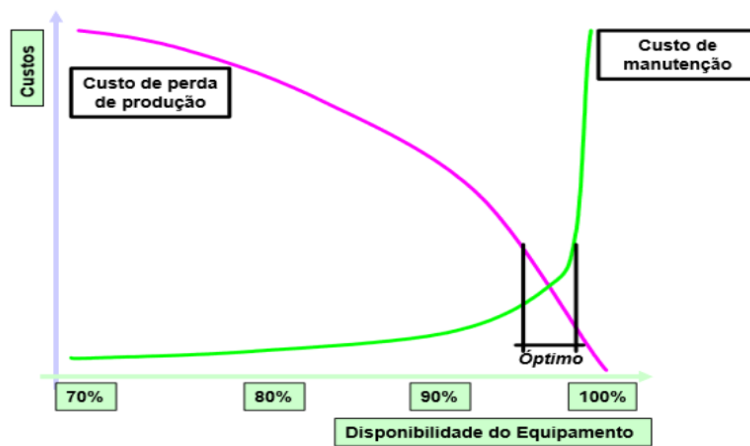


Figura 2.8 - Relação entre os custos de perda de produção e os custos de manutenção

A proporcionalidade inversa representada na Figura 2.8. demonstra que o aumento dos custos de manutenção resulta numa diminuição dos custos associados à perda de produção, sendo que para combater este desequilíbrio é necessário que a organização chegue a um ponto ótimo desta relação, que só pode ser alcançado através de uma análise de custo-benefício, onde o objetivo é minimizar os custos totais, considerando tanto as despesas com manutenção quanto os potenciais custos associados à perda de produção. Esta gestão eficiente dos custos é fundamental para o sucesso sustentável das operações industriais.

Para Cabral (2006) os verdadeiros custos da manutenção, os que exprimem, realmente, o seu desempenho, não são os custos contabilísticos diretos, são estes e os que têm em linha de conta, também, as consequências da manutenção. Porém para Pires e Silva (2017) os custos são diretos ou indiretos.

Desta forma, os custos diretos resultam de:

- Produto de tempo gasto pela taxa horário da especialidade (executante);
- Valor de materiais substituídos, mais custos de transporte e de encomenda;
- No caso de o serviço ser subcontratado valor associado e todos os gastos inerentes desde a execução do caderno de encargos (CE) até entrega do trabalho;
- Custos globais da manutenção, nomeadamente custos fixos (apoio administrativo, eletricidade, telefone, entre outros)
- Custos de materiais em stock e ferramentas.

Os custos indiretos estão agregados a perdas de produção:

- Desclassificados – perdas de produção por contaminados, não-conformidades;
- Custos de inatividade, se o equipamento ou instalação está parada a produção não produz;

- Custos de inoperacionalidade, uma vez que os equipamentos adquiridos têm um custo ao estarem parados vão ter despesas de amortização;
- Custos por não cumprimento dos prazos (perda de fornecedores, penalidades previstas em contrato).

Alguns custos indiretos são difíceis de determinar ou mesmo impossíveis, visto que colocam perguntas às quais pode ser impossível de obter resposta. Para Sharma e Deshmukh (2015) os custos de Manutenção podem ser subdivididos em quatro grandes categorias, nomeadamente os custos diretos, custos de perda de produção, custos de degradação e custos de paragens, sendo que a gestão eficiente destes custos é crucial para a otimização da manutenção.

Segundo García Márquez e Lewis (2018) os custos indiretos estão associados à conservação da operacionalidade do equipamento, onde estão incluídos os custos da Manutenção Preventiva Sistemática e Condicionada, os custos da Manutenção Corretiva e os custos das intervenções de *overhaul*. Estes custos dependem do custo da mão de obra disponível, dos materiais necessários para a realização de cada operação de manutenção e dos custos dos serviços associados às reparações, nomeadamente quando estas são realizadas por entidades externas à empresa.

Os custos de perda de produção são respeitantes às perdas provocadas na produção devido à indisponibilidade dos ativos físicos, derivada de uma avaria ou de uma intervenção de Manutenção Preventiva.

Segundo Wang e Hu (2017) os custos de degradação estão relacionados com a deterioração do estado do ativo, com o aumento no consumo de energia e com o risco de falhas não planeadas, que resultam do tempo de inatividade e de perda de produção, devido à aplicação de uma política incorreta de Manutenção, originando produtos defeituosos, perda do rendimento de produção e fraca qualidade de produto. Já os custos das paragens estão relacionados com a inoperacionalidade dos equipamentos enquanto estes se encontram em reparação ou inoperacionais.

Para além dos fatores já referidos, os custos de manutenção dependem ainda de inúmeros fatores, nomeadamente da condição do equipamento, da experiência e formação do operador, da política / filosofia de manutenção da instalação e das especificações do equipamento. (Levitt, 2005)

Além dos custos anteriormente referidos, existem ainda os custos relativos à segurança e ao ambiente, provocados pela falha de um ativo físico. Estes custos, além de não serem fáceis de quantificar, podem colocar em causa a imagem da organização no mercado e na sociedade em que esta se encontra inserida.

Para compreender como e quanto a manutenção influencia nos resultados globais de uma empresa, é preciso determinar todos os seus custos diretos, indiretos, especiais,

internos e externos, decompondo-os em fatores. Desta forma, para entender de maneira simples os custos associados à manutenção a Figura 2.9 compara os custos com um iceberg devido à semelhança entre ambos de esconderem a sua maior dimensão, estando apenas visíveis o que é mais direto e facilmente acessível. O "iceberg de custos" é essencial para uma organização decidir e planejar as suas estratégias organizacionais pois permite à organização otimizar os processos, reduzir desperdícios e melhorar a eficiência operacional através da identificação e gestão dos custos ocultos.



Figura 2.9 - Iceberg de custos

Fonte: Adaptado de (Cabral, 2006)

Os custos contabilísticos da manutenção, custos diretos, correspondem apenas à ponta do iceberg, sendo estes os custos de mão de obra, materiais e serviços. Enquanto a zona submersa (4 vezes maior) representa os custos ocultos, ou seja, todos os custos difíceis de quantificar, custos indiretos, e são gerados devido à indisponibilidade dos equipamentos na empresa, sendo estes os custos de falhas internas e externas, os custos de oportunidade (perdas associadas a decisões que impediram a organização de maximizar o lucro) e os custos ambientais e sociais. Segundo Moubrey (2017) para uma organização evitar os custos ocultos é fundamental que esta adote uma abordagem proativa e focada na fiabilidade, como o RCM, permitindo, assim, uma gestão mais eficaz dos ativos ao longo do tempo e dos seus custos, sendo que a negligência destes por parte da organização pode comprometer a competitividade e eficiência operacional a longo prazo.

À medida que se aumenta o número de intervenções de manutenção efetuadas aos ativos físicos, os custos de manutenção aumentam. Em contrapartida, quando se diminui o número de intervenções de manutenção efetuadas, os custos das avarias aumentam. Desta forma, o custo total de Manutenção é a função dos custos das

operações de manutenção, das avarias e do custo total, sendo que cada um representa o seguinte:

- Custos de Operações de Manutenção, inclui todos os gastos diretamente associados à realização da manutenção preventiva e corretiva;
- Custos de Avaria, refere-se aos custos associados a falhas e avarias não planeadas nos ativos;
- Custo total, é a soma dos custos de avaria e dos custos de operações de manutenção e representa o valor global que a organização gasta para garantir que os ativos estão operacionais.

Na Figura 2.10 está representado o comportamento de cada um dos custos envolvidos no custo total de manutenção.

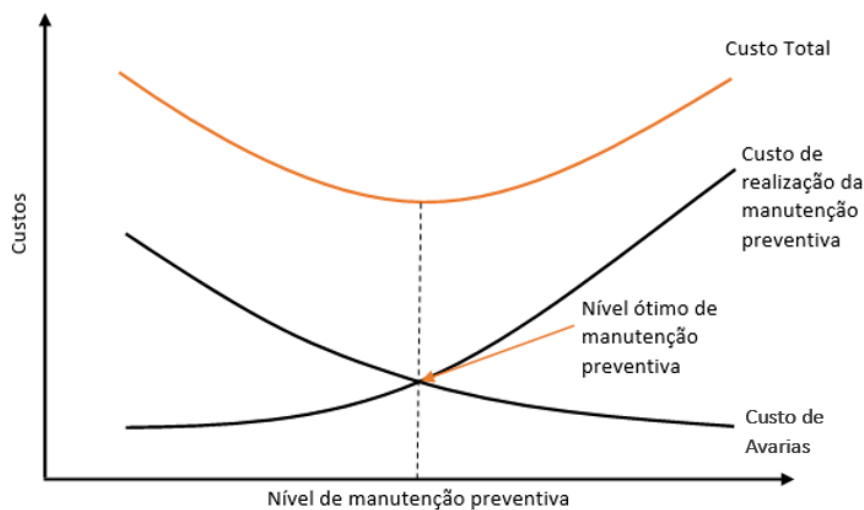


Figura 2.10 - Custos de Manutenção

Fonte: Aptado de (Assis, 2014) e (Cabral, 2006)

De forma a adotar-se uma boa política de Manutenção, deve-se balancear os custos de manutenção com os custos associados às avarias, de maneira a atingir um nível que minimize os custos totais da função de manutenção.

2.2 Indicadores de Desempenho da Manutenção

Sendo a Manutenção uma função logística integrada nos processos operacionais e produtivos, torna-se complicado medir a sua eficiência de forma isolada, devido aos seus benefícios serem muitas vezes indiretos e dispersos ao longo de toda a cadeia produtiva (Tsang A. H., 2016). Para tal existem rácios e *Key Performance Indicators* (KPIs) que são frequentemente utilizados para se perceber aquilo que a manutenção

está a fazer, de que forma está a contribuir, ou não, para o negócio e de que maneira pode ser melhorada.

A norma NP EN 15341 (2022) define, assim, os indicadores de performance como medidores quantitativos ou qualitativos que permitem monitorizar e avaliar o desempenho de diversas áreas numa organização em relação aos objetivos estratégicos e operacionais, sendo possível medir e avaliar de forma clara e com fidelidade as ações de manutenção tomadas com a aplicação destes na manutenção da organização.

Na seleção destes indicadores, é de extrema importância optar por aqueles cujo resultado possa ser controlado, pois ao tentar-se atingir resultados que não podem ser afetados diretamente pela manutenção irá resultar em fracasso (Sondalini, 2004). A norma NP EN 15341 (2022) aborda diversos indicadores de desempenho que permitem avaliar o exercício da função Manutenção, e é possível, por meio do estudo e aplicação destes, obter resultados e medições do estado económico, técnico e organizacional da manutenção. Esta mesma norma, defende que estes indicadores devem ser utilizados para:

- Medir o estado da manutenção;
- Avaliar o desempenho;
- Comparar desempenho;
- Identificar pontos fortes e fracos;
- Planear estratégias e ações;
- Compartilhar os resultados para informar e motivar as pessoas;
- Controlar o progresso e as mudanças ao longo do tempo.

Existem diversos fatores que influenciam na determinação destes indicadores, nomeadamente, o tempo (tempo de funcionamento, de reparação, entre outros), o custo (custos de manutenção corretiva, preventiva, entre outros), o esforço horas homem (HH), entre outros. Os indicadores de desempenho utilizados na manutenção devem ser calculados com base nas informações recolhidas e analisadas durante as atividades de manutenção, sendo escolhidos de acordo com os objetivos específicos a serem medidos, garantindo, assim, uma avaliação eficaz e direcionada das operações de manutenção (Pires & Silva, 2017). Devem, ainda, por regra, ser poucos, simples de calcular e rigorosos no que se pretende avaliar. (Cabral, 2006)

Na Tabela 2-1 encontram-se descritos alguns indicadores gerais da manutenção, no entanto, serão analisadas de forma detalhada somente 4 indicadores relevantes para o desenvolvimento desta dissertação e para o caso de estudo apresentado no capítulo 5, sendo estes os Padrões Típicos de Falha, MTBF, MTTR e MWT.

Tabela 2-1 - Indicadores gerais de manutenção

Indicador de Manutenção	Descrição
Falha	Incapacidade de um equipamento, quando necessário, cumprir a sua função com o desempenho desejado
<i>Uptime</i>	Tempo que o equipamento está totalmente operacional, desempenhando a função esperada
<i>Downtime</i>	Período em que o equipamento não está em condições de ser utilizado
Fiabilidade	Probabilidade de um equipamento desempenhar a função esperada num período de tempo específico

2.2.1 Padrões Típicos de Falha

Com o evoluir dos tempos, a complexidade dos equipamentos aumentou e os padrões de falha também evoluíram. Desta forma, os padrões de falha podem estar, ou não, relacionados com a idade do equipamento. Na Figura 2.11 estão representados os padrões típicos de falha, sendo que o A, B e C relacionam-se com a idade do equipamento, enquanto os padrões D, E e F não.

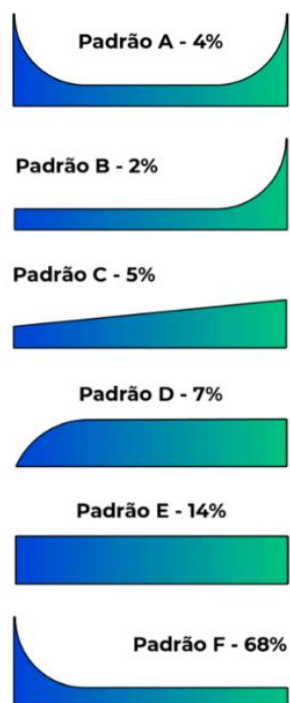


Figura 2.11 - Padrões típicos de falha

Fonte: Adaptado de (Moubray, 2017)

A curva “A”, também conhecida como “curva da banheira” e já analisada anteriormente nesta dissertação, exprime que, num período relativamente curto, no início da vida do equipamento, existe alta probabilidade de uma falha (período de mortalidade infantil). Essa probabilidade decresce, depois, rapidamente, para um nível inferior, mantendo-se constante durante um período relativamente longo: a probabilidade de ocorrência de uma falha é aleatória, isto é, mantém-se sempre a mesma ao longo de todo o tempo em que a curva é horizontal. No fim deste período, a probabilidade cresce, de novo, definindo o período de desgaste. A abordagem lógica da manutenção preventiva neste caso seria: até ao ponto M vigiar e a partir do ponto N recondicionar os desgastes. (Moubray, 2017)

A distribuição B designada por “desgaste típico” é idêntica à distribuição A no entanto esta não tem em consideração o período de mortalidade infantil. Neste caso existe um constante ou gradual acréscimo da probabilidade de falha seguida por um período de desgaste mais acentuado no fim de vida do ativo.

Estas representações fundamentam uma abordagem da manutenção preventiva sistemática, mediante a qual, a intervalos de tempo (T) fixos se efetuam recondicionamentos e substituições de componentes nos equipamentos de forma a manter a probabilidade de ocorrência de avarias sempre ao menor nível. O esforço técnico incidirá, assim, na determinação do período ideal para efetuar estes recondicionamentos, o que se consegue por meio do registo histórico e análise estatística.

As restantes representações, de C a F, são autoexplicativas e observa-se que, em mais nenhum caso, existe um ponto bem definido, a partir do qual a probabilidade de avaria começa a subir. Isto é, a abordagem sistemática deixa de ter aplicação nestes casos. (Cabral, 2006)

Na distribuição C, designada por “desgaste gradual”, existe um gradual acréscimo da probabilidade de falha, mas sem uma zona definida de desgaste. A distribuição D, designada por “melhor quando é novo”, reflete uma baixa taxa de falha quando o ativo é novo e sofre posteriormente um rápido aumento da taxa de falha para um nível constante que se mantém ao longo da vida do ativo. Na distribuição E, designada por “aleatório”, a taxa de falha é constante para qualquer período enquanto na distribuição F, designada por “mortalidade infantil”, existe uma maior probabilidade de falha quando o ativo é novo decrescendo até um período constante de probabilidade de falha, que se irá manter ao longo do ciclo de vida do equipamento.

2.2.2 MTBF

A abreviatura MTBF provém do inglês, que significa *Mean Time Between Failures*. Segundo García Márquez, Tobias, Pinar Pérez, e Papaelias (2016) o MTBF corresponde a uma métrica de fiabilidade utilizada para medir o tempo médio entre falhas, ou seja, o tempo que decorre, em média, entre duas avarias consecutivas de um sistema ou componente (TF2). Esta métrica auxilia na programação das intervenções de manutenção e na previsão de falhas para melhorar a eficiência operacional.

Na Figura 2.12 estão representados os tempos de funcionamento e de reparação.

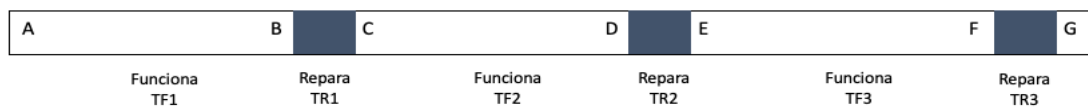


Figura 2.12 - Tempos de funcionamento e de reparação

Fonte: Adaptado de (García Márquez, Tobias, Pinar Pérez, & Papaelias, 2016) e (Cabral, 2006)

O tempo entre avarias é medido em termos do tempo em que o ativo está em funcionamento, não utilizando tempos de calendário para realizar os cálculos, ou seja, são utilizados tempos absolutos. Para um determinado período de tempo o MTBF é expresso por:

$$MTBF = \frac{\sum TFi}{Nav} \quad (2.1)$$

Em que:

TFi - corresponde aos tempos de funcionamento no período;

Nav - corresponde ao número de avarias no período.

Observa-se, portanto, que o cálculo do MTBF requer:

- Conhecimento do tempo diário de funcionamento da máquina;
- Definição bem precisa do que é uma manutenção corretiva.

O MTBF permite, assim, obter uma medida de fiabilidade do ativo, isto é, da sua aptidão para funcionar durante determinado período de tempo em boas condições, bem como prever a programação das intervenções de manutenção necessárias a serem realizadas e minimizar o tempo de inatividade.

2.2.3 MTTR

A expressão MTTR, tal como o MTBF, deriva do inglês, que significa *Mean Time To Repair*. Num determinado equipamento, exprime o tempo médio necessário para reparar uma avaria, ou seja, a média dos tempos de intervenção (TDI). O tempo dedicado à reparação corresponde ao tempo durante o qual, pelo menos, um operacional está a executar o trabalho, sendo que agrega também os tempos necessários para diagnosticar a avaria, reunir os recursos, efetuar a reparação, testar e entregar o equipamento.

Para determinar o MTTR num determinado período de tempo, utiliza-se a seguinte expressão:

$$MTTR = \frac{\sum TRi}{Nav} \quad (2.2)$$

Em que:

TRi - corresponde aos tempos de reparação no período;

Nav - corresponde ao número de avarias no período.

Este indicador é, primordialmente, uma medida da manutibilidade do equipamento, isto é, da aptidão para ser restaurado para uma condição de bom funcionamento. No entanto, é importante observar-se que o tempo dedicado à reparação depende, também, do plano e da sequência do trabalho bem como da própria produtividade dos executantes. (Moghaddam, 2018)

Segundo Moghaddam (2018) a previsão e a redução do MTTR são cruciais para melhorar a disponibilidade do ativo e a eficiência operacional em sistemas mais complexos, devido a um menor tempo de reparação contribuir diretamente para uma maior disponibilidade e um desempenho mais eficiente das operações.

2.2.4 MWT

Um outro conceito no contexto da reparação das avarias é o tempo médio de espera, MWT. Este conceito fornece um indicador sobre as condições de atendimento do serviço de manutenção às situações de avaria.

Para determinar o MWT num determinado período de tempo, utiliza-se a seguinte expressão:

$$MWT = \frac{\sum TEi}{Nav} \quad (2.3)$$

Em que:

TRi - corresponde aos tempos de espera no período;

Nav - corresponde ao número de avarias no período.

Segundo Rao (2017) para maximizar a eficácia do planeamento da manutenção e a eficiência operacional, é fundamental monitorizar e gerir o MWT de forma eficaz, o que envolve ajustes de processos de manutenção e a alocação de recursos com base em medições desta métrica de forma a efetuar-se uma melhoria contínua do processo de produção.

2.3 Modelos de Gestão da Manutenção

Os modelos de gestão da Manutenção correspondem a ferramentas disponíveis para o auxílio da gestão da manutenção, ferramentas estas que visam a otimização da manutenção nas empresas, fazendo com que estas organizações se posicionem em prol da melhoria contínua. Para Kardec e Nascif (2005) podem ser definidas diferentes estratégias e para isso utilizadas diversas ferramentas e metodologias, entre as quais:

- *Total Productive Maintenance (TPM)*
- *Reliability Centered Maintenance (RCM)*
- *Reliability Based Maintenance (RBM)*
- *Condition Based Maintenance (CBM)*
- *Lean Maintenance;*

Das ferramentas referidas anteriormente, as estratégias com mais impacto no mercado são o TPM e o RCM, no entanto, será analisado em diante estas duas ferramentas ao detalhe juntamente com o CBM, devido a ser um tema importante para compreender o restante trabalho desenvolvido ao longo da dissertação.

2.3.1 Modelo TPM

No decorrer dos últimos anos, o modelo TPM tem sido aplicado com êxito na indústria a nível mundial. Este modelo de gestão da manutenção baseia-se na otimização da relação custo / eficiência da Função Manutenção, visando elevados níveis de segurança de pessoas e bens e a proteção do meio ambiente, para além dos resultados económicos. Seichii Nakajima, autor desta metodologia, define-a como um sistema de manutenção dos equipamentos a executar por todos os funcionários, por iniciativa própria e em toda a empresa.

O modelo TPM assenta no conceito do ciclo de vida dos equipamentos (LCC - Life Cycle Cost), que considera os custos de aquisição, utilização, manutenção e abate,

estabelecendo como objetivo, a maximização da disponibilidade dos equipamentos e a eliminação das perdas de produção, através da redução ao mínimo do número de avarias.

Para (Prabhuswamy, Nagesh, & Ravikumar, 2016) as linhas orientadoras do TPM caracterizam-se por:

- Procura da maximização da eficiência global das máquinas e dos equipamentos, através da redução de perdas associadas a paragens e do foco na melhoria contínua;
- Sistema que reúne a participação de todos, a todos os níveis;
- Sistema total que engloba todo o ciclo de vida útil das máquinas e dos equipamentos, desde o planeamento da aquisição dos equipamentos até à desativação ou substituição dos mesmos;
- Movimento motivacional, na forma de trabalho de grupo, através da condução de atividades voluntárias.

Segundo Borris (2006) existem oito pilares essenciais na implementação do TPM. Na Figura 2.13 estão representados os pilares do TPM, estes pilares representam responsabilidades para as empresas que o decidem implementar. Segundo Chong, Chin, e Hamzah (2012) quando os pilares são implementados de forma sistemática, focam-se em torno de cinco áreas específicas: a educação de todos os funcionários, a promoção de um ambiente de trabalho em equipa, organização e limpeza do local de trabalho, avaliação e comparação dos resultados dos diferentes postos de trabalho e uma ação contínua de sensibilização dos trabalhadores nas áreas da saúde e segurança.

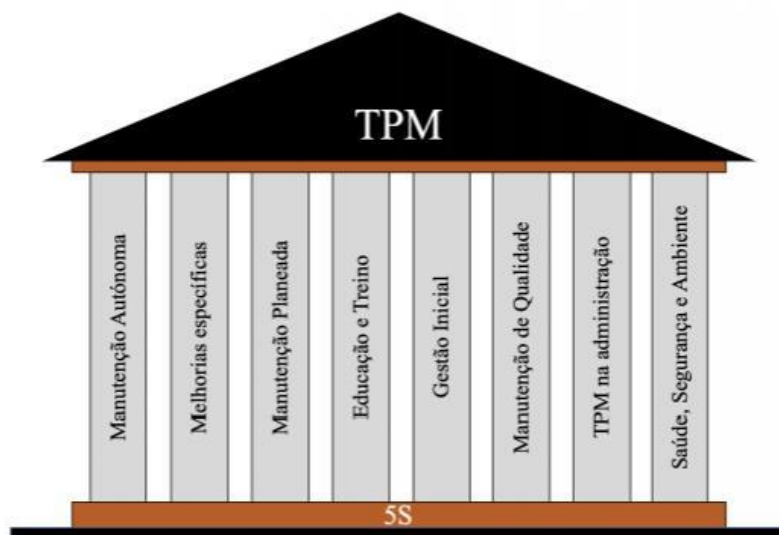


Figura 2.13 - Pilares do TPM

Fonte: (Borris, 2006)

No que respeita à manutenção autónoma, esta foca-se no desenvolvimento dos operadores para que estes possam realizar pequenas tarefas de manutenção, permitindo assim que os técnicos de manutenção qualificados se concentrem em reparações mais técnicas ou atividades de valor agregado superior. Esta manutenção deve, assim, ser efetuada através de uma estruturação de um sistema em oito passos:

- Limpezas;
- Localização das fontes de sujidade;
- Tornar o equipamento mais fácil de limpar;
- Padronização das atividades de manutenção;
- Aprendizagem das práticas de inspeção-geral;
- Condução da inspeção autónoma;
- Organização das áreas de trabalho;
- Início da verdadeira autogestão diária.

Quanto às melhorias específicas, estas visam identificar e eliminar todas as perdas e, conseqüentemente, obter crescimento da eficácia dos equipamentos, sistemas e processos produtivos, por meio de técnicas de análise e aprimoramento, promovendo alterações substanciais que permitam alcançar os limites de produtividade máximos. Este aumento de eficiência e eficácia dos equipamentos pode ser obtido através das seguintes etapas:

- Reconhecimento e identificação das perdas de produção;
- Cálculo da eficiência do equipamento e determinação dos objetivos;
- Análise dos fenómenos e revisão dos fatores associados;
- Procura do perfil ideal do equipamento e da produção.

No que respeita à manutenção planeada, esta define um nível ótimo de desempenho dos equipamentos através da implementação de atividades projetadas para recuperar o estado ideal do dispositivo e manter esse estado através de atividades de manutenção preventiva e preditiva. Deve, assim, ter em consideração os seguintes passos:

- Manutenção diária;
- Manutenção baseada na condição;
- Melhorias para o aumento da expectativa do tempo de vida útil;
- Controlo das peças de reposição e de reserva;
- Análise de falhas e prevenção de reincidência;
- Controlo da lubrificação.

A educação e o treino são um pilar essencial, pois é onde a compreensão inicial da importância da filosofia do TPM é obtida, seguida pela compreensão do desempenho adequado dos processos, do correto manuseamento das máquinas e do rigor dos

padrões. Visa, assim, melhorar as competências dos colaboradores da produção e da manutenção, através da ênfase nos seguintes aspetos:

- Passos para a manutenção de primeira linha;
- Utilização de ferramentas;
- Manutenção de transmissões;
- Prevenção de fugas;
- Manutenção dos equipamentos pneumáticos e hidráulicos;
- Manutenção de sistemas elétricos.

O pilar da gestão inicial refere-se ao controlo de determinado equipamento em fase de projeto e comissionamento, devendo ter-se em consideração os seguintes pontos:

- Determinação dos objetivos de projeto e de desenvolvimento:
 - Fácil de produzir;
 - Fácil de garantir qualidade;
 - Fácil de manter;
- Estudo do ciclo de vida;
- Controlo inicial de equipamentos e produtos.

No que diz respeito à manutenção de qualidade, esta depreende-se pela eliminação de não conformidades de forma sistemática. As atividades de manutenção da qualidade servem para estabelecer condições que impeçam qualquer defeito de qualidade, ou seja, o ajuste gradual dos sistemas e componentes do equipamento é alcançado durante a implementação do TPM, o que resulta em comportamentos menos variáveis da máquina, criando assim processos estáveis com qualidade estável. Considera-se, assim, os seguintes aspetos:

- Confirmação do padrão para as características da qualidade, reconhecimento das causas e dos defeitos, bem como a avaliação dos seus valores reais;
- Garantia de qualidade do produto;
- Análise do processo e da sua influência na qualidade;
- Investigação e análise das situações de inconformidade;
- Determinação da influência da mão-de-obra, do material e máquinas na qualidade.

No pilar de administração traduz-se em atividades de manutenção autónoma e implementação de medidas de melhoria individual e contínua. Os departamentos administrativos têm como principais tarefas reunir, processar e distribuir informação, sendo que a análise de processo deve ser aplicada para otimizar o fluxo de informação.

Quanto à saúde, segurança e ambiente refere-se á implementação de medidas de segurança para a proteção dos colaboradores no que diz respeito aos acidentes de

trabalho, a promoção de um ambiente de trabalho saudável, bem como os cuidados com a higiene e saúde dos colaboradores.

Para Cabral (2006) este método não traz técnicas novas, porém, o mérito deste consiste em harmonizar uma grande variedade de técnicas proporcionando incríveis resultados. Os resultados alcançados com a implementação desta metodologia podem ser divididos em duas categorias: os resultados tangíveis e os intangíveis.

Entende como resultados tangíveis:

- Alcançar zero-avarias;
- Redução dos tempos de paragem de produção;
- Diminuição dos defeitos de qualidade;
- Redução / Eliminação dos acidentes de trabalho;
- Economia de energia e outros recursos;
- Incremento da produtividade.

Já os resultados intangíveis são:

- Melhoria da imagem da empresa;
- Aumento da motivação;
- Criação de um bom ambiente corporativo.

Para Cabrita e Silva (2002) o sucesso da implementação da metodologia TPM depende da valorização dos recursos humanos da organização, o que exige níveis de formação distintos, tanto em intensidade como em conteúdo, consoante o nível técnico e hierárquico a que se destina.

2.3.2 Modelo RCM

A metodologia RCM (*Reliability Centred Maintenance*) surgiu da necessidade de sintetizar os novos avanços e desafios da manutenção num modelo coerente, que permitisse aplicar os inovadores recursos disponíveis, de uma forma mais racional. É considerada uma metodologia eficaz, uma vez que se baseia nesta filosofia de trabalho e promove a convergência de objetivos e de esforços da função produção e da função manutenção, tendo sido já amplamente testada durante um longo período de tempo, e em vários segmentos da indústria. (Cabrita & Silva, 2002)

Este modelo baseia-se na criação de grupos de trabalho multidisciplinares e multifuncionais, provenientes das áreas da manutenção e da produção, e de diversos níveis hierárquicos dentro da organização (Smith & Hinchcliffe, 2016). Estes devem ser alvo de uma formação inicial da metodologia RCM e nas respetivas técnicas aplicáveis, devendo ser apoiados por um especialista no modelo, que identificam, em primeiro lugar, as avarias críticas dos equipamentos que não afetam de imediato a produção, e

por consequente, não têm efeitos imediatamente visíveis, mas podem resultar em graves consequências operacionais e económicas.

A etapa seguinte consiste em analisar de forma sistemática e estruturada as consequências dessas avarias na segurança de bens e pessoas, na continuidade do processo e no ambiente, através de uma metodologia que recorre a programas informáticos e algoritmos que estudam as avarias dos equipamentos, o que permite à Organização estabelecer a política de manutenção mais vantajosa a aplicar a cada equipamento ou à instalação em causa. (Cabrita & Silva, 2002)

O modelo RCM promove, assim, a aplicação de políticas de manutenção fundamentadas no conhecimento completo das funções do equipamento, no seu contexto operativo e no conhecimento profundo dos seus tipos de falha bem como as suas consequências, tendo em conta os seguintes princípios (Smith & Hinchcliffe, 2016):

- A função e o contexto do sistema / equipamento é o fator mais importante;
- Analisar as avarias funcionais e respetivo tipos e efeitos através de metodologias como a FMECA (*Failure Modes Effects and Criticality Analysis*);
- Consequências das avarias na segurança, no ambiente e na produção (avaliação de riscos);
- Definição da política de manutenção aplicando a metodologia específica da RCM à informação previamente obtida, recorrendo às seguintes ações:
 - Manutenção preventiva, que visa antecipar as falhas antes que estas causem impactos significativos;
 - *Default*, quando não é possível determinar ações preventivas, e que incluem inspeções periódicas e o cálculo da sua periodicidade efetuadas aos sistemas de proteção;
 - Manutenção corretiva e modificações, aplicadas quando a falha já ocorreu ou quando são necessárias modificações no sistema.

Segundo os mesmos autores, a Manutenção Centrada na Fiabilidade procura garantir que o equipamento desenvolva as funções desejadas, segundo padrões especificados e levando em consideração o seu contexto operacional, integrando a Função Produção como fator determinante na definição de políticas de manutenção. Desta forma, pode considerar-se que a RCM se baseia nos seguintes princípios:

- A função do sistema ou componente é o mais importante;
- Alguns equipamentos apresentam diferentes formas de falha, desde as que não afetam a função, até às que podem causar uma catástrofe;
- É necessário priorizar e só executar manutenção preventiva nos equipamentos cuja função é prioritária;

- Utilizar manutenção preventiva sistemática somente quando a substituição aumentar a fiabilidade do equipamento;
- Dar ênfase à manutenção condicionada;
- Analisar as funções e os modos de falha através de grupos multifuncionais de trabalho.

Conclui-se assim que a RCM se caracteriza por ser uma estratégia organizacional, da área da manutenção, que incentiva o conhecimento a todos os níveis hierárquicos, o que constitui uma mais-valia no processo produtivo e leva a uma melhoria contínua do desempenho das instalações, através da participação de toda a organização, resultando numa maior disponibilidade, fiabilidade e, conseqüentemente, numa otimização dos custos operacionais, além de incluir aspetos relacionados com a segurança e o meio ambiente.

2.3.3 Manutenção Baseada na Condição (CBM)

A Manutenção Baseada na Condição (*Condition Based Maintenance, CBM*) caracteriza-se por ser uma política de manutenção que define as operações de substituição dos componentes com base na condição atual e na previsão da sua condição futura. Segundo Gulati e Smith (2009) na manutenção baseada na condição avalia-se a condição de um ativo realizando monitorização periódica ou contínua de determinados parâmetros do ativo.

Apresenta, assim, como principais objetivos:

- Aumentar a disponibilidade dos equipamentos, reduzindo as paragens forçadas e aumentando a fiabilidade do sistema;
- Aumentar o tempo de vida dos equipamentos, reduzindo o desgaste provocado por sucessivas reparações, minimizando o impacto da montagem e desmontagem de componentes através da deteção em tempo real dos problemas a eles associados;
- Reduzir os custos de manutenção, reduzindo os custos de reparação, a necessidade de horas extraordinárias e a quantidade de *stock* em inventário.

Segundo Marquéz e Herguedas (2004) para se realizar uma análise através da metodologia CBM é necessário efetuar um estudo detalhado da fiabilidade dos equipamentos e dos custos associados à sua manutenção, bem como um levantamento adequado dos modos e das taxas de falha, criticidade dos equipamentos e benefícios de cada tipo de manutenção. Deste modo, a metodologia CBM pode envolver:

- Inspeções gerais executadas semanalmente;
- Inspeções mensais detalhadas;

- Informação geral do equipamento;
- Parâmetros de funcionamento em tempo real;
- Anormalidades detetadas em tempo real.

Para aplicar o método CBM é necessário, também, determinar os parâmetros de prognóstico, ou seja, os parâmetros de desgaste e deterioração, que são utilizados como indicadores para a deliberação dos intervalos de manutenção necessários para evitar a ocorrência de falhas catastróficas nos sistemas. Os parâmetros determinados são medidos através de um conjunto de técnicas como análise de óleos, medição de vibrações, consumo de combustível, ambiente de operação, entre outras formas. É com base nestes resultados obtidos que se definem os intervalos de Manutenção a aplicar ao equipamento.

A Manutenção Baseada na Condição apresenta diversos benefícios, nomeadamente permitir caracterizar em tempo real o estado do equipamento em estudo, reduzir os tempos de paragem dos equipamentos devido à deteção antecipada de potenciais falhas, aumentar a capacidade de resposta às avarias e aumentar a eficiência produtiva dos equipamentos.

3 Gestão de Ativos Físicos

De acordo com a norma NP ISO 55000 (2024) um ativo corresponde a um bem, uma coisa ou uma entidade que tem valor potencial ou real para uma organização. O valor do ativo difere em conformidade com as diretrizes das diferentes organizações e partes interessadas, e pode ser classificado como tangível ou intangível, financeiro ou não financeiro. Os ativos normalmente referem-se a equipamentos, *stocks* e propriedades na posse da organização.

A gestão de ativos consiste nas atividades e práticas sistemáticas e coordenadas através das quais uma organização gere de forma otimizada e sustentável os seus ativos e sistema de ativos e os seus desempenhos, riscos e custos ao longo do ciclo de vida destes, com o objetivo de concretizar o plano estratégico da organização. Este género de gestão permite que averiguar as necessidades e desempenho dos ativos a diferentes níveis. Permite, também, que seja realizada uma abordagem analítica de gestão ao longo das várias fases do ciclo de vida do ativo, iniciando-se no momento da tomada de consciência da sua necessidade até à sua desativação.

A nova visão de gestão de ativos definida pela norma mencionada, permite às organizações que se inserem em mercados muito competitivos com índices de desempenho elevados atingirem as suas metas por meio da integração de todas as áreas da organização de modo que cada uma delas identifique a sua função dentro da estrutura e como contribuirá para a criação de valor através dos ativos.

Segundo ICA (2015) a gestão de ativos físicos resulta numa prática clara de renovação de ativos que devem ser substituídos não somente quando estão irremediavelmente danificados, mas também nas seguintes situações:

- Quando os custos operacionais e/ou de manutenção durante a vida remanescente do ativo excedem o custo de substituição;
- Quando há risco iminente de falha do ativo;
- Sempre que o impacto de uma provável falha supera o custo de substituição;
- Quando uma provável falha pode comprometer a fiabilidade e a segurança do sistema e pessoas;
- Quando os ativos se tornarem obsoletos e ineficientes para operar e manter o negócio;
- Sempre que os ganhos com a substituição implicam uma melhoria de indicadores relativos à segurança de pessoas, do meio ambiente e desempenho da empresa;

Na Figura 3.1 estão representados os quatro princípios da gestão de ativos.

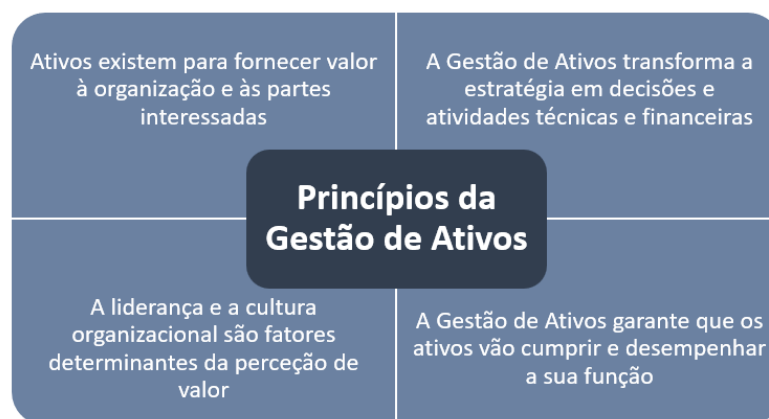


Figura 3.1 - Princípios da Gestão dos Ativos Físicos

Fonte: Adaptado de (ICA, 2015)

Considerando a premissa que um ativo é o que gera valor para a organização, considera-se que um ativo é classificado como crítico ao gerar maior valor cumprindo o objetivo estabelecido. O facto de se considerar um ativo crítico, também está relacionado com a importância deste, da sua função e das consequências da sua ausência ou falha. Estes ativos sofrem por parte da organização um controlo mais efetivo.

Segundo a norma NP ISO 55000 (2024), a organização deve estabelecer documentação e manter um plano de gestão para seguir a estratégia definida em conformidade com a linha de atuação de gestão de ativos, de acordo com o objetivo estabelecido pela mesma e de forma a alcançar as metas estabelecidas, através das seguintes atividades realizadas durante toda a vida do ativo. Desta forma, é necessário que seja tido em consideração o ciclo de vida de um ativo pois esta é um conceito-chave no que diz respeito à Gestão de Ativos. A Figura 3.2 representa as quatro fases do ciclo de vida um ativo.



Figura 3.2 - Ciclo de Vida do Ativo

Analisando cada uma das 4 fases do ciclo de vida do ativo representadas, obtém-se a seguinte informação:

- Aquisição, envolve o processo de seleção, compra e implementação de novos ativos, este processo inclui, também, a análise dos custos totais ao longo da vida útil do ativo;
- Comissionamento, abrange todas as atividades da instalação / criação ou construção do recurso e garante que seja totalmente funcional.
- Operação, é normalmente a maior parte do ciclo de vida de um ativo durante o qual ele opera na função para a qual foi projetado. Durante este período, o ativo deve estar sujeito a monitoramento, manutenção, remodelação e atualização potencial para atender a qualquer alteração na condição ou requisito operacional.
- Abate ou Desativação, envolve o planeamento do abate ou desativação do ativo quando este está no fim do seu ciclo de vida, neste planeamento deve ser considerado o impacto ambiental e os custos;

A Gestão de Ativos apresenta diversos benefícios para uma organização, pois permite que esta maximize o valor dos seus ativos físicos, minimizando custos e riscos associados. Em seguida estão listados alguns benefícios da Gestão de Ativos para a organização:

- Redução de Custos, ao otimizar a manutenção e operação dos ativos, é possível reduzir significativamente os custos operacionais;
- Melhoria da Fiabilidade e do Desempenho, através da gestão eficiente, os ativos são mantidos em condições ótimas de funcionamento, o que aumenta a sua fiabilidade e desempenho;
- Aumento da Vida Útil dos Ativos, com a definição de estratégias de manutenção com base na gestão dos ativos, a vida útil destes pode ser prolongada, o que diminui a probabilidade do ativo ser substituído;
- Facilidade na Tomada de Decisões, a recolha de dados sobre os ativos e análise dos mesmo para monitorizar o desempenho destes permite que a tomada de decisão seja realizada de forma mais informada e estratégica.

3.1 RAMS

O conceito RAMS, *Reliability, Availability, Maintainability, and Safety* (Fiabilidade, Disponibilidade, Manutibilidade e Segurança) consiste num conjunto de técnicas, metodologias e ferramentas relacionadas com os conceitos de fiabilidade,

disponibilidade, manutibilidade e segurança, aplicadas ao longo da vida de um ativo físico, com a finalidade de potenciar o seu desempenho e criar condições para uma exploração eficiente com a redução de riscos de acidentes. Na Figura 3.3 estão representados os conceitos abrangidos no RAMS bem como uma descrição dos mesmos.



Figura 3.3 - Conceitos associados ao RAMS

Os quatro conceitos representados, quando interligados entre si, formam uma abordagem integrada de forma a garantir que um sistema / ativo funcione de forma expectável ao mesmo tempo que é seguro na sua operação.

O RAMS pode ser caracterizado como um indicador qualitativo e quantitativo do grau de fiabilidade, disponibilidade e segurança em que uma unidade de produção e os seus respetivos ativos operam, sendo uma abordagem integrada para avaliar e otimizar o desempenho dos sistemas complexos. (Kurtulus & Arikan, 2019)

A implementação do RAMS deve ser realizada nas primeiras fases do projeto e obriga à elaboração de protocolos de informação que garantem a partilha de informação de forma ágil e rigorosa, e exige uma plataforma comum, não só de partilha de dados, mas também de normalização para a interação de todas as ferramentas e técnicas aplicadas em consonância com os quatro conceitos. Para tal é essencial a organização

e estruturação de todos os ativos de forma a garantir abordagens coerentes e evitar incorreções.

Para a implementação correta do RMAS é necessário seguir os seguintes tópicos:

- Definir o RAMS em termo de fiabilidade, disponibilidade, manutibilidade e segurança e as suas interações;
- Definir um processo, baseado no ciclo de vida do sistema e nas suas tarefas, para a gestão do RAMS;
- Definir como os conflitos entre os elementos RAMS sejam controlados e geridos com eficiência;
- Definir um processo sistemático para especificar os requisitos do RAMS e para demonstrar que estes requisitos são alcançados.
- Definir os objetivos, quantidades, requisitos ou soluções específicas para o RAMS de aplicações particulares;
- Definir o processo de aprovação pelas autoridades responsáveis pela regulamentação da segurança.

Este conceito relaciona-se com a Gestão de Ativos devido a, tal como a Gestão de Ativos, permitir garantir aa otimização do desempenho dos ativos, contribuir para uma redução de custos e permitir aumentar a vida útil dos ativos dentro da organização.

O conceito RAMS corresponde, assim, à necessidade das organizações em maximizarem os seus ativos físicos, tornando-se fundamental como uma metodologia que garanta o máximo desempenho possível do equipamento, de forma segura sem causar riscos de acidentes, sem falhas nem tempos de paragens, reduzindo assim os custos de exploração, controlando e mantendo todos os indicadores nos valores definidos pela empresa durante toda a sua vida útil contribuindo para que a gestão de ativos alcance os seus objetivos.

3.2 Disponibilidade

“... a fiabilidade está relacionada com a variabilidade e com as situações dos sistemas ao longo do tempo, então, uma das vertentes que relacionam a fiabilidade com a manutenção tem a ver com os períodos durante os quais os sistemas reparáveis não estão em condições de funcionar. Surge, assim, o conceito de *disponibilidade*.” (Didelet & Sena, 2012)

O termo Disponibilidade aparece vulgarmente caracterizado por ser a noção de tempo durante o qual determinado equipamento estará disponível para operar. Segundo Moubray (2017) a disponibilidade é a capacidade de um elemento estar em condições de executar uma dada função num dado instante ou durante um intervalo de tempo

determinado, tendo-se em conta a combinação da sua fiabilidade, da sua manutibilidade e da respetiva logística de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados.

A norma NP EN 13306 (2021) define a disponibilidade como a aptidão de um bem para cumprir uma função requerida sob determinadas condições, num dado instante ou durante um dado intervalo de tempo, assumindo que é assegurado o fornecimento dos necessários recursos externos. Esta aptidão, por sua vez, depende da combinação da fiabilidade, número de falhas e da manutibilidade, da rapidez com que as falhas são reparadas, conforme representado na Figura 3.4.

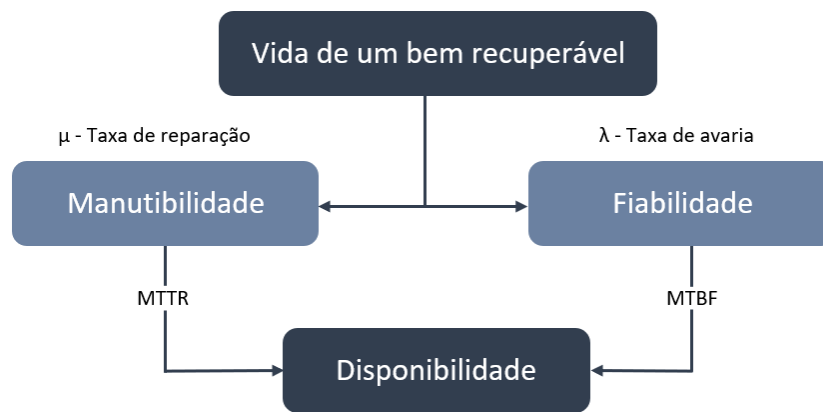


Figura 3.4 - Relação da Disponibilidade de um Ativo

Nesta perspetiva, a disponibilidade é uma função relacionada com a frequência em que o sistema falha (fiabilidade) e com a quantidade de tempo que leva a repor o sistema operacional após a falha ocorrer (manutibilidade), pelo que a alta fiabilidade (MTBF elevado) proporciona uma diminuição na ocorrência de falhas, o que resulta no aumento de tempo de operação contínua dos ativos, melhorando, assim, a disponibilidade destes. Por outro lado, a alta manutibilidade (MTTR baixo) reduz o tempo necessário para reparações e ações de manutenção, diminuindo o tempo de inatividade do ativo e, conseqüentemente, um aumento na disponibilidade deste. Conclui-se, assim, que para maximizar a disponibilidade de um ativo é necessário aumentar a fiabilidade deste bem como a sua manutibilidade, ou seja, prevenir as falhas ao mesmo tempo que se garante que em caso de ocorrência a resposta da manutenção é rápida e eficaz. A relação entre disponibilidade, fiabilidade e manutibilidade está representada na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 - Relação entre Fiabilidade, Manutibilidade e Disponibilidade

Fiabilidade	Manutibilidade	Disponibilidade
=	↓	↓
=	↑	↑
↑	=	↑
↓	=	↓

Analisando a Tabela, verifica-se a relação anteriormente explicada, sempre que a fiabilidade aumenta ou diminui, mantendo-se a manutibilidade constante, a disponibilidade acompanha a tendência da fiabilidade. O mesmo verifica-se quando a fiabilidade se mantém constante e a manutibilidade aumenta ou diminui, a disponibilidade acompanha a tendência da manutibilidade.

Sendo a disponibilidade um reflexo da fiabilidade e da manutibilidade, Dhillon B. (2006) definiu princípios gerais de cada um dos conceitos que influenciam a disponibilidade, conforme representado na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 - Princípios Gerais da Manutibilidade e da Fiabilidade

Fonte: Adaptado de (Dhillon, 2006)

Manutibilidade	Fiabilidade
Reduzir os custos de manutenção durante o ciclo de vida	Maximizar o uso de peças normalizadas
Reduzir a quantidade, frequência e complexidade das tarefas de manutenção necessárias	Utilização de menos componentes para executar múltiplas funções
Reduzir os tempos médios de reparação	Relevar a simplificação no projeto
Determinar a extensão de manutenção preventiva a ser executada	Fornecer os coeficientes de segurança adequados para valores de forças e picos de tensão
Facultar a máxima permutabilidade	Fornecer projeto livre de falhas
Reduzir a quantidade de fornecedores requeridos	Fornecer redundâncias quando requerida
Reduzir ou eliminar a necessidade de manutenção	Minimizar tensões em componentes e peças
Considerar os benefícios de projeto de substituição modular comparado com reparação de peças ou conceito de produto descartável	Utilizar peças e componentes com fiabilidade comprovada

3.2.1 Fiabilidade

“A redução do desempenho do equipamento, que traz a diminuição da qualidade e da produtividade, pode ser evitada com políticas adequadas de manutenção que garantam a eficiência do equipamento. A falta dessas políticas, além da redução da capacidade de processo, acarreta paragens do equipamento, reduzindo a sua disponibilidade. A disponibilidade dos equipamentos depende da fiabilidade e da manutibilidade por eles apresentadas.” (Marcorin & Lima, 2003)

O conceito de fiabilidade tem sido aplicado ao longo dos tempos na engenharia devido a permitir obter-se respostas a questões como quantas horas ou quantos ciclos o equipamento irá funcionar sem haver necessidade de intervenção de manutenção, ou quando irá ser necessário a substituição de um componente antes de este falhar.

De acordo com a norma NP EM 13306 (2021) a fiabilidade é a aptidão de um bem para cumprir uma função requerida sob determinadas condições, durante um dado intervalo de tempo. Sobral (2010) define a fiabilidade como uma ciência que fornece as ferramentas teórico-práticas, onde a probabilidade e a capacidade de componentes, sistemas ou equipamentos de modo a satisfazerem as funções requeridas durante determinados períodos sem avaria, em ambientes específicos, e dentro de certos intervalos de confiança, podem ser especificadas, projetadas, previstas, testadas e demonstradas.

Enquanto Fogliatto e Ribeiro (2011) afirmam que no seu sentido mais amplo, a fiabilidade está associada à operação bem-sucedida de um produto ou sistema na ausência de quebras ou falhas. De um ponto de vista prático, o termo fiabilidade está diversas vezes associado ao termo “qualidade” e “confiança”, à qualidade porque o ativo resiste às más práticas, erros ou omissões, passando uma imagem de infalível, apresentado em toda a sua vida útil poucos ou nenhuns problemas, e à confiança porque o ativo dá garantias de funcionar a longo prazo e durante longos períodos como esperado e desejado.

Para Ebeling (2020) os fatores que influenciam a fiabilidade de um sistema são:

- Projeto do sistema;
- Qualidade dos componentes;
- Processo de fabrico;
- Funcionamento do conjunto e condições operacionais;
- Políticas e ações da manutenção;
- Operação dos equipamentos.

Na Figura 3.5 estão representados os principais fatores que influenciam a fiabilidade em duas fases da vida de um ativo, a fase de projeto e fabrico em que são necessárias tomar decisões importantes relativas à qualidade de materiais e processos de um ativo

relacionados com a fiabilidade do mesmo, e a fase de exploração em que as opções escolhidas para diferentes estratégias e modos de utilização do ativo, assim como o contexto em que ele está inserido influenciam a fiabilidade do ativo.

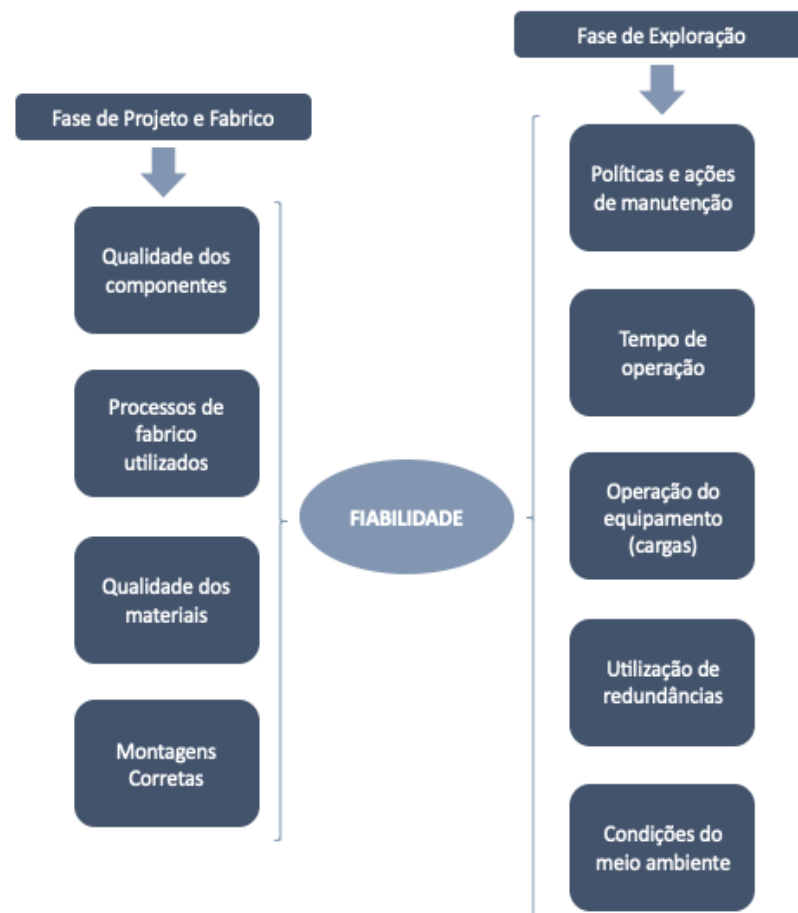


Figura 3.5 - Principais Fatores que influenciam a fiabilidade nas fases de Projeto e Fabrico e Exploração

Segundo Assis (2014), ao pressupor-se que qualquer ativo deve funcionar em condições que proporcionem a maior eficácia, segurança e economia dos meios, é necessário percorrer três etapas:

1º Etapa

- Medir: dedução da expressão de fiabilidade adequada a cada tipologia de órgão e investigação do seu resultado. O cálculo inicia-se com cada componente elementar, prosseguindo depois, tendo em consideração as inter-relações dos vários componentes, através dos diversos níveis superiores de integração, até ao nível de todo o conjunto;

2º Etapa

- Melhorar: com todas as interdependências da fiabilidade do órgão compreendidas, deve-se procurar as formas mais adequadas conducentes à

melhoria da fiabilidade global, balizadas por compromissos de custo e de segurança;

3ºEtapa

- Otimizar: maximização da fiabilidade do órgão, considerando-se como adquiridos um determinado peso, volume, custo e disponibilidade ou, inversamente, para uma fiabilidade fixada como objetivo, minimizar aquelas restrições.

Segundo Blanchard (2016) a fiabilidade é medida pelo tempo médio entre avarias – MTBF – em função do tempo de serviço. Desta forma, a fiabilidade está diretamente relacionada com o tempo, pelo que quando este tende para infinito a probabilidade de falha tende para a unidade, ou seja, a falha acontecerá sempre independente do tempo que demore a acontecer, e a fiabilidade é sempre decrescente ao longo do tempo, isto é, tende para zero.

Assim, num dado momento t , a probabilidade de sucesso de um determinado ativo é dada por:

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N_0} \quad (3.1)$$

por sua vez a probabilidade de falha é dada por:

$$F(t) = \frac{N_F(t)}{N_0} \quad (3.2)$$

N_0 – número de equipamentos todos iguais nas mesmas condições, no momento $t=0$;

N_s – número de equipamentos sem falhas no momento t ;

N_F – número de equipamentos falhados no momento t ;

$R(t)$ – probabilidade de sucesso

$F(t)$ – probabilidade de falha

Em sentido lato, a fiabilidade está, assim, diretamente relacionada com a operação ser bem-sucedida, sem a presença de falhas do ativo, pelo que a probabilidade de sucesso tende a diminuir com o tempo, enquanto a probabilidade de falha aumenta com o tempo, sendo estas duas probabilidades complementares:

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (3.3)$$

Desta forma, verifica-se que a medida que o tempo, t , aumenta:

- $R(t)$ vai diminuindo até atingir o seu valor mínimo, igual a zero;
- $F(t)$ vai crescendo até ao seu valor máximo.

Segundo a norma NP EN 13306 (2021) a Fiabilidade, em termos práticos e aplicada à área operacional, é calculada através do MTBF e da função exponencial. Esta função exponencial é válida quando as falhas são aleatórias, a taxa de avarias é constante e seguem uma distribuição exponencial, sendo a Fiabilidade calculado da seguinte forma:

$$R(t) = e^{-\frac{t}{MTBF}} \quad (3.4)$$

Onde:

$R(t)$ – Fiabilidade no tempo;

t - Tempo de operação;

MTBF - Tempo Médio entre Falhas;

Neste cálculo de Fiabilidade assume-se que a função taxa de falhas, que permite determinar o número de falhas que ocorrem por tempo unitário, é constante. Esta função é calculada pela equação:

$$\lambda = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.5)$$

Contudo, a Fiabilidade de um determinado ativo para um dado período de tempo pode ser aproximada, especialmente em cenários industriais como é o caso do Caso de Estudo analisado no Capítulo 6, pela razão entre o tempo em que o ativo esteve operacional (ou o número de eventos sem falhas) e o total de tempo de operação ou o total de eventos. Neste caso, a Fiabilidade pode ser calculada pela quantidade de operações sem falhas e quantidade total de operações:

$$R(t) = \frac{\text{Número de Operações sem Falhas}}{\text{Numero Total de Operações}} \quad (3.6)$$

Esta abordagem torna-se prática devido a não ser necessário o uso de funções matemáticas complexas, sendo especialmente útil em ambientes industriais onde os dados de MTBF e MTTR estão prontamente disponíveis, permitindo uma estimativa direta e simples da Fiabilidade do ativo físico.

3.2.1.1 Qualidade

Os conceitos de qualidade e fiabilidade estiveram sempre, ao longo do tempo, associados, resultando em alguma confusão sobre o significado de cada conceito e a sua aplicação ao estado e situação do ativo. Deste modo, a fiabilidade incorpora a passagem do tempo ao contrário da qualidade que se caracteriza por ser uma análise estática do ativo. A qualidade, é assim, uma propriedade que pode alterar-se ao longo

da vida de um produto ou serviço. A definição de qualidade pode ser subdividida em duas partes:

- capacidade de projetar produtos que enquadrem características que atendam às necessidades dos utilizadores;
- capacidade de redução da variabilidade.

Em ambos os conceitos, são consideradas as características e aspetos de um produto que tornam possível a satisfação das necessidades implícitas e explícitas associadas ao produto, ou seja, o cumprimento das especificações de um projeto de manufatura com a menor variabilidade possível. Desta forma, a norma NP EN 13306 (2021) define a qualidade, em termos de manutenção e gestão de ativos, como a capacidade de o ativo atender às especificações e requisitos técnicos estabelecidos, em termos de conformidade com as especificações, a eficiência e eficácia com que o ativo realiza a função para o qual foi projetado, em termos de desempenho, e a capacidade de um ativo de operar sem falhas e de manter o seu desempenho ao longo do tempo, em termos de fiabilidade e durabilidade.

Segundo Didelet e Sena (2012) a qualidade é uma forma de garantir a fiabilidade dos bens produzidos visto que a não fiabilidade tem custos elevados, nomeadamente, na devolução do produto, na perda do mercado com a consequente degradação da imagem de marca e na manutenção em si. A qualidade deve ser, assim, garantida durante o fabrico para que o produto seja de utilização segura ao longo do seu tempo de vida útil. Deste ponto de vista, existem diferentes processos de garantir a qualidade dos produtos fabricados, sendo a qualidade uma das formas de garantir a fiabilidade.

A Qualidade caracteriza-se por ser um fator crítico na manutenção devido a influenciar diretamente a fiabilidade do ativo e, conseqüentemente, a sua disponibilidade e desempenho. Desta forma, a gestão da qualidade assenta na conciliação de diversos fatores de três áreas principais da qualidade que consolidados permitem obter a qualidade da manutenção, conforme representado na Figura 3.6.



Figura 3.6 - Fatores da Qualidade nas três áreas principais

Segundo Cabral (2006) não existe garantia de qualidade sem um bom apoio da manutenção e a certificação da qualidade na organização passa pela auditoria ao sistema de manutenção. É curioso notar que as auditorias para certificação da qualidade são muitas vezes, a pedra de toque para implementar um sistema de gestão da manutenção.

3.2.2 Manutibilidade

“Em fiabilidade o enfoque está em conceber um sistema ou um equipamento que dure o mais possível (ou um tempo pré-determinado) sem falhas; em manutibilidade o enfoque está em conceber um sistema ou um equipamento que em caso de falha, seja reparado o mais rapidamente possível.” (Assis, 2014)

A manutibilidade está diretamente relacionada com a eficiência, a segurança e o custo com que as atividades de Manutenção são executadas para restaurar a condição inicial de bom funcionamento de um ativo. A manutibilidade é, assim, uma das dimensões a considerar na fase de conceção de um sistema com o objetivo de conseguir a sua eficácia, ou seja, a sua aptidão geral para cumprir uma determinada missão. Desta forma, a manutibilidade é essencialmente uma característica de conceção e de fabricação. Segundo Assis (2014) a manutibilidade é a capacidade de um sistema ser mantido em boas condições operacionais, é um parâmetro do *design* do sistema. Já para Cabral (2006) a manutibilidade é a aptidão de um bem em condições de uso específicas para ser mantido ou restaurado de tal modo que possa realizar as funções que lhe são exigidas quando a manutenção é realizada em condições definidas utilizando procedimentos e recursos prescritos. Segundo Moubrey (2017) a manutibilidade não depende apenas da engenharia de projeto, mas também dos

procedimentos de manutenção definidos, dos recursos adequados e do ambiente de operação.

A NP EM 13306 (2021) define, assim, a manutibilidade como a aptidão de um ativo, sob condições de utilização definidas, para ser mantido ou restaurado, de tal modo que possa cumprir uma função requerida, quando a manutenção é realizada em condições definidas, utilizando procedimentos e recursos prescritos.

Manutibilidade é a quantificação da capacidade de um ativo, expressa por probabilidade, de proporcionar as melhores condições, criadas por intermédio de fatores e aspetos relativos ao seu projeto e instalação a serem reparados. Sendo uma característica de *design* do sistema, pode ser expressa em termos de:

- Frequência de manutenção, probabilidade de um sistema não necessitar de manutenção mais do que x vezes num certo período, quando é operado em condições preestabelecidas;
- Tempo de manutenção, probabilidade de um sistema ser recuperado até t períodos (normalmente horas de trabalho) quando a manutenção é realizada em condições preestabelecidas de procedimentos e de recursos;
- Custo de manutenção, probabilidade do custo da manutenção de um sistema não exceder y euros num certo período, quando é operado e mantido em condições preestabelecidas.

Para quantificar a manutibilidade é utilizado o parâmetro *Mean Time To Repair* (MTTR), tempo médio de reparação, que corresponde à média dos tempos técnicos de reparação (TTR). Segundo Assis (2014) o tempo técnico de reparação corresponde ao período que medeia entre o momento em que o equipamento falha e o momento em que volta a funcionar normalmente. O TTR de um equipamento inclui quer o tempo de reparação propriamente dito quer os tempos de espera, como está exemplificado na Figura 3.7.

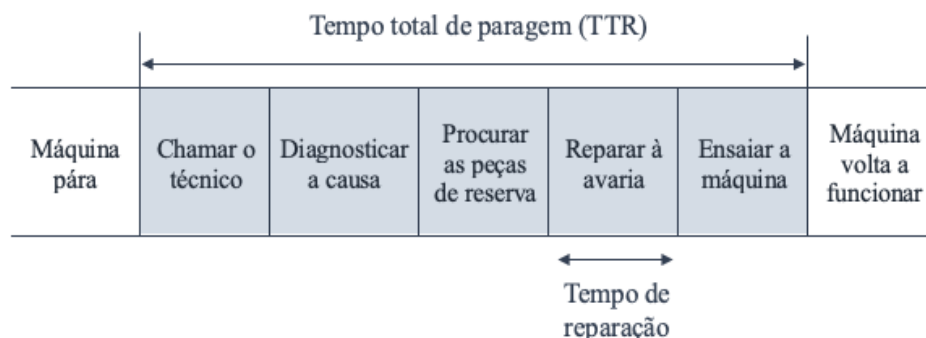


Figura 3.7 - TTR de um equipamento

Deste modo, o indicador MTTR é calculado da seguinte forma:

$$MTTR = \frac{\sum TTR}{n} \quad (3.7)$$

Onde:

n - corresponde ao número de avarias.

Do ponto de vista matemático, a manutibilidade pode ser definida como a probabilidade do tempo para realocação em serviço ser inferior a um dado tempo “t”, conforme referido anteriormente. Desta forma, a função manutibilidade é expressa pela seguinte equação:

$$M(t) = Prob(TTR < t); t > 0 \quad (3.8)$$

Segundo Dhillon (2006) a distribuição exponencial é muito utilizada para moldar os tempos de reparação, sendo a função manutibilidade calcula através da seguinte equação:

$$M(t) = 1 - e^{-\frac{t}{MTTR}} \quad (3.9)$$

Uma boa manutibilidade provém dos princípios e conceitos empregues na conceção e construção de um ativo de forma a facilitar e simplificar todas as possíveis intervenções que sejam necessárias para o seu restabelecimento em termos de operacionalidade, contudo, afiguram-se alguns fatores relevantes que possibilitam a materialização dos benefícios da manutibilidade:

- Instalação de sensores de deteção de avarias;
- Instalação de contadores de unidades de funcionamento;
- Conceção que permita o acesso fácil e rápido aos componentes e a sua pronta substituição em caso de avaria;
- Conceção que permita que as inspeções e afinações mais frequentes possam ser efetuadas com o equipamento em funcionamento;
- Limitar e homogeneizar o número de componentes dos equipamentos;
- Garantir a qualidade do serviço de assistência após venda do fornecedor;
- Disponibilidade de componentes e peças de reserva do ponto de vista do prazo de entrega, incluindo o tempo de transporte;
- Normalização dos componentes, dos equipamentos e dos sistemas.

3.3 Classificação Disponibilidade

Segundo a norma NP EN 13306 (2021) a disponibilidade pode ser dividida em dois tipos de disponibilidade: disponibilidade intrínseca, que se refere à disponibilidade de um ativo quando considerada apenas a manutenção corretiva realizada sob condições ideais; e disponibilidade operacional, a qual corresponde à disponibilidade real do ativo no ambiente operacional considerando todos os fatores, como o tempo de espera e a gestão de manutenção.

A Disponibilidade Intrínseca, depende assim, da fiabilidade e manutibilidade inerentes ao equipamento, pelo que se a variável métrica for o tempo de calendário e se considerar-se o tempo entre avarias consecutivas, a Disponibilidade Intrínseca, D_i , calcula-se da seguinte forma:

$$D_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3.10)$$

Onde, MTBF representa o tempo médio de funcionamento entre avarias e MTTR o tempo médio de reparação. Este tipo de disponibilidade reflete apenas a qualidade do equipamento.

A disponibilidade operacional, D_o , corresponde à fração de tempo total em que o equipamento se encontra disponível, a qual depende dos mesmos fatores da disponibilidade intrínseca e ainda do tempo médio de espera entre a identificação da avaria e o início da intervenção da manutenção corretiva (MWT, *Mean Waiting Time*):

$$D_o = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MWT} \quad (3.11)$$

OU

$$D_o = \frac{UT}{UT + DT} \quad (3.12)$$

Onde, UT (*uptime*) é o período em que o equipamento está em condições de ser utilizado e DT (*downtime*) é o período em que o equipamento não está em condições de ser utilizado.

Na maioria das vezes, a disponibilidade é representada em forma de percentagem, pelo que o maior valor possível para este indicador é 100, representando que o sistema se encontra disponível 100% do tempo.

A Disponibilidade Operacional depende da Disponibilidade Intrínseca, das políticas estabelecidas para a manutenção, sendo que, como referido acima, a Disponibilidade

Intrínseca depende da Manutibilidade e da Fiabilidade. A Figura 3.8 representa esquematicamente esta interdependência.

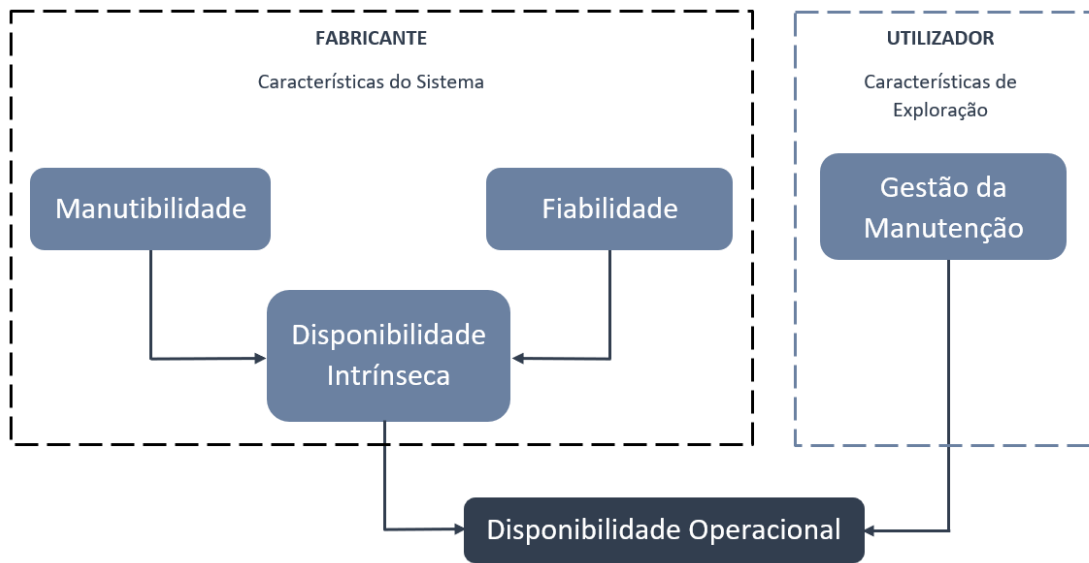


Figura 3.8 - Relação da Disponibilidade Operacional com a Disponibilidade Intrínseca e a Gestão da Manutenção

Fonte: Adaptado de (Moubray, 2017)

A interdependência representada realça que a gestão de manutenção conjugada com as boas práticas da Disponibilidade Intrínseca é a chave para melhorar a disponibilidade operacional. Enquanto a Disponibilidade Intrínseca determina a capacidade de um ativo ser operacional, através do foco na manutibilidade e na fiabilidade por parte dos fabricantes, a gestão de manutenção gere fatores externos e operacionais que impactam a Disponibilidade Operacional sendo esta desempenhada pelo utilizador do ativo. Quando conjugados estes conceitos, obtém-se uma visão abrangente da eficiência de manutenção e da operação geral dos ativos, ajudando a otimizar o desempenho dos ativos e a garantir que estes estão disponíveis conforme a necessidade de produção.

Verifica-se que a Disponibilidade Operacional é aquela que permite revelar o real estado do bem, devido a refletir, para além dos efeitos de fiabilidade e da manutibilidade, os efeitos das deficiências das estruturas e serviços de apoio nas áreas administrativas e de logística. É a disponibilidade resultante de todos os eventos que ocorrem dentro da organização a todos os níveis, operacionais e administrativos, e que se refletem na aptidão do ativo para cumprir a sua função.

A Disponibilidade operacional, apesar de não ser totalmente controlada pelos fabricantes, estes têm a capacidade de melhorar significativamente a fiabilidade e manutibilidade, contribuindo para uma melhor disponibilidade. Porém, não podem

assegurar o cumprimento das melhores práticas de utilização e manutenção, só o utilizador é capaz de realizar estas funções garantindo assim um bom desempenho operacional do ativo.

Complementarmente à função disponibilidade existe a função indisponibilidade. A indisponibilidade de um equipamento ou sistema, descreve a probabilidade deste não se encontrar operacional em um determinado período de tempo. Desta forma, a indisponibilidade é calculada pela seguinte fórmula, dependendo dos fatores considerados:

$$I = 1 - D_o \quad (3.13)$$

Ou

$$I = 1 - D_i \quad (3.14)$$

A Indisponibilidade também se revela um indicador importante na gestão de manutenção devido a quantificar o impacto das falhas e da manutenção sobre a operação dos ativos. Reduzir a indisponibilidade é um dos principais objetivos das estratégias de manutenção devido a melhorar diretamente a produtividade e a eficiência operacional.

Para minimizar a indisponibilidade, a gestão de manutenção deve focar em:

- Aumentar a Fiabilidade, reduzir a frequência de falhas;
- Melhorar a Manutibilidade, reduzir o tempo de reparação;
- Otimizar a Logística, minimizar o tempo de espera por peças e outros recursos;
- Planeamento de Manutenção Preventiva e Preditiva, para evitar falhas e minimizar o tempo de paragens devem ser realizadas ações de manutenção através de planos de manutenção segundo o calendário operacional.

O estudo da Disponibilidade e da Indisponibilidade é essencial para melhorar a eficiência, reduzir custos, aumentar a fiabilidade, tomar decisões informadas no âmbito da gestão de manutenção, melhorar a qualidade de operação e garantir a conformidade das normas. Contribui, assim, para uma operação mais eficiente e eficaz por parte da organização.

3.4 Criticidade dos Ativos

Na definição de estratégias e de políticas de manutenção, deve ter-se em consideração a criticidade dos ativos físicos em relação ao volume e à qualidade da

produção, por meio da classificação dos mesmos sob o ponto de vista do impacto da avaria, ou seja, da avaliação do efeito das avarias nos custos indiretos de Manutenção.

A definição dos equipamentos críticos é importante para evitar a redução de produtividade e de competitividade da empresa. Pode definir-se como equipamento crítico aquele que deve estar obrigatoriamente em bom estado de funcionamento, e que apresenta um grau de complexidade elevado para resolver as suas avarias. Conclui-se, assim, que um equipamento crítico é aquele que se torna essencial para a atividade produtiva da organização.

Segundo Márquez (2011) análise da criticidade dos ativos físicos permite determinar quais os ativos com maior impacto nas metas de negócio, e aumentar a fiabilidade desses mesmos ativos. A correta avaliação de criticidade dos ativos permite definir e estruturar o tipo de manutenção a ser aplicada e a abordagem de acordo com o nível de prioridade, com rigor e eficácia, otimizando os recursos e diminuindo os custos. O objetivo da análise de criticidade não passa só pela identificação da probabilidade de falha de um ativo, mas também por identificar as consequências de falha deste.

Para Cabrita e Silva (2002) o método proposto por Fernando D'Aléssio Ipinza (1991) é o mais adequado para avaliar o estado de condição de um ativo, devido à sua simplicidade de aplicação. Este método consiste na avaliação da criticidade de um determinado ativo, com o objetivo de tomar uma decisão em relação à política de manutenção a seguir para cada um dos ativos instalados na organização, através de 8 fatores de criticidade e da sua ponderação. A Tabela 3-3 representa os 8 fatores de criticidade e a sua ponderação.

Tabela 3-3 - Fatores de criticidade e a sua ponderação

Fonte: (Cabrita & Silva, 2002)

Aspetos a considerar	Situação	Pontuação	
1. Efeito na produção	Pára	4	
	Reduz	2	
	Não Pára	0	
2. Valor técnico-económico do equipamento	Alto	4	
	Médio	2	
	Baixo	1	
3. Prejuízo / consequência da avaria:			
	a) À máquina em si	Sim	2
		Não	0
	b) Ao processo	Sim	3
		Não	0
	c) Ao pessoal	Risco	1
	S/ risco	0	
4. Dependência logística	Estrangeiro	2	
	Local	0	
5. Dependência de mão-de-obra	Terceiros	2	
	Própria	0	
6. Probabilidade de avaria	Alta	1	
	Baixa	0	
7. Manutilidade	Alta	0	
	Baixa	1	
8. Flexibilidade e redundâncias	Simple	2	
	By-pass	1	
	Dupla	0	

Posteriormente à atribuição da pontuação de cada ativo, devem ser adotados como orientação para o estabelecimento da política de manutenção os valores de pontuação e criticidade indicados na Tabela 3-4. É de salientar que este método é generalista do ponto de vista aplicacional, uma vez que se verifica que os fatores de criticidade considerados, são facilmente aplicáveis/adaptáveis a diversos tipos de indústria.

Tabela 3-4 - Valores de pontuação e criticidade

Fonte: (Cabrita & Silva, 2002)

Pontuação	Aplicação de manutenção preventiva	Aplicar
20 a 22	Crítica	Manutenção Preventiva
14 a 19	Importante	Manutenção Preventiva
7 a 13	Conveniente	Manutenção Corretiva
0 a 6	Opcional	Manutenção Corretiva

Contudo, a metodologia de criticidade segue diferentes etapas, dividindo-se fundamentalmente na fase inicial, onde se contempla a formação da equipa que irá desenvolver o processo e identificação dos ativos, fase de implementação, onde se determina a criticidade, seleciona-se os ativos alvo de estudo e se atualiza os planos de manutenção e, por fim, a fase final de controlo e avaliação.

Na fase de inicial, é importante perceber os equipamentos que serão alvo de análise. Os ativos identificados segundo uma hierarquia de equipamentos bem definida, permitem um correto registo de falhas, sendo que podem ser identificáveis como equipamentos, sistemas ou componentes, de acordo com a definição apresentada na Tabela 3-5.

Tabela 3-5 - Conceitos da arborescência dos ativos

Equipamento	Constituído por sistemas, conjuntos e peças, agrupados entre si para desempenhar determinadas funções
Sistema	Integra um equipamento, pode ser constituído por um ou mais conjuntos, e é responsável por realizar uma função
Conjunto	Reunião de componentes que permitem o desempenho de uma função
Componente	Pertencente a um conjunto e, geralmente, não funcional por si mesmo

Na fase de implementação, podem ser utilizadas diversas metodologias de avaliação da criticidade, podendo estas ser qualitativas ou quantitativas, variando em função das características e critérios da empresa:

- Técnicas Qualitativas: baseadas em experiência e opiniões dos colaboradores;
- Técnicas Quantitativas: baseadas em dados históricos dos ativos, registos e outras informações.

Quando não existem dados quantificáveis ou os dados históricos que existem não são credíveis, deve recorrer-se a técnicas qualitativas, enquanto a técnica quantitativa deve ser utilizada com dados históricos credíveis e disponíveis.

3.4.1 Fluxograma ABC

O fluxograma de criticidade ABC corresponde a uma técnica qualitativa que permite avaliar a criticidade de cada ativo com base numa sequência de questões. Esta técnica possui três possíveis respostas a cada pergunta, sendo categoria A para alto impacto, B para médio impacto ou C para sem impacto. No fim, a classificação final do ativo divide-se também ela em três categorias, A, B e C. A Tabela 3-6 apresenta uma definição detalhada das três categorias.

Tabela 3-6 - *Categorias classificação final do ativo*

A	Ativos de alta importância, que não podem parar devido a qualquer falha ou suspensão das atividades prejudica a produção
B	Ativos considerados intermédios que podem causar transtornos caso não estejam no seu funcionamento normalmente, mas que não são críticos
C	Ativos que representam baixa importância na operação e cujas falhas são de baixo impacto

Para criar um fluxograma de criticidade dos ativos por base deste método é necessário seguir as seguintes etapas:

1. Identificação dos ativos

Realizar uma listagem de todos os ativos que necessitam de ser avaliados.

2. Critérios de criticidade e Fatores de avaliação

Definir os critérios de avaliação para os fatores de avaliação (por exemplo segurança e meio ambiente, qualidade, operação, condições da entrega, paragens e manutibilidade), como por exemplo, o impacto de produção, custos de reparação, frequência de falhas e o impacto na segurança

3. Elaboração do Fluxograma

Criar o fluxograma com base nos fatores de avaliação e dos caminhos a seguir de acordo com a classificação de cada fator (A, B ou C).

4. Prioridade

Atribuir os recursos de acordo com a criticidade identificada.

Desta forma, de acordo com o passo 2, é necessário criar uma base de critérios de avaliação que permita definir a classificação em cada uma das categorias (A, B ou C). Na tabela 3-7 está exemplificado a definição dos critérios de avaliação para os fatores de avaliação.

Tabela 3-7 - Critérios de avaliação de acordo com os fatores definidos

Critérios de avaliação

		A	B	C
Fatores de Avaliação	Segurança / Meio Ambiente (S)	No caso de falha provoque condição insegura pessoal e/ou patrimonial, e/ou poluição agredindo o meio ambiente e a comunidade	No caso de falha provoque poluição localizada e contida, sem agredir o meio ambiente	No caso de falha não provoque problemas de segurança e poluição
	Qualidade (Q)	No caso de falha a qualidade do produto é afetada	No caso de falha a qualidade dos produtos em processo é afetada	No caso de falha não afeta a qualidade de produtos finais ou em processo
	Operação (O)	No caso do tempo de utilização do ativo seja inferior a 50% ao mês	No caso do tempo de utilização do ativo seja superior a 50% e inferior a 90% ao mês	No caso do tempo de utilização do ativo seja superior a 90% ao mês
	Condição da Entrega (E)	No caso de falha paralisa toda fábrica	No caso de falha paralisam fornos ou um único equipamento que alimenta outros equipamentos comuns	No caso de falha não pára a fábrica ou fornos ou equipamentos que alimentam equipamentos comuns
	Paragens (P)	MTBF abaixo de 15 horas	MTBF entre 15 a 30 horas	MTBF superior a 30 horas
	Manutibilidade (M)	MTTR acima de 2 horas	MTTR de 1 a 2 horas	MTTR inferior a 1 hora

As questões abordadas no fluxograma referem-se a diferentes critérios selecionados, conforme demonstrado anteriormente. Na Figura 3.9 está representado um exemplo de aplicação de um fluxograma ABC para os fatores demonstrados na Tabela 3-7, sendo que cada letra dos losangos representa os fatores e cada letra (A, B e C) representada nas ligações corresponde ao caminho para a criticidade identificada. A classificação final está representada nos retângulos vermelhos sendo obtida com base na classificação de cada fator.

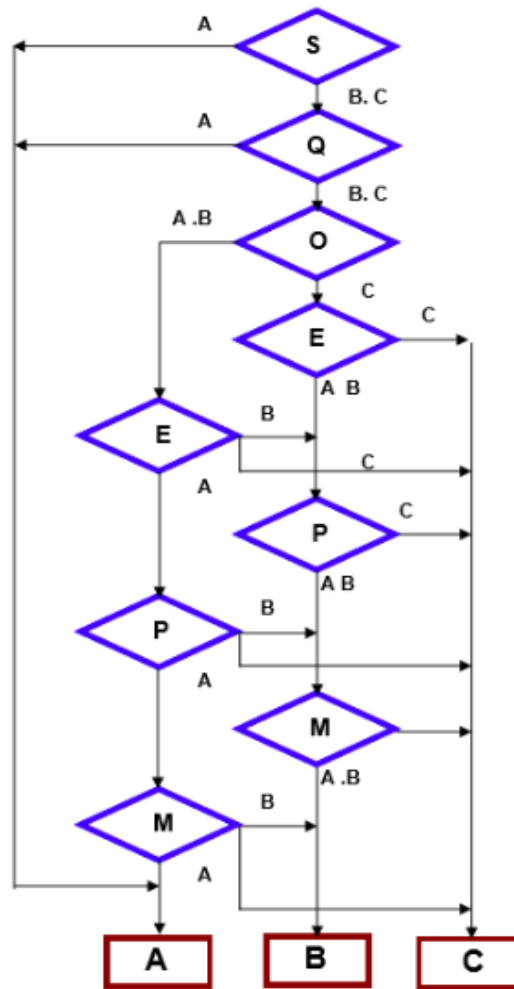


Figura 3.9 - Exemplo Fluxograma ABC

3.4.2 Método de Avaliação de Risco

A avaliação de risco é uma técnica quantitativa utilizada para avaliar os ativos mediante a sua criticidade. Nesta análise tem-se em consideração a gestão de risco que permite identificar os potenciais impactos, positivos ou negativos, de modo a definir-se os planos ideais para a sua resolução.

Este processo de análise de risco combina a probabilidade de um evento ocorrer com a respetiva consequência, assim, o risco total corresponde a soma dos riscos de critérios individuais. Os critérios pode ser custos de manutenção, facilidade de reparação, segurança, impacto ambiental, MTBF, MTTR, entre outros.

Após serem definidos os critérios, devem ser definidas as classificações de cada um deles e aplicar-se ao caso em análise. Tendo em consideração os critérios e as classificações definidas, estabelece-se os níveis de criticidade mediante intervalos numéricos. Os níveis de criticidade dos ativos dividem-se então em críticos, semicríticos e não críticos.

Depois de obtido o valor da criticidade de cada ativo, a classificação deverá ser apresentada sob a forma de tabela, constando o nome do ativo, os parâmetros de classificação e o nível de criticidade final. Na Figura 3.10 encontra-se exemplificado uma matriz de risco.

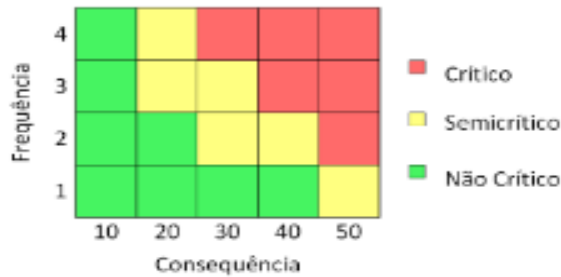


Figura 3.10 - Exemplo Matriz de Risco de Criticidade

3.4.3 Método ABC

A matriz de criticidade de um ativo permite compreender se o ativo é indispensável para a cadeia produtiva ou não, visto que tem em consideração o risco de falha do ativo o que permite identificar os potenciais impactos de modo a definir-se os planos ideias para a sua resolução.

Desta forma, o principal objetivo da matriz de criticidade é o de compreender quais os efeitos e riscos que um equipamento causa na indústria e na linha de produção, é através desta análise que se define a estratégia de manutenção a aplicar visto que existe uma pré indicação do ativo crítico e que deve ser priorizado.

O método mais utilizado para analisar a criticidade de um ativo é o método ABC, sendo que a finalidade deste passa pela definição do nível de criticidade dos ativos com o grau de importância de cada um deles, usando três critérios:

- a frequência de falhas;
- dificuldade de detecção da falha;
- impacto da falha na produção e operação do ativo.

Nas Tabelas 3-8 e 3-9 estão identificados alguns fatores considerados na avaliação de criticidade de um ativo.

Tabela 3-8 - Critérios de classificação ABC

Critérios de Avaliação				
	A	B	C	
Fatores de Avaliação	Segurança e Meio Ambiente	Alta probabilidade de acidente e de contaminação do meio ambiente	Alguns probabilidade de acidente sem envolver o meio ambiente	Probabilidade de acidente nula sem envolver o meio ambiente
	Qualidade do Produto	Diminuição drástica da qualidade	Pouca diminuição da qualidade	Sem alteração na qualidade
	Condição de Operação	Tempo de utilização do ativo superior a 90% ao mês	Tempo de utilização do ativo de 50% a 90% ao mês	Tempo de utilização do ativo inferior a 50% ao mês
	Condição de Produção	Afeta a linha de produção sem alternativa a curto prazo	Afeta a linha de produção, mas existe alternativa imediata	Não afeta a linha de produção e existe alternativa imediata
	Índice de parâmetros (Fiabilidade)	MTBF inferior a 15 horas	MTBF entre 15 a 30 horas	MTBF superior de 30 horas
	Manutibilidade	MTTR superior a 2 horas	MTTR entre 1 a 2 horas	MTTR inferior a 1 hora

Tabela 3-9 - Critérios de classificação ABC e consequência

Critérios de Avaliação				
	A	B	C	
Fatores de Avaliação	Segurança e Meio Ambiente	Acidentes pessoais, agressões ao meio ambiente e danos materiais	Exposição a riscos de acidentes sem envolver o meio ambiente	Nenhum risco
	Qualidade e Produtividade	Produtos com defeito, redução de velocidade e redução de produção	Varição da qualidade ou da produtividade	Sem implicação
	Operação	Paragem de todo o processo	Paragem de parte do processo	Sem implicação
	Taxa de Ocupação	24h por dia	Entre 12h a 24h	Inferior a 12h
	Frequência de falha	Intervalo menor que 6 meses	Em média uma vez por ano	Raramente ocorre
	Manutibilidade	O tempo e o custo de reparo são elevados	O tempo e o custo de reparo são ligeiros	O tempo e o custo de reparo são irrelevantes

Conforme indicado na tabela, a criticidade é definida por A, B ou C, sendo que:

- **Criticidade A:** estes ativos são essenciais para a organização e produção sendo que o foco dos recursos deve ser priorizado nestes de forma a evitar a perda da sua funcionalidade. Em caso de paragem destes ativos, reduz a capacidade produtiva da empresa o que pode afetar a segurança, o meio ambiente, e comprometer a qualidade do produto final, aumentando em mais de 20% os custos de manutenção;
- **Criticidade B:** estes ativos possuem médio impacto, sendo que uma falha destes não afeta a produção, nem a segurança ou a operação. Em caso de paragem destes ativos, a produção fica parcialmente afetada e os custos de manutenção variam entre 10% a 20%;
- **Criticidade C:** caso ocorra falha num dos ativos, esta não gera impacto significativo na produção e o custo é relativamente baixo;

A classificação ABC é um método fundamental para qualquer estratégia de manutenção, pois permite ajustar a estratégia de manutenção de acordo com o necessário à organização, como por exemplo:

- Criação de planos de manutenção com estratégias específicas adequadas para o ativo;
- Mapear quais as componentes que constituem o ativo facilitando o ajuste do stock;
- Organizar as ações prioritárias de manutenção de acordo com o mapa das 52 semanas;
- Estudar novos métodos para garantir a disponibilidade do ativo.

Os ativos com maior criticidade (classificação A) devem ser o foco de monitorização de condição da manutenção para identificação de falhas em estágios iniciais.

4 Metodologia de Análise de Falhas

A análise de falhas desempenha um papel essencial na manutenção de uma organização devido a possibilitar definir ações que permitam identificar falhas antes destas ocorrerem e determinar ações preventivas para evitar que estas ocorram. Utilizar métodos eficazes que permitem realizar a análise de falhas e identificar as mesmas é crucial para a organização evitar paragens inesperadas dos seus ativos, reduzir custos de manutenção, aumentar a disponibilidade e a fiabilidade dos seus ativos.

A avaliação e a criação de um relatório de análise de falhas regularmente numa organização representa diversos benefícios, tais como:

- Redução do tempo de inatividade dos ativos, a identificação antecipada de falhas permite que a organização defina medidas corretivas antes destas se agravarem e representarem um risco para a operação, minimizando, desta maneira, a interrupção da produção e aumentando a produtividade dos ativos;
- Melhorar a segurança, a análise de falhas ajuda a identificar potenciais riscos à segurança dos colaboradores da organização bem como dos ativos, contribuindo para a prevenção de acidentes e a conservação de um ambiente seguro;
- Aumentar a vida útil dos equipamentos, ao identificar e corrigir problemas em estágios iniciais, a organização consegue prolongar a vida útil dos ativos, através da redução dos custos de reparações ou de substituições e de manutenção;
- Otimização de recursos, a análise de falhas permite a alocação eficiente de recursos humanos e financeiros, garantindo que os esforços são direcionados às áreas que necessitam de maior atenção.

Para se realizar um relatório de análise de falhas é necessário recorrer a diversas ferramentas de identificação de falhas que permitam realizar uma análise pormenorizada da falha e identificar a sua causa raiz. Desta forma, no subcapítulo 4.1 será apresentada uma das metodologias utilizada para identificar falhas e solucioná-las, a metodologia RCA, devido a esta ser a metodologia utilizada na aplicação do caso de estudo analisado no capítulo 5. A apresentação desta metodologia no subcapítulo 4.1 permitirá facilitar a compreensão da forma como será aplicada no caso de estudo desta dissertação.

4.1 Root Cause Analysis (RCA)

Para todas as falhas existentes num ativo é necessário analisá-las e identificar as ações que podem ser tomadas para impedir que estas tornem a acontecer, é neste âmbito que surge a *Root Cause Analysis* (Análise de Causa Raiz). A Análise de Causa Raiz é um processo de identificação de fatores causais que utiliza uma abordagem estruturada com técnicas concebidas que permitem fornecer um rumo na identificação e resolução do problema. (Mahto & Kumar, 2008)

Uma causa raiz é definida como um fator que causou uma não conformidade e que deveria ser permanentemente eliminada por meio de um processo de melhoria (ASQ, 2024). A RCA consiste, assim, numa ampla gama de abordagens, ferramentas e técnicas, ligadas entre si e elaboradas num relatório que permitem descobrir não-conformidades que devem ser eliminadas permanentemente ou minimizadas por meio de melhorias de processo. Esta técnica pressupõe eficiência e eficácia na prevenção e resolução sistemática dos problemas subjacentes. Trata-se de um método reativo e não preventivo, devido a só ser utilizado mediante a ocorrência de uma falha ou evento.

O termo evento é utilizado para identificar, genericamente, as ocorrências que resultam ou têm potencial de resultar em problemas e impactos negativos relacionados com segurança, saúde, meio ambiente, qualidade, fiabilidade e produção resultantes das operações de processos da organização. Quando um evento ocorre, pode existir uma cadeia de relações de causa-efeito que provocam este evento, ou seja, uma hierarquia de causas / efeitos / eventos de vários níveis. Neste caso, é necessário identificar a cadeia de relações até chegar a uma ou mais causas raízes.

A RCA pertence a um conjunto de práticas da gestão da qualidade total (TQM, *total quality management*) e variações desta, como o caso do six-sigma, de forma a promover a compreensão detalhada dos eventos / falhas e das suas soluções, ao mesmo tempo que contribui para uma cultura de qualidade, melhoria contínua e satisfação do cliente. É fundamental no contexto da gestão da qualidade total por diversas razões, nomeadamente:

- Foco na prevenção de problemas, a TQM realça a importância de prevenir problemas antes que estes ocorram, em vez de apenas corrigir falhas após ocorrerem. A RCA alinha-se a este princípio ao procurar identificar e eliminar as causas raízes dos problemas / eventos, prevenindo a sua repetição;
- Melhoria Contínua, um dos pilares da TQM consiste na melhoria contínua dos processos e produtos, a RCA contribui diretamente para este objetivo, devido à identificação e resolução das causas raízes dos problemas resultarem em processos mais eficientes e menos propensos a falhas no futuro;

- Redução de Desperdícios / Custos, a TQM procura reduzir desperdícios e aumentar a eficiência. Através da identificação e eliminação da causa raiz do evento, a RCA ajuda a minimizar desperdícios, como custos de reparações, tempo perdido, manutenções excessivas, entre outras;
- Envolvimento de toda a equipa, a TQM incentiva o envolvimento de toda a equipa organizacional na procura pela qualidade. A RCA envolve uma equipa multidisciplinar para investigar falhas, aproveitando as diferentes perspetivas e conhecimentos para identificar de forma correta as causas e soluções.

A Análise de Causa Raiz também é uma das práticas de Gestão de Riscos quando se pretende prevenir possíveis riscos. A Gestão de Riscos envolve a identificação, análise, e resposta aos riscos que possam afetar um processo. A RCA complementa este processo através do fornecimento de uma metodologia que permitir entender porque determinados riscos ocorreram ou podem ocorrer, através da identificação das suas causas fundamentais. Na Tabela 4-1 estão identificados os aspetos principais que relacionam a RCA com a Gestão de Riscos.

Tabela 4-1 - Relação entre a RCA e a Gestão de Riscos

Identificação de Riscos	A RCA ajuda a prevenir novos riscos ao identificar vulnerabilidades e pontos fracos nos processos e sistemas. Ao analisar as causas dos eventos passados, é possível prever e identificar riscos semelhantes que possam ocorrer no futuro.
Análise de Riscos	Ao compreender as causas raízes de um evento / problema, a RCA ajuda a avaliar a probabilidade de ocorrência de riscos semelhantes e o impacto que estes podem ter. Isto é crucial para a priorização de riscos no processo de gestão de riscos.
Desenvolvimento de Respostas de Riscos	A RCA pode desencadear a criação de estratégias de mitigação para redução da probabilidade e o impacto de riscos identificados. Ao eliminar ou controlar as causas raízes, a organização pode minimizar a ocorrência de eventos indesejados futuros.
Melhoria Contínua	A RCA permite a análise detalhada do evento, o que se torna essencial na implementação de práticas de gestão de riscos eficazes e na prevenção de novas ocorrências.
Monitorização e Controle de Riscos	A RCA ajuda a monitorizar a eficácia das respostas aos riscos e das ações corretivas implementadas. Se ocorrerem novos eventos, a RCA pode ser novamente usada para compreender as causas e ajustar as estratégias de resposta.

Desta forma, a Análise de Causa Raiz representa, assim, diversos benefícios para o sistema de gestão de uma organização, tais como:

- Identificação do problema, a RCA ajuda a identificar as causas subjacentes de um problema, não apenas os sintomas. Quando aprofundada, permite

chegar à causa raiz o que desencadeia uma solução para o problema mais eficaz;

- Previne a recorrência, ao compreender o motivo da ocorrência da falha, é possível determinar-se medidas que evitem uma nova ocorrência da falha;
- Melhoria contínua, a RCA incentiva uma abordagem sistemática para a resolução de problemas através da análise de processos e da identificação de pontos fracos;
- Aumento da segurança, a RCA permite identificar possíveis perigos e ajuda a criar um ambiente de trabalho mais seguro;
- Desenvolvimento de conhecimento e habilidades, o processo de realização de RCA promove o pensamento crítico e as habilidades analíticas dentro da equipa, criando uma cultura de aprendizagem e adaptabilidade;
- Alinhamento estratégico, a RCA alinha os esforços de resolução de problemas com as metas organizacionais, garantindo que as soluções são consistentes com a missão e os objetivos da empresa.

A RCA pode ser utilizada, na maioria dos casos, quando se pretende solucionar um dos principais temas abaixo:

- Definição assertiva de problemas ou eventos;
- Identificação das possíveis causas de um problema ou evento;
- Identificação de possíveis soluções para um evento ou problema;
- Evitar a recorrência de um determinado problema ou evento;
- Realizar melhorias significativas nos processos;
- Calcular o grau de severidade e a probabilidade de ocorrência dos eventos.

A Análise de Causa Raiz consolida três objetivos fundamentais que devem ser alcançados na sua elaboração e beneficiam a escolha deste método para a identificação de falhas. Estes objetivos permitem estabelecer um caminho para a identificação da causa raiz da falha e elaborar medidas de prevenção ou eliminação da mesma. Os objetivos que permitem elaborar a RCA de forma consistente e pormenorizada estão representados na Figura 4.1.

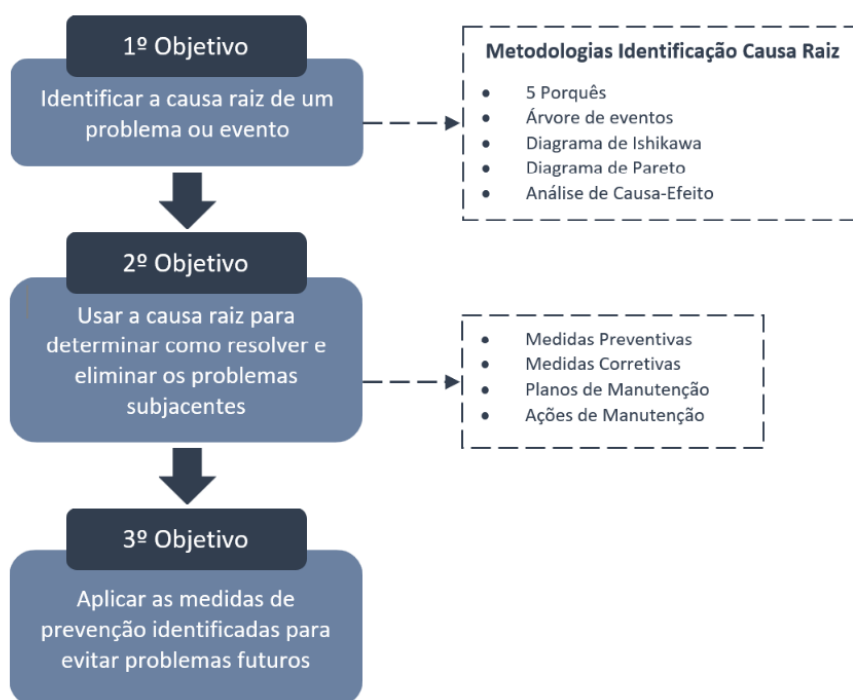


Figura 4.1 - Principais Objetivos da RCA

Na elaboração de uma RCA existem terminologias básicas fundamentais que são necessárias o responsável pela sua elaboração ter presente para garantir a qualidade da análise, pelo que na Tabela 4-2 estão representadas as terminologias essenciais para a elaboração da RCA.

Tabela 4-2 - Principais Terminologias utilizadas na RCA

Instalação	Qualquer equipamento, estrutura, sistema, processo ou atividade que cumpre um propósito específico.
Condição	Estado, resultante ou não de um evento, que pode ter adversidades a nível de segurança, qualidade, operacional ou ambiental.
Falha	Perda de capacidade de uma entidade, sistema ou componente de desempenhar a sua função.
Causa Raiz	Origem fundamental do problema, que se resolvida, pode impedir a recorrência do problema. É geralmente uma falha ou deficiência no sistema.
Fator causal	Elementos que, combinados, levaram à ocorrência do problema. Podem incluir fatores humanos, físicos / técnicas, organizacionais, processo e ambientais.

A RCA pressupõe que os sistemas e eventos estão inter-relacionados, ou seja, uma ação em uma determinada área desencadeia uma ação em outra. Analisando estas ações, pode determinar-se onde o problema começou e como se transformou na falha atual. Desta forma, as principais causas obtidas pelo RCA podem ser de 5 tipos:

- Causas Físicas, itens materiais tangíveis falharam de alguma forma. Pode incluir falhas mecânicas, defeitos de design ou obsolescência da tecnologia;
- Causas Humanas, as pessoas envolvidas podem ter falhado no processo. Podem ser erros humanos, comportamentos inadequados, falta de habilidades, formação insuficiente ou decisões erradas;
- Causas Organizacionais, falhas na cultura organizacional, estrutura de gestão, políticas ou ambiente de trabalho. Esta causa pode ser gerada por uma comunicação ineficaz, falta de supervisão, políticas inadequadas ou problemas na liderança;
- Causas Ambientais, influências externas que podem impactar negativamente a operação ou desempenho, como condições meteorológicas, desastres naturais ou outras condições ambientais;
- Causas de Processo, falhas nos processos, procedimentos mal definidos ou inexistentes, falta de padrões e não conformidade com os procedimentos estabelecidos;

O processo de elaboração de uma Análise de Causa Raiz é bastante estruturado e é necessária a execução de várias etapas para o completar, de entre as quais:

Definição do problema

- Objetivo: identificação e definição do problema em análise;
- Ação: descrever o problema ou evento de forma clara e concisa, incluindo detalhes como o que aconteceu, quando, onde e o impacto.

Recolha de dados

- Objetivo: recolher todas as informações relevantes relacionadas ao problema ou evento;
- Ação: recolher evidências, como registos, relatórios de incidentes; testemunhos documentos de processo, entre outros.

Levantamento das possíveis causas

- Objetivo: identificação de possíveis causas para o problema em análise;
- Ação: utilizar ferramentas para identificar e categorizar as causas do problema.

Classificação das possíveis causas em causas reais

- Objetivo: classificar quais das causas enumeradas podem ser as reais causadoras do problema;
- Ação: analisar as causas para determinar as relações de causa e efeito, considerando fatores humanos, de processo, físicos, organizacionais, ambientais, entre outros.

Identificação das possíveis soluções

- Objetivo: com base nas causas identificam-se possíveis soluções para o problema;
- Ação: identificar ações corretivas e preventivas, assegurando que estas são práticas, viáveis e sustentáveis.

Implementação da solução

- Objetivo: aplicação da solução para o problema em análise;
- Ação: executar as ações corretivas e preventivas, incluindo a atribuição de responsabilidades e definição de cronogramas.

Análise dos resultados

- Objetivo: analisar os resultados para verificação da eficácia da solução implementada;
- Ação: validar os resultados das ações para verificar se o problema foi resolvido e se novas questões surgiram, realizando ajustes se necessário;

Revisão e Melhoria Contínua

- Objetivo: aprender com o processo e melhorar;
- Ação: rever o processo de RCA para identificar áreas de melhoria, aprimorar as práticas organizacionais e partilhar as aprendizagens com a equipa.

Existem diversas técnicas e estratégias que podem ser utilizadas para analisar a causa raiz, nomeadamente os 5 Porquês, o Diagrama de Ishikawa, a Análise de Pareto, a FMEA (Análise de Falhas de Modo e Efeito), a FTA (Análise de Árvore de Falhas), o Diagrama de Árvore de Decisão, entre outras. Porém serão analisadas em diante 3 técnicas relevantes para o desenvolvimento desta dissertação, sendo estas o Diagrama de Ishikawa, 5 Porquês e a Análise de Pareto.

4.1.1 Diagrama de Ishikawa

O Diagrama de Ishikawa, também conhecido como Diagrama de Espinha de Peixe ou Diagrama de Causa e Efeito, proposto por Kaoru Ishikawa na década de 60, permite de forma simples e sistemática, classificar e documentar as causas das variações na qualidade de um produto. Este diagrama surgiu da necessidade de Kaoru explicar as causas de um problema que surgiu na empresa onde este trabalhava, sendo que a aplicação deste diagrama na indústria veio a alertar para a necessidade de existir um controlo contínuo da qualidade em qualquer processo.

Trata-se, assim, de uma representação gráfica de uma lista organizada de possíveis causas, fatores que possam estar na origem de uma consequência e onde são apresentados dados qualitativos informações. O diagrama simplifica processos

considerados complexos, através da divisão destes em processos mais simples e mais controláveis. Desta forma, o Diagrama de Ishikawa apresenta diversas vantagens, tais como:

- Pode ser aplicado por qualquer pessoa dentro da organização;
- É gerador de uma lista de todas as causas possíveis implicadas na génese do problema;
- Fornece uma representação visual do problema e dos fatores determinantes;
- Identifica as áreas que necessitam de maior atenção e análise para a resolução do problema com aperfeiçoamento contínuo do diagrama;
- Conduz à discussão do problema envolvendo todos os intervenientes.

Verifica-se, assim, que se trata de um instrumento que pode ser utilizado individualmente, que conduz à discussão conjunta entre elementos da equipa e acaba por favorecer as áreas mais significativas. Deste modo, os objetivos da aplicação do diagrama passam por estudar as causas e os fatores contributivos na raiz de um problema e identificar as causas possíveis e as suas inter-relações quando um processo não decorre como planeado.

O método de Ishikawa parte da hipótese de que para cada problema existe um vasto leque de causas principais e secundárias, conforme representado na Figura 4.2, sendo que normalmente agrupam-se as causas em seis categorias conhecidas como os 6M's:

- **Máquina** – falhas relativas à maquinaria usada no processo (ex: funcionamento incorreto, falha mecânica);
- **Materiais** – não conformidade dos materiais usados, dadas as exigências requeridas pelo produto (ex: dimensões incorretas, temperaturas não ideais);
- **Mão-de-obra** – dificuldades humanas sentidas no processo (ex: falta de qualificação, falta de competência);
- **Ambiente** – falhas relativas ao ambiente interno/externo (ex: temperatura, layout, ruído, poluição);
- **Método** - falhas relativas ao não planeamento do processo ou método usado nas atividades (ex: sem planeamento, sem uso de ferramentas adequadas);
- **Mediações** – falhas que envolvem as métricas usadas para medir, monitorizar o trabalho (ex: efetividade dos instrumentos de calibração, indicadores, objetivos).

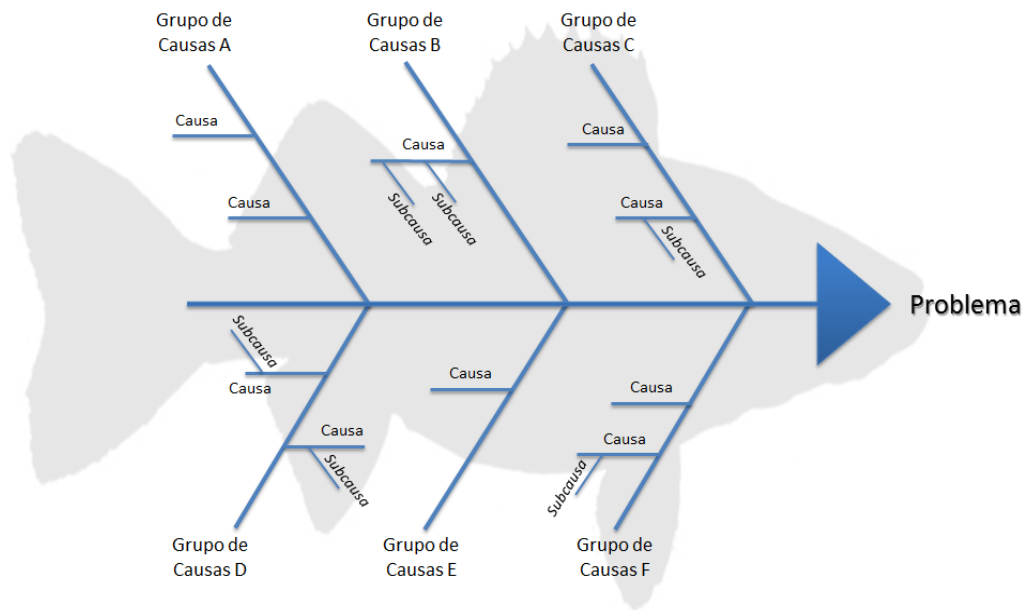


Figura 4.2 - Diagrama de Ishikawa

Cada categoria pode ser subdividida tantas vezes quantas as necessárias para melhor agrupar e clarificar as causas do problema. As causas conducentes a um determinado efeito podem ser classificadas a vários níveis, conforme referido anteriormente, sendo que este número depende do maior ou menor detalhe da análise efetuada pela equipa. No diagrama, as causas de nível 1 afetam diretamente a respetiva causa geral, estando representadas por setas horizontais ligadas a setas oblíquas das causas gerais, enquanto as causas de nível 2 são representadas por setas oblíquas apontadas para a seta horizontal da causa de nível 1.

Para a execução do diagrama, devem ser seguidas as seguintes etapas:

- O primeiro passo é definir o problema a ser estudado e o que se deseja obter;
- Estudar e conhecer o processo envolvido através de observação, documentação, troca de ideias com pessoas envolvidas;
- Fazer uma reunião com as pessoas envolvidas no processo e discutir o problema, fazer um brainstorming;
- Após a recolha de todas as informações, deve-se organizá-las em: causas principais, secundárias, terciárias, eliminando informações sem importância;
- Estruturar o diagrama e conferir com todos a representação da situação atual;
- Marcar o mais importante para obter o objetivo que se pretende alcançar;

Este diagrama permite, assim, melhorar continuamente o processo através da determinação das causas de um problema e das ações determinadas a partir destas.

4.1.2 5 Porquês

Quando se procura resolver um problema, ajuda começar pelo resultado final, refletir sobre o que causou o problema e questionar a resposta cinco vezes. Esta abordagem elementar e muitas vezes eficaz para a resolução de problemas promove um pensamento profundo através do questionamento, e pode ser adaptada rapidamente sendo aplicada à maioria dos problemas. A técnica dos 5 Porquês está, assim, relacionada com o princípio da resolução sistemática de problemas, ou seja, sem saber o início do problema, divide-se o problema até chegar a uma causa raiz. (Serrat, 2017)

Desta forma, tal como o Diagrama de Ishikawa, também a ferramenta dos 5 Porquês permite ajudar a descobrir a ou as causas raízes de uma determinada falha. Esta ferramenta pode, assim, ser utilizada depois do Diagrama de Ishikawa estruturado para complementar a análise realizada por esta ferramenta. Trata-se de uma ferramenta simples de resolução de problemas que consiste em formular a pergunta “Porquê?” sucessivamente até se compreender a causa raiz. Apesar de se chamar 5 Porquês, pode-se perguntar porquê mais ou menos que cinco vezes, de acordo com a necessidade para se encontrar a causa raiz.

Este método utiliza um conjunto específico de etapas, com instrumentos associados, para determinar a causa primária do problema, de modo a:

- Determinar o que aconteceu;
- Determinar a causa do porquê de ter acontecido;
- Determinar o que fazer para reduzir a probabilidade de que isso aconteça novamente;

Para a elaboração desta técnica e eficácia da mesma, existem três elementos-chave que são necessários serem cumpridos: (Serrat, 2017)

- Realizar afirmações precisas e completas dos problemas;
- As respostas devem ser realistas;
- Determinação para encontrar a causa raiz.

Segundo (Weiss, 2011) a forma simplificada de aplicar o método corresponde à utilização de 5 passos:

- Iniciar a análise com a afirmação da situação que se deseja entender, ou seja, deve-se iniciar com o problema;
- Perguntar porque a afirmação anterior é verdadeira;
- Perguntar porquê novamente para a razão descrita que explica o porquê de a afirmação anterior ser verdadeira;
- Continuar a perguntar porquê até que não se possa mais perguntar;
- Ao não se obter mais resposta, chega-se à causa raiz.

Na Figura 4.3 está representado um exemplo da aplicação da técnica 5 Porquês para o problema de Produtos com não-conformidades nos testes de qualidade de uma organização. Neste exemplo foram realizadas as 5 perguntas até se encontrar a causa raiz, a não existência de um plano preventivo definido para o equipamento, e foi determinada uma solução para a causa encontrada, a criação de um plano preventivo para o equipamento.

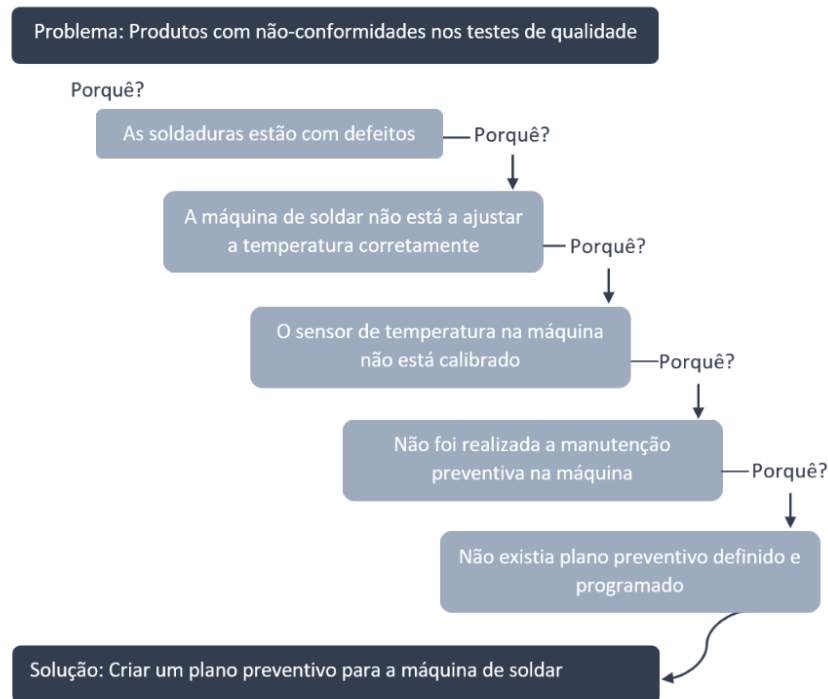


Figura 4.3 - Exemplo da aplicação da técnica 5 Porquês para o problema de Produtos com não-conformidades nos testes de qualidade de uma organização

Esta ferramenta auxilia, assim, a gestão de qualidade e permite otimizar os processos, devido a facilitar a procura da melhor solução para um problema. O princípio desta ferramenta, é assim, a ideia de observação de um problema e identificação do mesmo, de forma fácil e rápida.

Existem diversos benefícios da utilização desta técnica, nomeadamente:

- Simplicidade, é uma técnica fácil de aplicar sem necessidade de ferramentas inovadoras;
- Efetividade, permite identificar de forma rápida a causa raiz de um problema simples;
- Envolvimento de toda a equipa, permite a colaboração e envolvimento de toda a equipa na resolução do problema;

Porém, esta técnica apresenta algumas limitações, de entre as quais:

- Complexidade, esta técnica não é adequada para problemas complexos que têm múltiplas causas interligadas;
- Superficialidade, se não forem realizadas as perguntas corretas, pode não determinar a causa raiz do problema.

Esta ferramenta é, assim, considerada como sendo uma das ferramentas da Gestão Lean mais eficientes de análise de causa raiz, ou seja, a que permite a identificação mais rápida da causa raiz, no entanto não é considerada a mais eficaz visto que para problemas mais complexos é difícil obter-se uma solução precisa e definitiva, nomeadamente em problemas com múltiplas causas interligadas entre si.

4.1.3 Análise de Pareto

A Análise de Pareto consiste numa ferramenta de identificação e análise de problemas que permite classificar os problemas por ordem decrescente de importância, pode ser por frequência, custo, risco, entre outros. Esta ferramenta de qualidade tem um grau de importância elevado para uma organização devido a permitir à mesma identificar os principais problemas que afetam diretamente o funcionamento da organização através da elaboração de gráficos dinâmicos que permitem uma melhor visualização dos dados. A Análise de Pareto identifica os pontos críticos na organização, nomeadamente, erros de produção, na qualidade ou desperdício de materiais, permitindo ter um maior conhecimento das falhas e realizar-se melhorias nos processos.

Desta forma, o princípio de Pareto assenta sobre 80% das consequências resultam de 20% das causas, o que significa que um maior número de problemas pode resultar em um menor prejuízo enquanto o menor número de problemas acumulados pode gerar perdas maiores. A Análise de Pareto consiste num gráfico de barras que representa a frequência das ocorrências ao mesmo tempo que mostra a contribuição de cada causa para os problemas em análise. A sua principal característica é a identificação das principais causas que ocorrem para um determinado problema, o que permite estabelecer prioridades de atuação e desta forma evitar o desperdício na utilização de recursos. (Montgomery, 2009)

Segundo Koch (2015), o Princípio de Pareto afirma que ocorre um desequilíbrio entre as causas e os resultados, onde a maioria tem baixo impacto e a pequena maioria tem alto impacto, ou seja, os resultados são a derivação de uma pequena proporção das causas e esforços necessários para gerar os resultados. Desta forma, a Análise de Pareto é utilizada para visualizar e classificar os processos da organização por ordem e importância, a partir da identificação dos erros, o que permite diminuir os custos, riscos e problemas existentes. O objetivo desta ferramenta é realizar uma recolha de dados

que permita criar um gráfico de barras de forma decrescente e por frequência, e identificar os problemas que precisam ser resolvidos com urgência.

A partir desta é possível visualizar facilmente quais são as causas mais determinantes na ocorrência de um determinado problema, o que permite estabelecer prioridades de atuação, evitando, por esta via, o desperdício de esforços de combate a causas que não têm grande expressão na manifestação do problema. (Pereira & Requeijo, 2008)

Como esta análise utiliza a técnica 80-20, é realizada uma análise ABC onde diferentes tipos de defeitos são classificados por classes. A classificação por grupos é realizada de acordo com a Tabela 4-3.

Tabela 4-3 - Classificação Análise de Pareto

A	Classifica os defeitos de grande relevância e que representam 20% das causas que originam 80% dos problemas
B	Defeitos de média relevância, refere que 30% das causas produzem 15% dos defeitos
C	Defeitos de pequena relevância, indica que as restantes 50% das causas são responsáveis por 5% dos defeitos

O diagrama resultante da Análise de Pareto é, assim, composto por dois conjuntos de gráficos, sendo que:

- Um dos gráficos representa os fatores a serem analisados (ocorrências, não conformidades, defeitos, entre outros) organizados em colunas, iniciando com os problemas mais recorrentes e avançando gradualmente do mais recorrente para o menos recorrente, conforme representado na Figura 4.4.
- O outro gráfico caracteriza-se por ser uma linha que representa a percentagem acumulada da frequência das ocorrências, conforme representado na Figura 4.5.

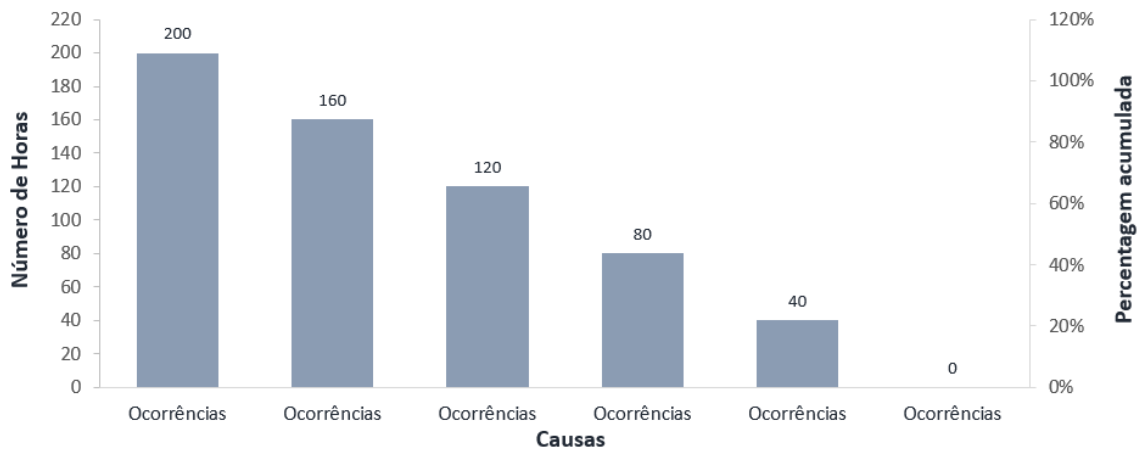


Figura 4.4 - Fatores em análise na Análise de Pareto

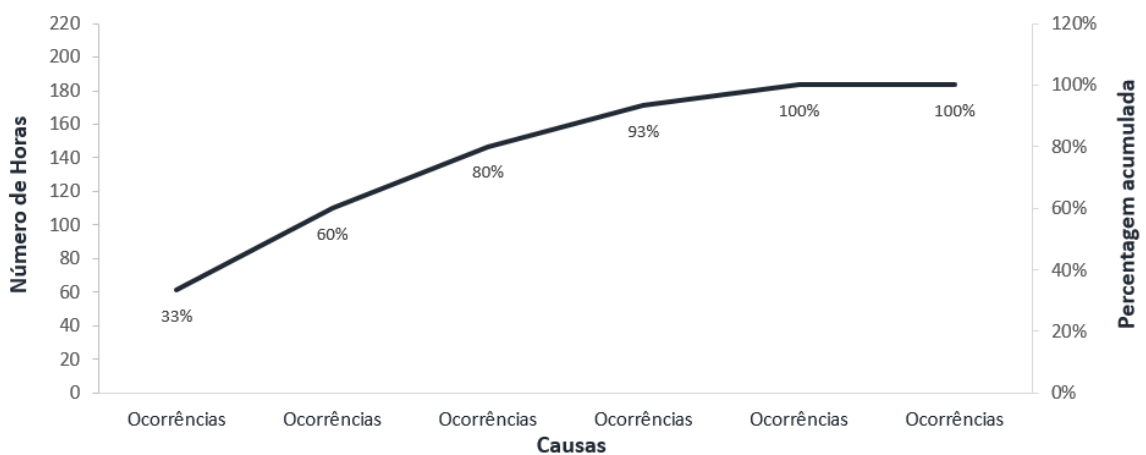


Figura 4.5 - Percentagem Acumulada de Frequência de Ocorrências

Para se elaborar uma Análise de Pareto é necessário seguir diversas etapas até se obter o diagrama final, sendo as seguintes:

- 1 - Definir as categorias usadas para agrupar os dados;
 - 2 - Definir a medida a usar (frequência, quantidade, custo e tempo);
 - 3 - Recolher os dados e registrar na categoria a que se destinam;
 - 4 - Calcular e registrar o subtotal das medidas para cada categoria;
 - 5 - Determinar a escala mais apropriada para os dados recolhidos;
 - 6 - Calcular a % para cada categoria e ordená-las por ordem decrescente de valor;
 - 7 - Construir e identificar as barras a que se destinam para cada categoria, as categorias são representadas através do eixo horizontal e as percentagens pelo eixo vertical;
 - 8 - Calcular e traçar a curva com os valores obtidos das somas acumuladas.
- Na Figura 4.6 está representado um exemplo de um Diagrama de Pareto.

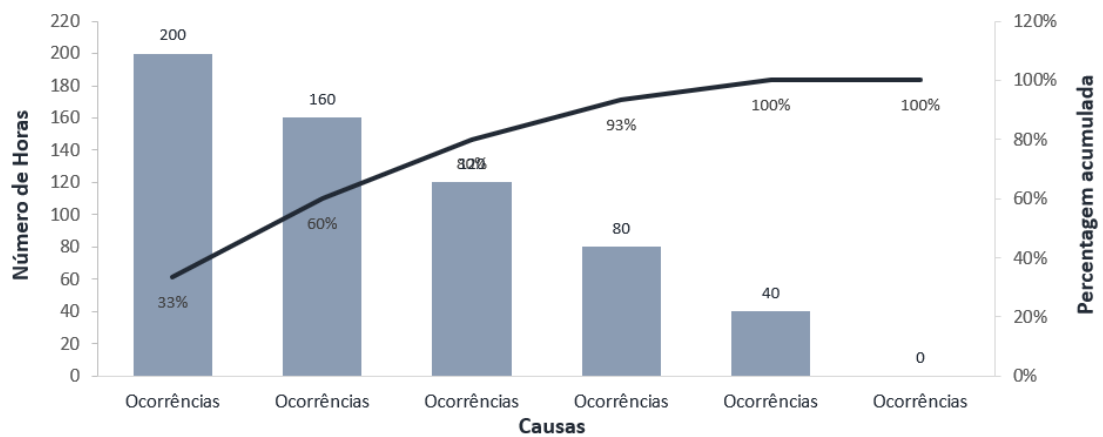


Figura 4.6 - Exemplo Diagrama de Pareto

A Análise de Pareto apresenta diversos benefícios na sua utilização, especialmente em ambientes de gestão de qualidade, produção, análise de falhas e melhoria contínua, sendo uns dos principais benefícios os seguintes:

- Eficiência na Priorização, o Diagrama de Pareto ajuda a identificar rapidamente os poucos problemas ou as causas que são responsáveis pela maior parte dos efeitos negativos, o que permite as organizações concentrarem os seus recursos e esforços nas áreas de maior impacto;
- Facilidade de Análise e Tomada de Decisão, permite uma visualização clara devido a sua disposição gráfica facilitar a compreensão dos dados e permite definir prioridades referente a ações corretivas, melhorando a eficiência operacional;
- Melhoria Contínua, pode ser usado para monitorizar a eficácia das ações implementadas de forma regular, permitindo ajustes e melhorias contínuas nos processos;
- Simplicidade no Processo de Resolução de Problemas, em situações onde existem muitas causas possíveis para um problema, a Análise de Pareto simplifica a análise ao destacar causas mais significativas, tornando o processo de resolução de problemas mais acessível;
- Otimização dos Recursos, ao concentrar esforços nas causas mais críticas, a organização pode otimizar o uso de recursos, evitando desperdícios com problemas de menor relevância.

Esta ferramenta é, assim, essencial para otimizar processos, melhorar a qualidade e garantir que os recursos são utilizados da maneira mais eficaz possível, focando nas áreas que realmente são críticas na organização.

5 Indústria Cimenteira

A Indústria Cimenteira é um setor essencial para a sociedade moderna e um dos motores da economia global, uma vez que o cimento tem desempenhado um papel essencial como material de construção ao longo da história da civilização, desde a antiguidade até aos tempos modernos, sendo considerado como a base para o desenvolvimento da sociedade e do bem-estar das pessoas. Este setor tem uma elevada importância macroeconómica a nível mundial, sendo uma atividade que tem vindo a acompanhar a globalização dos mercados e que contribui significativamente para o PIB de muitos países. A importância do setor está fortemente relacionada com o desenvolvimento económico, posição geográfica e capacidade competitiva de cada país.

O cimento, conhecido pela sua versatilidade e durabilidade, é um dos ingredientes essenciais do betão, que corresponde ao material de construção mais consumido do mundo. A procura por cimento está diretamente relacionada com o crescimento populacional e desenvolvimento de infraestruturas, tornando-o indispensável para a modernização de países e na melhoria da qualidade de vida.

Uma das principais características da indústria cimenteira é o facto de ser uma indústria intensiva em energia, responsável por 2% do consumo de energia primária a nível mundial. A produção de cimento tem também impactos significativos no meio ambiente, nomeadamente a exploração das pedreiras, fonte de matéria-prima, e nas emissões atmosféricas, sendo que a produção de clínquer é responsável por aproximadamente 5-8% das emissões globais de CO₂.

A Indústria Cimenteira é caracterizada por operar a 24h por dia, durante 7 dias por semana, devido à natureza contínua e intensiva do processo de produção de cimento. Esta operação contínua é essencial para maximizar a eficiência e minimizar os custos operacionais, visto que a produção de cimento é um processo de alta intensidade energética, conforme mencionado anteriormente, e capital intensivo. Desta forma, a gestão eficaz dos ativos físicos desta indústria é fundamental para o sucesso operacional e financeiro da mesma, pois permite garantir a maximização da disponibilidade operacional, otimização dos custos, assegurar a qualidade do produto e sustentabilidade ambiental e económica.

A gestão dos ativos físicos desempenha, assim, um papel crucial na manutenção da produtividade e competitividade da indústria cimenteira de forma a minimizar falhas inesperadas e paragens não programadas, que influenciam negativamente a produção e resulta por vezes em perdas significativas para a empresa. A implementação de práticas de gestão avançadas, como a manutenção preditiva e a utilização de tecnologias

digitais, é fundamental para enfrentar os desafios e aproveitar as oportunidades no setor.

5.1 Caracterização Cimento

O cimento destaca-se por ser um dos principais materiais utilizados na construção civil, devido ao largo espectro de possíveis aplicações nas diversas fases de construção. O cimento pertence à classe de materiais classificados como aglomerantes hidráulicos, caracterizados por entrarem num processo físico-químico de endurecimento quando em contacto com a água. É, assim, um ligante hidráulico, um material inorgânico que quando misturado com a água forma uma pasta que solidifica e endurece por meio de reações e processos de hidratação, mantendo a sua força e estabilidade quando submersos.

O cimento mais utilizado e comum é o cimento *Portland*, cujas matérias-primas naturais envolvidas são transversais aos diferentes tipos de cimento. As matérias-primas naturais que constituem a base deste tipo de cimento são o calcário, a argila, a areia, o ferro e o gesso, sendo que o gesso é adicionado numa fase final do processo de fabrico como será explicado no subcapítulo 5.2. O calcário é rico em carbonato de cálcio (CaCO_3) e corresponde à maior parte da mistura do cru. Da argila, da areia, do ferro e do gesso resultam, respetivamente, a alumina, a sílica, o óxido de ferro e o sulfato de cálcio.

As matérias-primas naturais referenciadas podem ser substituídas por matérias-primas secundárias, como cinzas volantes e escórias metálicas. A mistura calibrada de matérias-primas naturais e secundárias, após o devido processamento, passa a designar-se por cru. A exposição do cru a temperaturas de fusão resulta na formação de uma massa seca designada por clínquer, conforme explicado posteriormente no subcapítulo 5.2. As percentagens de cada componente do clínquer estão representadas na Tabela 5-1.

Tabela 5-1 - Composição do clínquer em percentagem

Matéria Prima Natural	Composição do clínquer (em %)
Calcário	Óxido de cálcio 65 Outros compostos (como óxidos de magnésio) 4
Areia	Sílica 22
Argila	Óxido de alumínio 6
Ferro	Óxido de ferro 3

O clínquer é composto por cinco elementos fundamentais: cálcio, silício, alumínio, ferro e oxigênio. No entanto, a composição química do produto final corresponde essencialmente a uma mistura de quatro minerais, produtos da fusão dos compostos; alite, belite, celite e ferrite.

Tabela 5-2 - Composição química do cimento

Fonte: (Imbabi, 2012)

Composição química base (%)	
Alite	53
Belite	26
Celite	10,5
Ferrite	10,5

Após o processo de calcinação estar completo, é adicionado gesso ou outra fonte de sulfato de cálcio e outros suplementos minerais. Consoante o tipo de produto, são adicionados suplementos minerais, responsáveis por amplificar diferentes propriedades do produto final, sendo que estes tipos de cimentos tem a designação de cimentos compósitos. Dentro das cinco categorias de cimento, a quantidade de clínquer e a tipologia dos suplementos minerais é que determinam a sua classificação.

Tabela 5-3 - Classificação dos tipos cimento de acordo com a NE 197-1:2000

Fonte: (CEN, 2004)

Designação	Composição (%)
CEM I - Cimento Portland	Clínquer 95-100 Suplementos Minerais 0 Gesso 0-5
CEM II - Cimento Portland compósito	Clínquer 65-94 Suplementos Minerais 6-35 Gesso 0-5
CEM III - Cimento com escórias de ferro	Clínquer 5-64 Suplementos Minerais 35-95 Gesso 0-5
CEM IV - Cimento pozolânico	Clínquer 45-89 Suplementos Minerais 11-55 Gesso 0-5
CEM V - Cimento compósito	Clínquer 20-64 Suplementos Minerais 50-80 Gesso 0-5

O *CEM I* é o tipo de cimento mais comum e o que apresenta maiores níveis de produção por todo o mundo. Quando comparado com às restantes categorias, é o que representa maior percentagem de clínquer. Os cimentos do tipo II, III, IV e V correspondem a cimentos compósitos, ou seja, tem um teor de clínquer mais baixo na sua composição, sendo este compensado pela adição de suplementos minerais. Desta forma, provem uma menor necessidade de matéria-prima natural e menores custos de produção. Comparativamente ao CEM I apresentam uma resistência e força idênticas a médio e longo prazo e, aquando da produção de betão, a massa apresenta maior fluidez, mas uma menor temperatura de hidratação, com exceção do CEM III. O CEM II engloba cimentos com cinzas volantes, escória granulada ou calcário triturado, já o CEM III apresenta um teor elevado em escória granulada. Os cimentos da categoria IV contêm aditivos pozolânicos e no CEM V o clínquer é substituído por pozolanas e escória granulada ou cinzas volantes.

5.2 Processo de Produção

A produção de cimento é um processo extremamente complexo que envolve a coordenação de diferentes áreas com o objetivo de garantir a qualidade do produto final. Este processo envolve diversas etapas de transformação das matérias-primas iniciais até à obtenção do produto final, o cimento.

Para produzir-se cimento existem dois métodos de fabrico: via húmida e via seca. No processo por via húmida, a matéria-prima é misturada com água, antes de ser introduzida no forno, de forma a facilitar o seu manuseamento e homogeneização, enquanto no processo por via seca as matérias-primas são aquecidas de forma a perderem a humidade diminuindo o consumo de energia utilizada no forno. Na empresa analisada no caso de estudo do capítulo 5, o método utilizado na produção de cimento é a via seca de forma a reduzir-se o consumo de energia do forno.

O processo de fabrico pode, assim, ser dividido em seis fases principais: Extração, Britagem, Moagem de Cru, Cozedura, Moagem de Carvão, Moagem de cimento e Embalagem e Expedição. Na Figura 5.1 estão representadas as diferentes etapas de produção de cimento utilizadas na empresa onde foi realizado o caso de estudo, de forma a explicitar a sua forma de operar e facilitar a compreensão dos ativos físicos referidos no caso de estudo. Desta forma, será analisado em diante cada etapa principal do processo de fabrico da empresa mencionada ao longo desta dissertação de forma detalhada.

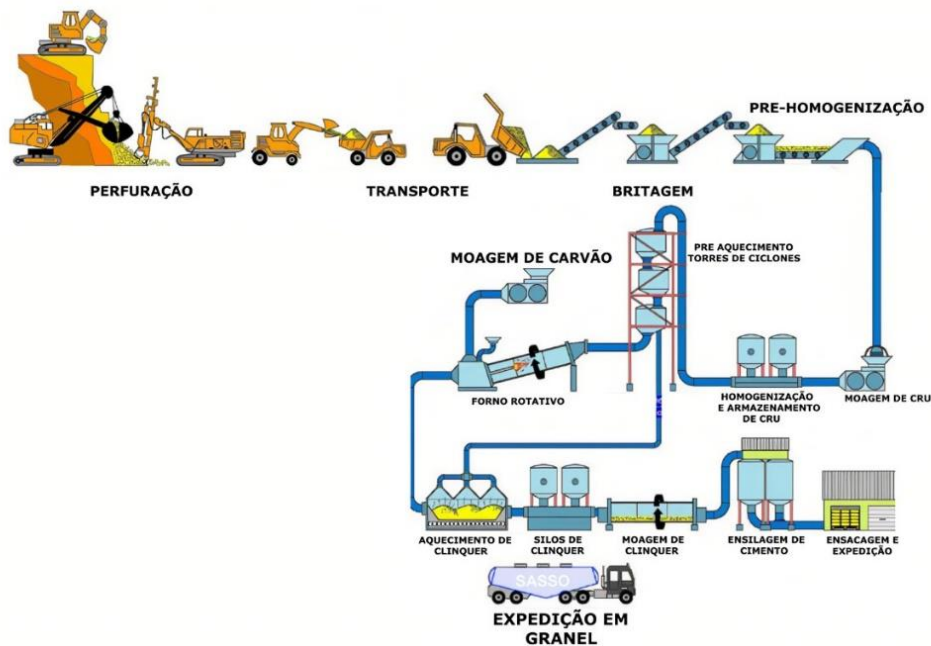


Figura 5.1 - Etapas de Produção de Cimento

5.2.1 Extração de Matéria-Prima Natural

A primeira etapa do processo de fabrico de cimento corresponde à extração de matéria-prima natural em céu aberto de uma pedreira localizada na envolvente da fábrica de modo a minimizar os custos de transporte. Nesta etapa, a pedra é extraída por meio de explosivos e recolhida com o auxílio de camiões. Durante a extração, pretende-se obter blocos com volume inferior a $0,5 \text{ m}^3$ de calcário e marga.

5.2.2 Britagem

A matéria-prima extraída é encaminhada, por meio de camiões, para um britador de martelos, localizado na pedreira, onde os blocos são reduzidos em pedaços com menos de 90mm, iniciando-se assim a etapa de britagem. Na Figura 5.2 está representado o interior de um britador em funcionamento. Durante a redução, pretende-se que a mistura dos materiais extraídos se aproxime da composição química desejada.

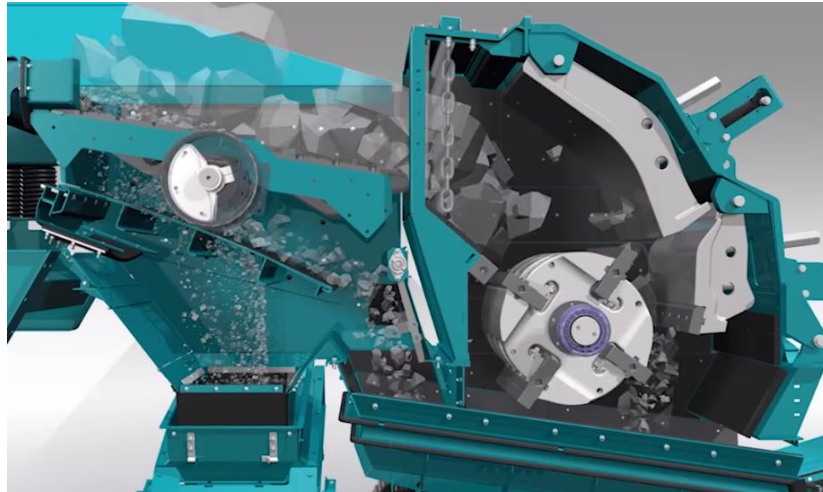


Figura 5.2 - Interior de um Britador em funcionamento

O material britado é posteriormente transportado para a fábrica por meio de telas de borracha, denominadas de cintas, representadas na Figura 5.3, sendo armazenado em silos verticais ou armazéns horizontais, denominado de hangar. As cintas possuem detetores de metais que fazem com que estas travem quando detetam um elemento metálico, em caso de esse material não ser retirado pode causar danos nos moinhos de cru utilizados na etapa seguinte.

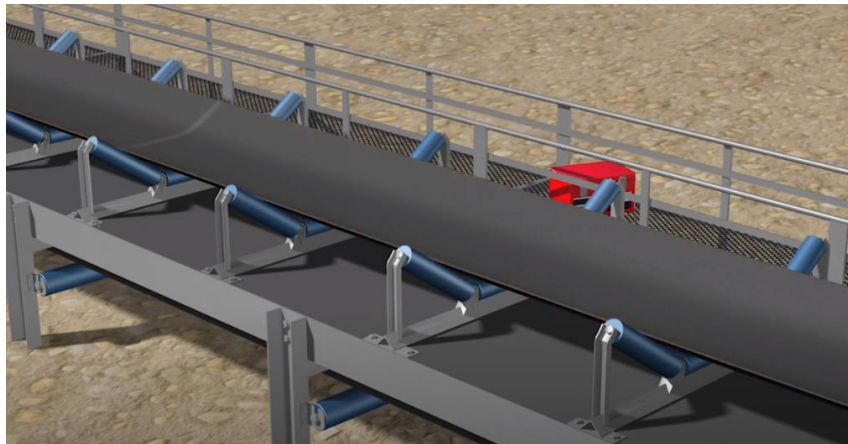


Figura 5.3 - Exemplo de uma cinta transportadora de material

Nos silos onde se armazena o material britado, realiza-se a homogeneização do material, quer à entrada, quer à saída do mesmo, sendo o fator de homogeneização de 8 a 10. A Figura 5.4 esquematiza o funcionamento do silo, com as diferentes camadas de material depositado à entrada. A máquina de extração corresponde a um pente, que ao cortar o monte transversalmente provoca a queda e a mistura dos materiais das várias camadas, homogeneizando-os.

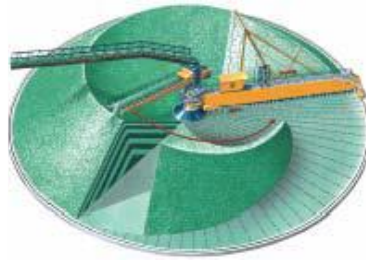


Figura 5.4 - Esquematização do funcionamento do silo

5.2.3 Moagem de Cru

Na etapa de moagem de cru procede-se à afinação da composição química e da moagem com a finura adequada à cozedura. Neste processo é utilizado um moinho vertical constituído por mós estáticas e uma mesa rotativa onde está colocado o material. O material entra no moinho e é depositado na mesa de moagem, à medida que a mesa vai rodando, o cru é esmagado de forma a obter-se a granulometria adequada à etapa seguinte. Em seguida, o cru é arrastado para o topo do moinho por meio da entrada de gases quentes no interior deste. No topo do moinho encontra-se um separador que tem como função filtrar o material de modo a encaminhar o material com a finura adequada à cozedura e remeter o material com granulometria superior para nova moagem. A Figura 5.5 representa o interior do moinho.

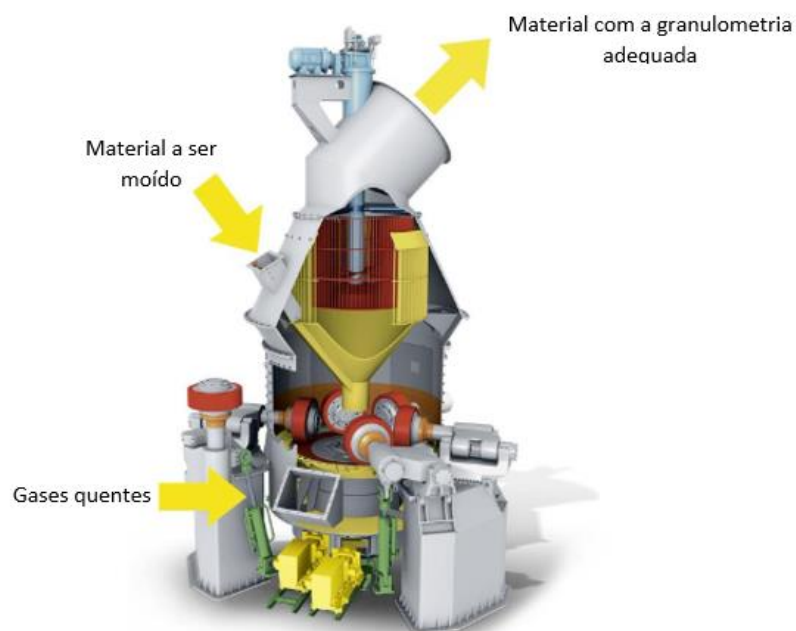


Figura 5.5 - Interior de um Moinho de Cru

5.2.4 Cozedura

Depois da etapa de Moagem de Cru vem a etapa de Cozedura, onde o material é transformado, através de reações químicas complexas, num produto granulado denominado clínquer. Este processo é o mais importante devido a envolver o fabrico do produto intermédio de cimento, pelo que qualquer falha nesta fase refletir-se-á negativamente na qualidade do produto final.

A cozedura do cru consiste, assim, num conjunto de reações químicas que transformam as matérias-primas em minerais cimentícios por meio de um forno com temperaturas a rondar os 1500°C, envolvendo quatro etapas principais: pré-aquecimento, calcinação, sintetização e arrefecimento, conforme representado na Figura 5.6.

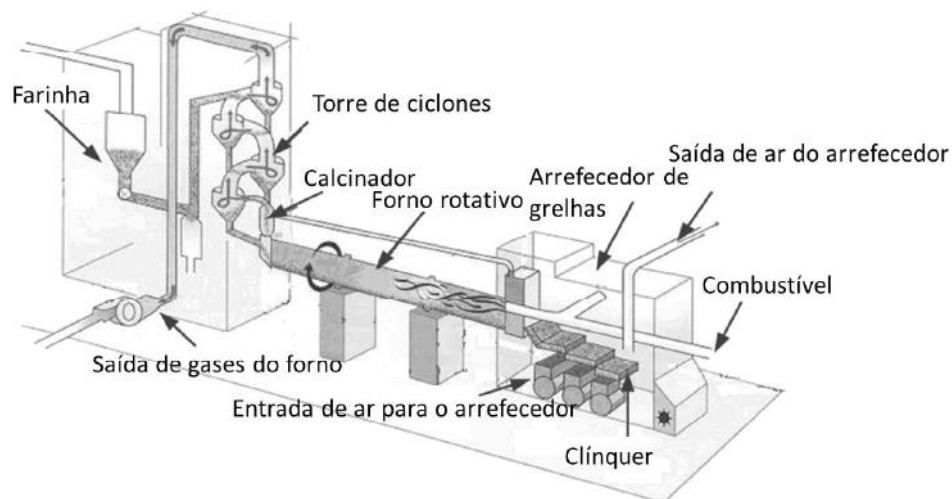


Figura 5.6 - Esquema pormenorizado de um forno rotativo, torre de ciclones e arrefecedor

Na fase de pré-aquecimento, o cru passa por uma torre de ciclones, entre o silo de armazenagem e o forno, onde é aquecido por contacto com contracorrentes ciclónicas de ar quente, provenientes da queima de combustível utilizado para acender e manter o forno em funcionamento, sendo que estes combustíveis podem ser carvão, *pet-coke*, *fuel-oil* ou gás. Ainda nesta etapa, ocorre a evaporação de água presente no cru e a decomposição dos compostos de sílica, alumínio e ferro, à medida que o cru desce até ao forno.

A cerca de 900°C inicia-se o processo de calcinação, ou seja, a decomposição térmica do CaCO_3 em óxido de cálcio, com libertação de CO_2 , sendo que só é completada no forno quando o material atinge temperaturas superiores a 1000°C. O pré-calcinador funciona como um queimador secundário que aquece os gases que passam em co-corrente pelo cru, aquecendo-os eficazmente.

Após a fase de pré-calcinação, o material entra no forno, movimentando-se através do movimento de rotação do forno e do seu grau de inclinação (entre 2,5 a 5% com uma velocidade de 1,5 a 4 r.p.m). Entre os 1400-1500°C ocorre a fase de sintetização na qual o óxido de cálcio funde-se com a sílica, o alumínio e o ferro, e se formam minerais cimentícios. A uma temperatura entre os 1450-1500°C, o clínquer é enviado para o sistema de arrefecimento, iniciando-se a etapa de arrefecimento do clínquer.

Na etapa de arrefecimento de clínquer, o clínquer é encaminhado para o arrefecedor de grelhas onde é depositado em grelhas pelas quais passa ar frio. A movimentação do clínquer dentro do sistema de arrefecimento ocorre através de uma grelha que se desloca desde o local de receção do clínquer até ao ponto de descarga. No processo de arrefecimento, a temperatura de clínquer desce para valores entre os 170-200°C. É uma etapa essencial pois promove o fim das reações químicas e a cristalização dos minerais cimentícios. Como resultado deste processo, é gerado ar quente que é recirculado para o forno como medida de eficiência energética.

A Tabela 5-4 resume o processo de clinquerização, indicando as temperaturas e respetivas reações químicas desenvolvidas ao longo da etapa de cozedura.

Tabela 5-4 - Resumo do processo de cozedura do cru

Fase	Ativo	Temperatura (°C)	Reação
		<200	Evaporação da água presente no cru
Pré- Calcinação	Torre de ciclones	200-750	Formação de dióxido de sílica e óxidos de alumínio e ferro
Calcinação		750-1000	Início da calcinação - decomposição do carbonato de cálcio em óxido de cálcio com libertação de CO ₂ Fim da calcinação
Sintetização	Forno de cimento	1200-1450 (máx:1500)	Formação dos minerais de cimento, por reação do óxido de cálcio com o dióxido de sílica e os óxidos de alumínio e ferro
Arrefeciment o	Arrefecedor	1500-170	Arrefecimento do clínquer e cristalização dos minerais cimentícios

5.2.5 Moagem de Carvão

Para garantir o processo de aquecimento do forno, é fundamental que ocorra a queima de combustível conforme explicado anteriormente, pelo que quando é utilizado carvão como combustível é necessária a etapa de moagem de carvão para permitir a incorporação de carvão no processo de combustão. A moagem de carvão permite a redução do carvão até à granulometria adequada de modo a facilitar o processo de combustão do forno e a torná-lo eficiente.

O processo de moagem começa com a receção e armazenamento do carvão em depósitos, seguindo posteriormente para o processo de secagem de modo a remover-se a humidade do carvão, sendo que este processo é realizado através dos gases quentes provenientes do forno. Em seguida, o carvão é encaminhado para o moinho onde é moído de forma a adquirir a finura necessária, sendo que a moagem pode ser efetuada num moinho de bolas ou num moinho vertical de mós. As partículas finas de carvão são posteriormente enviadas para um silo, onde ficam armazenadas até serem introduzidas no forno, por meio do auxílio de um doseador, onde são queimadas de forma a obter-se o calor necessário à produção de clínquer. As partículas que não tem a granulometria adequada, tal como na moagem de cru, voltam a ser reintroduzidas no processo de forma a serem reaproveitadas.

Os tipos de moinhos utilizados na moagem de carvão estão descritos de forma detalhada no subcapítulo 5.2.3 e 5.2.6.

5.2.6 Moagem de Cimento

A última etapa da produção de cimento envolve a moagem de clínquer com os aditivos minerais. Nesta operação é adicionado ao clínquer gesso e outros materiais alternativos, como filler de calcário, cinzas volantes das centrais térmicas e escórias da siderurgia, com o objetivo de produzir os vários tipos de cimento vendidos. O tipo de cimento a ser produzido determina a composição da mistura, sendo quase sempre o clínquer maioritário.

A moagem é realizada em moinhos de bolas horizontais, estrutura tubular horizontal com esferas de aço no seu interior que ao colidir com a mistura permite reduzir o seu tamanho. Estes moinhos são alimentados por quatro doseadores dos diferentes materiais de alimentação. O processo ocorre em circuito fechado de modo que as partículas de cimento que ainda não possuem a dimensão necessárias sejam reintroduzidas no moinho. A mistura é moída pelo moinho e é transportada pelo elevador que introduz o cimento no separador, caso o material esteja com a finura adequada é encaminhado para o filtro de despoeiramento e para os silos de armazenagem. Caso o cimento não tenha a finura adequada volta ao moinho para nova moagem e segue o circuito anterior.

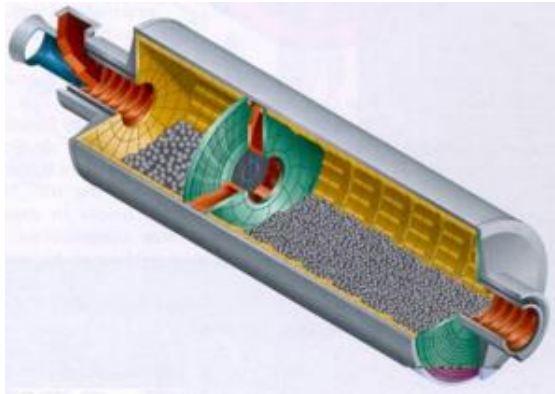


Figura 5.7 - Interior de um Moinho de Cimento

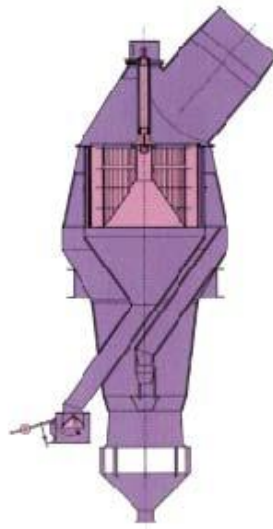


Figura 5.8 - Separador

5.2.7 Embalagem e Expedição

O cimento armazenado nos silos sob a forma de granel é encaminhado para a estação de empacotamento, onde é embalado em sacos de 25, 35, 40 e 50kg. Os sacos são agrupados em paletes de madeira ou em embalagens revestidas por manga plástica com o recurso a uma paletizadora, conforme representado na Figura 5.

A expedição de cimento, tanto a granel como ensacado, pode ser realizada via transporte rodoviário, ferroviário e marítimo.



Figura 5.9 - Expedição de cimento

6 Caso de Estudo

6.1 Enquadramento

No presente capítulo apresenta-se um caso de estudo aplicado a um ativo físico da produção de cimento e importante para a operação da linha de produção. A escolha deste ativo proveio da grande importância para a empresa por se tratar de um ativo essencial à produção do produto vendido e devido às várias falhas apresentadas.

6.2 Função do Ativo

O ativo em análise neste caso de estudo, escolhido com base na sua quantidade de falhas ocorridas que provocaram a paragem do Forno 8, trata-se de um Doseador, pfister, utilizado para dosear o material incorporado na alimentação do forno, permitindo assim o seu constante aquecimento. Este ativo, em caso de falha, provoca a paragem do forno devido a não ser possível garantir o processo de aquecimento do forno para este funcionar.

Desta forma, um Doseador tem como função medir e controlar a quantidade de material que é alimentada no processo industrial, neste caso da moagem de carvão para o forno. O carvão armazenado no silo, conforme explicado no subcapítulo 5.2.5, é transferido para o doseador que regula a dosagem e introduz o carvão no sistema de alimentação do forno, sendo o carvão posteriormente injetado no forno para ocorrer a combustão. Na Figura 6.1 encontra-se representado o funcionamento de um doseador e as suas componentes.

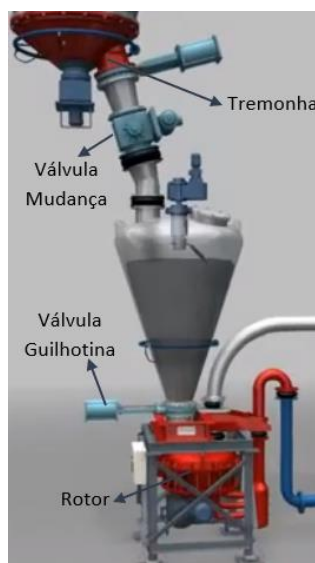


Figura 6.1 - Constituição de um Doseador

O doseador é alimentado por uma tremonha que armazena o material antes de ser doseado. A válvula de mudança, colocada a saída da tremonha, permite dosear o material na quantidade adequada a ser introduzida no rotor do doseador, a partir de um sistema de controlo automático que regula a operação do doseador e da válvula de guilhotina, ajustando a taxa de dosagem com base nos requisitos do processo. O rotor é constituído no seu interior por favos que permitem separar o material e dosear conforme representado na Figura 6.2.

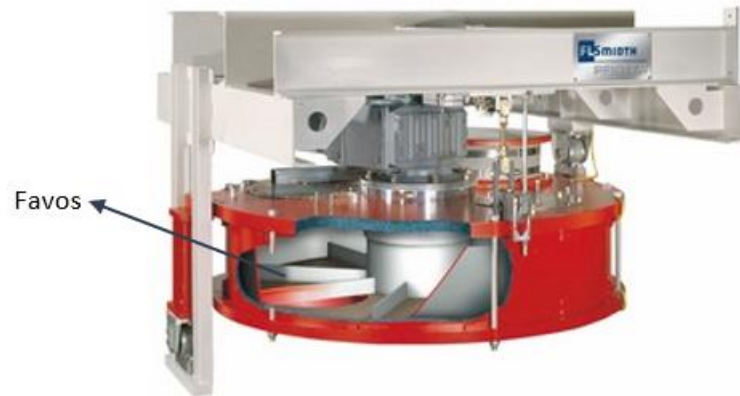


Figura 6.2 - Rotor do Doseador

6.3 Recolha e análise dos dados

A recolha de dados para o estudo do caso analisado neste capítulo foi realizada com base nos registos operacionais do ativo existentes num sistema de gestão utilizado pela empresa onde é possível analisar o tempo de funcionamento do equipamento, as paragens que ocorreram e o tempo de paragem. Desta forma, todos os dados recolhidos são viáveis e realistas para aplicação da metodologia RCA.

6.3.1 Identificação do problema

O Forno, que permite a produção de cimento e que é indispensável à produção, ao longo do ano de 2023 registou diversas paragens que colocaram em causa a produção de cimento na empresa. De forma a determinar a maior causa destas paragens e através das informações disponibilizadas pela empresa, elaborou-se um Gráfico de Pareto para determinar o ativo físico que representa o maior número de horas de falha que originou a paragem do forno, conforme representado na Figura 6.3.

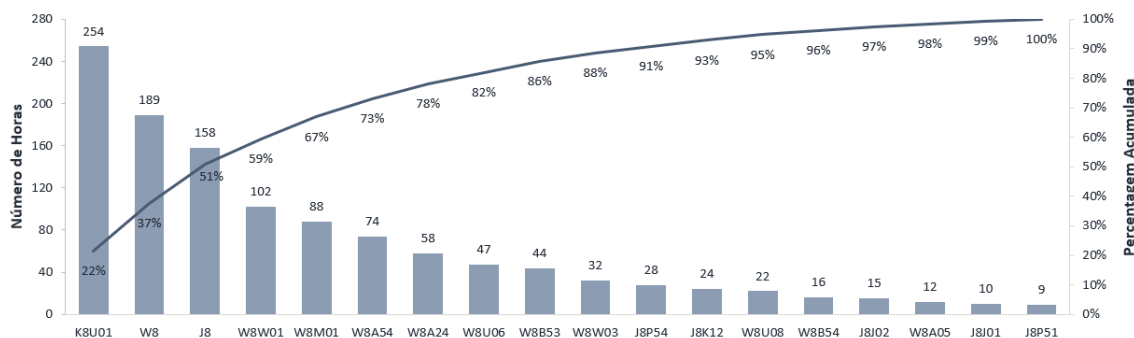


Figura 6.3 - Gráfico de Pareto para as ocorrências do forno 8

Como se pode verificar pela análise do Gráfico de Pareto o equipamento com mais horas de paragem é o equipamento K8U01 que corresponde ao Doseador do Moinho de Carvão da linha de produção. Este equipamento, conforme explicado no subcapítulo 6.2, tem como função dosear o material incorporado na produção de cimento.

Com o equipamento principal de falha do forno determinado, foi necessário identificar a principal causa de paragem do Doseador. Desta forma realizou-se outro Gráfico de Pareto com base nas causas identificadas pelos operadores e identificou-se que a causa principal de paragem do Doseador foi por Falha de Manobra de Equipamento, conforme demonstrado na Figura 6.4. É necessário ter em consideração que nesta identificação não foram consideradas as paragens programadas ou por fator externo, só foram consideradas as principais causas de paragens não programadas.

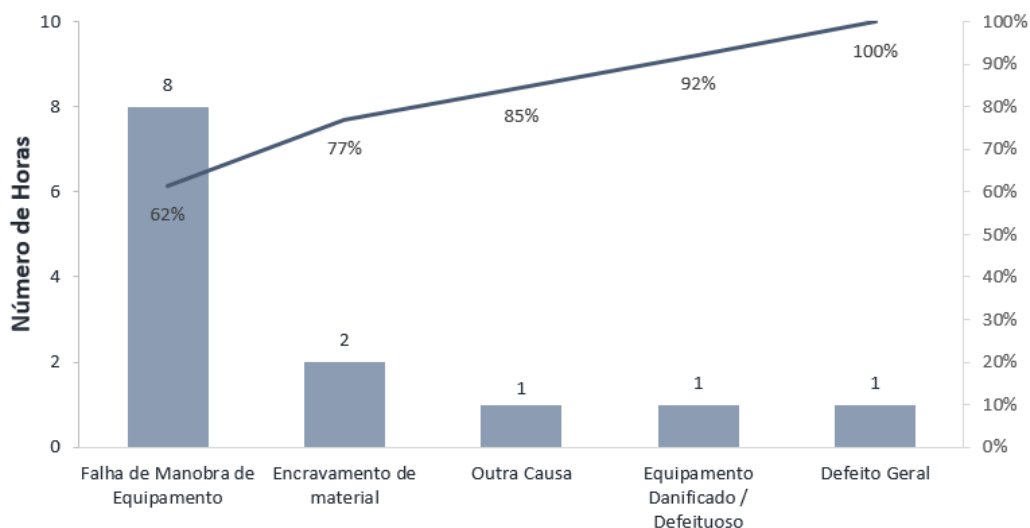


Figura 6.4 - Gráfico de Pareto das causas das falhas do Doseador

De forma a determinar a segunda causa de paragem, analisou-se uma listagem com os comentários dos operadores disponibilizada no software de gestão e verificou-se que a causa principal para a ocorrência de falha de manobra do ativo foi carga irregular no Doseador, conforme demonstrado na Tabela 6-1.

Tabela 6-1 - Dados Recolhidos das paragens do Forno 8 para a causa em análise

Local de Instalação	Ativo	Início da Paragem	Fim da Paragem	Duração	Causa	Comentários
Forno W8	K8U01	12/01/2023 07:21	13/01/2023 04:58	21,6	Falha de Manobra de Equipamento	Eclusa alimentação pré-tolda pfister carvão com prisão, carga alta
Forno W8	K8U01	24/09/2023 18:23	25/09/2023 07:30	13,12	Falha de Manobra de Equipamento	Alarme do pfister devido a carga alta
Forno W8	K8U01	07/01/2023 12:25	07/01/2023 21:21	8,9	Falha de Manobra de Equipamento	Pfister com carga muito alta.
Forno W8	K8U01	13/01/2023 09:01	13/01/2023 15:45	6,7	Falha de Manobra de Equipamento	Pfister carvão com prisão, carga alta
Forno W8	K8U01	21/05/2023 07:32	21/05/2023 12:26	4,9	Falha de Manobra de Equipamento	Paragem do forno por Pfister K8U01 em alarme com carga irregular
Forno W8	K8U01	16/11/2023 08:05	16/11/2023 12:25	4,3	Falha de Manobra de Equipamento	Alarme pfister falha de retorno de sinal, carga alta.
Forno W8	K8U01	09/09/2023 12:44	09/09/2023 15:44	3	Falha de Manobra de Equipamento	Paragem por prisão da eclusa K8U01X1X13.
Forno W8	K8U01	18/05/2023 06:56	18/05/2023 07:56	1	Falha de Manobra de Equipamento	Forno parado devido a prisão no pfister de carvão K8U01, carga alta

Com as causas determinados, é possível de analisar a Disponibilidade Operacional bem como calcular o MTBF e MTTR do ativo com base nas falhas ocorridas para o ano de 2023 e verificar o impacto que a causa determinada teve na disponibilidade do ativo, sendo estes dados calculados no subcapítulo seguinte.

6.3.2 Análise da Disponibilidade Operacional

Com base nos dados recolhidos, procedeu-se à determinação do Disponibilidade Operacional para o ano de 2023 bem como dos valores de MTBF e MTTR para os dias onde ocorreram as falhas com a causa identificada no subcapítulo 6.3.1 para o Forno e para o Doseador. Desta forma, foi necessário, inicialmente, consultar o software de gestão disponibilizado pela empresa e recolher os tempos totais de paragens do ativo (*downtime*) e o tempo em que o ativo esteve em condições de ser utilizado (*uptime*).

Na tabela 6-2 encontram-se os dados retirados do software para o intervalo de tempo onde ocorreram falhas.

Tabela 6-2 - *Uptime, Downtime, Tempo de Reparação e Número de Avarias do para o intervalo de tempo em análise*

Ativo	Intervalo de tempo	Uptime (Horas)	Downtime (Horas)	Tempo Reparação (Horas)	Número de Avarias
Forno W8	12/01/2023 13/01/2023	18,02	29,98	29,98	3
Forno W8	07/01/2023 07/01/2023	15,07	8,93	8,93	1
Forno W8	18/05/2023 18/05/2023	10,1	13,9	13,9	2
Forno W8	09/09/2023 09/09/2023	21	3	3	1
Forno W8	24/09/2023 25/09/2023	34,88	13,12	13,12	1
Forno W8	16/11/2023 16/11/2023	19,7	4,3	4,3	1
Forno W8	01/01/2023 31/12/2023	6745,2	2014,8	1182	196
K8U01	12/01/2023 13/01/2023	19,68	28,3	28,32	2
K8U01	07/01/2023 07/01/2023	15,07	8,93	8,93	1
K8U01	18/05/2023 18/05/2023	23	1	1	1
K8U01	09/09/2023 09/09/2023	21	3	3	1
K8U01	24/09/2023 25/09/2023	33,88	14,12	14,12	2

K8U01	16/11/2023 16/11/2023	19,7	4,3	4,3	1
K8U01	01/01/2023 31/12/2023	7654,9	1105,1	254,3	20

Com base nos valores de *Uptime*, *Downtime* e Tempo de Reparação é possível calcular a Disponibilidade Operacional bem como o MTBF e o MTTR através das Equações 3.13, 2.1 e 2.2 apresentadas no Capítulo 3. Desta forma, procedeu-se ao cálculo da disponibilidade operacional, MTBF e MTTR do Forno e do doseador para os períodos de tempo indicados. Na tabela 6-3 estão consolidados os dados obtidos para o cálculo da Disponibilidade Operacional, MTBF e MTTR.

Tabela 6-3 - Disponibilidade, MTBF e MTTR calculados

Ativo	Intervalo de tempo	Disponibilidade	MTBF	MTTR
Forno W8	12/01/2023 13/01/2023	30,98%	9,84	14,16
Forno W8	07/01/2023 07/01/2023	62,8%	15,07	8,93
Forno W8	18/05/2023 18/05/2023	42,1%	5,05	6,95
Forno W8	09/09/2023 09/09/2023	87,5%	21	3
Forno W8	24/09/2023 25/09/2023	15,12%	34,88	13,12
Forno W8	16/11/2023 16/11/2023	82,1%	19,7	4,3
Forno W8	01/01/2023 31/12/2023	77%	34,41	6,03
K8U01	12/01/2023 13/01/2023	41%	9,84	14,16
K8U01	07/01/2023 07/01/2023	62,8%	15,07	8,93
K8U01	18/05/2023 18/05/2023	95,8%	23	1
K8U01	09/09/2023 09/09/2023	87,5%	21	3
K8U01	24/09/2023 25/09/2023	15,12%	16,94	7,06
K8U01	16/11/2023 16/11/2023	82,1%	19,7	4,3

K8U01	01/01/2023 31/12/2023	87,4%	382,75	12,72
-------	--------------------------	-------	--------	-------

Analisando os dados obtidos, verifica-se que a Disponibilidade Operacional encontra-se muito baixa na maioria dos intervalos de tempo analisados. A disponibilidade operacional destes ativos definida pela organização é de 90%, pela análise efetuada verifica-se que nenhum dos ativos atingiu este objetivo quando analisada a disponibilidade operacional anual.

Quando analisado o MTBF, verifica-se que na maioria dos intervalos de tempo os valores são baixo o que revela que o tempo entre falhas do ativo é curto, sendo recorrente a ocorrência de falhas o que torna o ativo pouco disponível a nível operacional sendo necessário intervenções de reparação frequentes.

Desta forma, para melhorar os dados analisados e atingir-se as metas estabelecidas pela organização irá aplicar-se a metodologia RCA para compreender qual a causa de falha no ativo analisado e permitir prevenir que aconteça novamente.

6.4 Metodologia RCA

Conforme descrito no capítulo 4, a metodologia RCA permite analisar a ocorrência de falhas dos ativos físicos, o grau de severidade e determinar a causa raiz. Deste modo, de forma a melhorar a disponibilidade operacional do Forno e do Doseador bem como a fiabilidade, aplicou-se esta metodologia para determinar a origem da falha e evitar que esta torne a acontecer, sendo apresentadas no final do relatório medidas preventivas a serem aplicadas ao ativo físico. Estas medidas permitirão, quando aplicadas, evitar a ocorrência da falha e, em consequência, aumentar a Disponibilidade Operacional do ativo bem como diminuir o MTBF e o MTTR, de forma a garantir a contínua produção do produto final.

Em seguida será descrito todo o processo da aplicação do RCA ao caso de estudo em análise e as conclusões retiradas bem como as medidas a serem implementadas.

6.4.1 Aplicação do RCA

Na elaboração do Relatório de Caracterização de Falha (RCA) foram utilizadas diversas ferramentas para permitir determinar a causa raiz das várias avarias do Doseador K8U01 e a consequente paragem do forno, tais como o Diagrama de Ishikawa, os 5 porquês e os diagramas de falha do ativo.

Inicialmente começou-se por escolher um dos dias em que ocorreu a paragem do ativo para facilitar a análise com base na causa identificada, falha de manobra do equipamento, tendo-se optado pelo primeiro registo de falha do ativo.

De forma a determinar-se a razão de ocorrência da falha, realizou-se uma inspeção ao ativo em questão de forma a perceber-se onde podia ter ocorrido a falha. Assim que terminada esta etapa, procedeu ao apuramento dos problemas detetados no local pela equipa de prevenção, para se iniciar o processo de realização do RCA.

Apuradas as informações necessárias para a realização do RCA, procedeu-se ao preenchimento do relatório, começando por caracterizar-se a falha em análise através da definição de como foi detetada, quem a detetou, o local onde ocorreu, a duração e a data de ocorrência, conforme demonstrado na Figura 6.5.

2 - Caracterização							
Modo de Falha	Pfister com carga irregular					Duração	8h54m
Local de Instalação	FSK8U01		Data e Hora			07/01/2023 Das 12:25h às 21:21h	
Como foi detetada:	Insp. Periódica	<input type="checkbox"/>	Insp. Fora do Plano	<input type="checkbox"/>	Outros	<input checked="" type="checkbox"/> Irregularidade na alimentação de carvão	
Quem detetou?	OPCC		Provocou paragem da máquina?			Sim	<input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>

Figura 6.5 - Caracterização da Falha registada

Na elaboração do RCA, a falha pode ter sido detetada de 3 formas diferentes:

- por inspeção periódica, quando a equipa responsável pela inspeção periódica deteta a anomalia;
- por inspeção fora do plano, quando não está definida nenhuma inspeção, mas por motivos de trabalhos ocorrentes no local se efetua uma inspeção
- outros, por exemplo um trabalhador ir a passar no local e detetar um barulho / fuga / vibração anormal.

No caso da falha em questão, classificou-se como “Outros” devido ao operador da sala de comando que controla a operação dos ativos da Fábrica ter constatado uma irregularidade na alimentação de carvão, mandando parar o forno por falta de condições de alimentação de carvão.

Em seguida, de forma a descrever-se a falha e o que esta implicou para a produção, realizou-se uma breve descrição de como ocorreu a falha, de como foi detetada e as medidas corretivas aplicadas, tendo sido consideradas as seguintes questões:

- Quando ocorreu a avaria? Qual a duração?
- O que se verificou no local aquando da deteção?
- Foi possível proceder-se de imediato à sua reparação?
- Quem executou a reparação?
- Se é uma avaria ocorrente?
- Quando se verificou a última avaria caso tenha existido?
- Provocou paragem da linha? Se sim, quanto tempo?
- Quais as conclusões retiradas da reparação do equipamento?

As respostas a estas questões foram obtidas junto da equipa (no passo anteriormente referido) e, depois de respondidas, foi possível destacar informação pertinente para a continuação do RCA, como:

- O operador mandou parar o forno por falta de condições de alimentação de carvão e irregularidade na alimentação de carvão;
- A avaria motivou paragem na linha;
- A equipa de prevenção verificou que o rotor do doseador Pfister estava com material aglomerado o que obstruía a alimentação de material elevando a velocidade para o máximo;
- Identificação de um problema no sistema de medição de carga.

Na Figura 6.6 encontra-se representada a descrição de falha elaborada.

Descrição da falha
<p>No dia 08/01, por volta das 00.20h, o operador da sala de comando mandou parar o forno W8 por falta de condições de alimentação de carvão.</p> <p>O doseador de carvão da marca Pfister não seguia o set-point recebido da sala de comando, oscilando a rotação e consequentemente as toneladas/hora de material doseado. Esta irregularidade na alimentação de carvão ao forno provocou grande instabilidade na sua condução, obrigando à paragem do mesmo.</p> <p>Foi solicitada a intervenção da equipa de prevenção elétrica, que em conjunto com a realização elétrica (MTEO), fizeram a análise da avaria, intervindo de seguida. Constatou-se que o rotor do doseador Pfister, estava com material aglomerado, o que obstruía a alimentação de material, elevando a velocidade para o máximo, de forma a dosear o carvão pedido.</p> <p>Além do descrito anteriormente, foi também reportado um problema no feedback de carga do doseador. Ao pressionar o conjunto suportado na cela de carga, verificava-se que o sinal de feedback, que mede o enchimento do rotor do doseador, não oscilava na mesma medida, levando a crer que havia um problema no sistema de medição de carga. Este dispositivo engloba um amortecedor hidráulico composto por um disco emerso em óleo. As folgas entre o disco e as paredes do recipiente onde o mesmo “joga” deveriam de ser de 0,4 mm. Foi efetuada a medição e verificou-se um desalinhamento entre os eixos que faziam com que o conjunto não estivesse livre para voltar à posição original após alívio da carga. Corrigiu-se este problema e o feedback de carga do Pfister voltou à normalidade, acompanhando as oscilações de peso no interior do doseador.</p> <p>Após correção destes problemas a avaria foi dada com resolvida, o equipamento ficou operacional e o forno W8 arrancou novamente.</p>

Figura 6.6 - Descrição da Falha

Finalizada a descrição da falha, procedeu-se ao preenchimento dos campos seguintes, iniciando-se pela identificação das Consequências da Falha, ou seja, determinou-se se existiu alguma consequência a nível operacional (produção ou qualidade), de segurança ou ambiental, sendo identificado a respetiva gravidade e realizada uma breve descrição. Na avaria em análise, só foram identificadas consequências operacionais de produção em consequência de ter ocorrido paragem do forno, sendo a gravidade elevada devido à necessidade de interromper a produção de clínquer, como demonstrado na Figura 6.7.

3 - Consequências da Falha			
Tipo de Consequência		Descrição	Gravidade
Operacional	Produção	<input checked="" type="checkbox"/> Paragem do forno W8	Muito Alta
	Qualidade	<input type="checkbox"/>	Escolha um item.
	Segurança	<input type="checkbox"/>	Escolha um item.
	Ambientais	<input type="checkbox"/>	Escolha um item.

Figura 6.7 - Consequência resultantes da falha

Posteriormente, procedeu-se a realização de uma avaliação dos custos referentes à reparação, como gastos em materiais, mão de obra e outros, e dos custos referentes à produção. Nesta avaria não foram identificados nenhuns tipos de custos, como mostra a Figura 6.8, pois no trabalho de reparação executado pela equipa de prevenção não foi necessário a substituição de materiais / componentes do ativo e, apesar de ter existido paragem na linha, esta não teve consequências referentes a custos devido a ter sido assegurada a exportação de produto final por meio das reservas existentes na Fábrica.

4 - Custos		
Tipo	Comentários	Valor
Reparação	Materiais	
	Mão-de-Obra	
	Outros	
Produção		
Total		

Figura 6.8 - Custos resultantes da falha

Concluída a análise de custo, segue-se para a elaboração do Diagrama de Ishikawa (Espinha de peixe). O Diagrama de Ishikawa, conforme descrito no Capítulo 4 é uma ferramenta usada para encontrar, organizar, classificar, documentar e exibir graficamente as causas de um determinado problema, agrupadas por categorias, que facilitam o *brainstorming* de ideias e a análise da ocorrência. Desta forma, consideram-se 6 causas neste diagrama:

- Método, análise de como a forma de trabalho influenciou a avaria;
- Máquina, consideração das causas originadas pela avaria no equipamento;
- Medida, abrange as causas que envolvem as métricas que são usadas para medir, monitorizar controlar o trabalho;
- Meio Ambiente, identificação de como o meio em que a atividade está a ser desenvolvida influência o problema;
- Material, análise do ambiente interno e externo da empresa e identificação dos fatores que favorecem a ocorrência das avarias;
- Mão de Obra, identificação de como os trabalhadores influenciam o processo.

Com base nestas causas, elaborou-se o diagrama começando por definir a avaria em resolução no lado direito da seta horizontal. Neste caso a avaria é o doseador de carvão K8U01 com oscilações. Em seguida traçaram-se as setas na diagonal que caracterizam cada uma das 6 causas definidas, realizando-se por último um *brainstorming* para definir as possíveis causas, pelo que no caso da falha em questão só existiram 4 causas possíveis identificadas no Método, Máquina, Medida e Meio Ambiente, sendo elas:

- Falta de revisão ao doseador durante a paragem de forno;
- Bloqueio do conjunto de suporte do doseador;
- Feedback de carga incorreto no sistema;

Na Figura 6.9 está representado o Diagrama de Ishikawa obtido na análise.

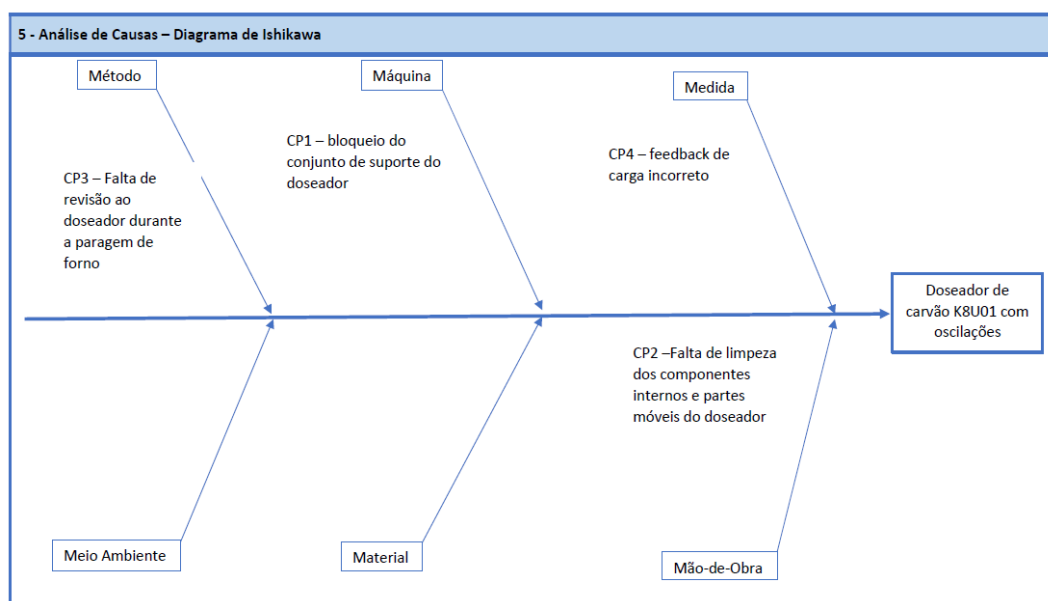


Figura 6.9 - Diagrama de Ishikawa para a falha em análise

Finalizado o processo de criação do diagrama, seguiu-se para a identificação das causas possíveis na etapa da “Análise de Causas” por meio da elaboração de um diagrama de falha. O objetivo deste diagrama é, através da falha detetada, identificar todas as possíveis causas que podem ter originado a falha principal do ativo. Na Figura 6.10 está representado o Diagrama de Falha obtido.

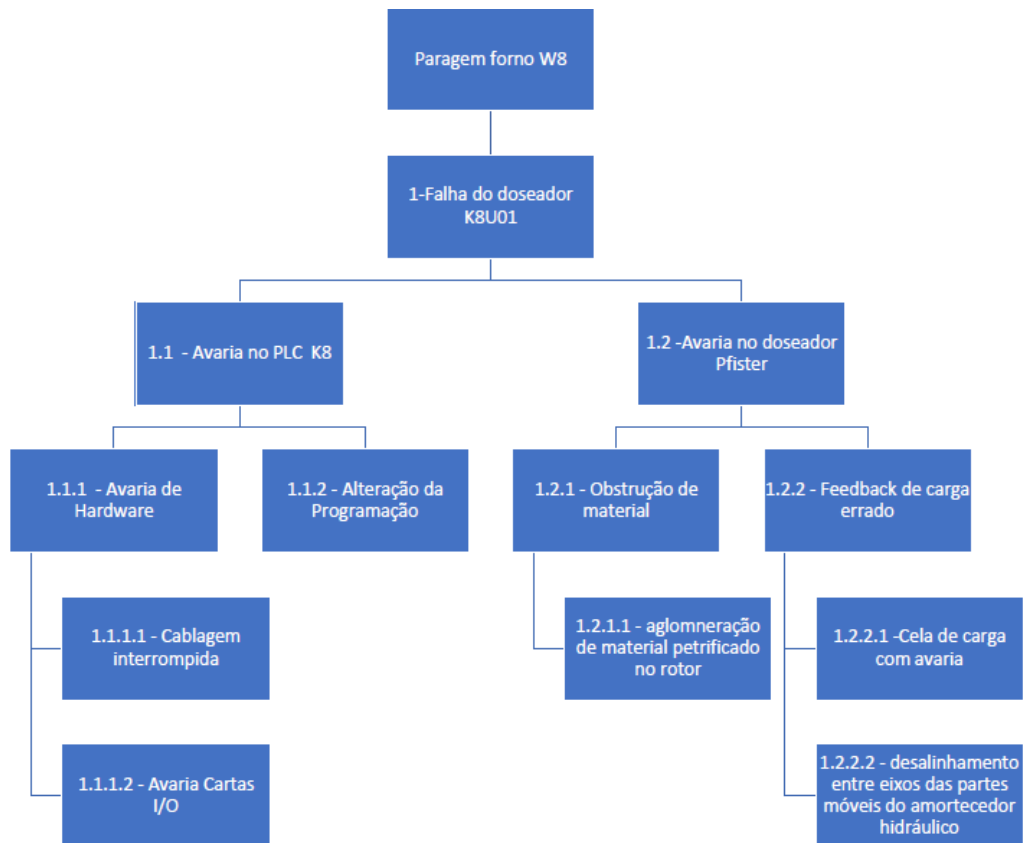


Figura 6.10 - Diagrama de Falha resultante da falha em análise

Com as possíveis causas identificadas, iniciou-se o processo de validação onde se verifica se estas ocorreram ou não. Desta forma, conclui-se, por meio da análise no local do ativo e dos registos da equipa de prevenção que atendeu a ocorrência, que a falha do doseador ocorreu devido a uma avaria no doseador e não no PLC sendo que esta avaria foi despoletada por obstrução de material, ou seja, material que se encontrava aglomerado no local e que causou a prisão no rotor do doseador. Também se verificou que o feedback de carga estava errado pelo sistema, devido ao desalinhamento entre os eixos das partes móveis do amortecedor hidráulico que permitiu a leitura do sistema. Na Figura 6.11 está representada a listagem de causas possíveis e a validação com os respetivos comentários, sendo que na validação podem-se concluir uma das três opções:

- VA, verificou-se que aconteceu;
- NV, verificou-se que não aconteceu;
- NA, não foi possível verificar.

7 - Análise de Causas - Listagem					
Código	Causas Possíveis	VA	NV	NA	Comentários
CP1	Falha do doseador K8U01	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
CP1.1	Avaria no PLC K8	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
CP1.1.1	Avaria de Hardware	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
CP1.1.1.1	Cablagem interrompida	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
CP1.1.1.2	Avaria cartas I/O	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
CP1.1.2	Alteração na programação	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
CP1.2	Avaria no doseador Pfister	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
CP1.2.1	Obstrução de material	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
CP1.2.1.1	Aglomerado de material petrificado no rotor	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Pedras no interior do tambor do Pfister
CP1.2.2	Feedback de carga errado	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Ao pressionar o conjunto, o valor em mA não acompanhava o movimento oscilatório
CP1.2.2.1	Cela de carga com avaria	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
CP1.2.2.2	Desalinhamento entre eixos das partes móveis da cela de carga	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Figura 6.11 - Análise da Lista de Causas

Por último, iniciou-se a análise dos "5 Porquês". Esta análise permite reforçar todos os métodos utilizados anteriormente na RCA e validar a causa raiz da falha. Para elaborar a análise foi necessário iniciar com a questão da paragem do forno W8 e perguntar o porquê de este ter parado até se chegar a real causa desta paragem. Nesta análise confirmou-se que a paragem do forno se deveu a cela de carga estar avariada e não permitir a leitura correta do sistema. Na Figura 6.12 está representada a análise dos "5 Porquês" elaborada.

8 - Análise de 5 Porquês	
Código	Comentários
Porquê 1	Paragem forno W8
Porquê 2	Oscilações Pfister Carvão
Porquê 3	Feedback de carga errado
Porquê 4	Cela de carga com avaria
Porquê 5	desalinhamento entre eixos das partes móveis do amortecedor hidráulico que suporta o tambor

Figura 6.12 - Aplicação dos 5 Porquês na falha em análise

Com base na análise efetuada, conclui-se que a paragem do forno ocorreu devido a material aglomerado no rotor do doseador do doseador que, conseqüentemente, provocava a obstrução da alimentação de material elevando a velocidade para o máximo. Para além desta causa, verificou-se outra causa na origem da falta de condições de alimentação que consistiu na cela de carga do doseador estar a fazer a leitura da carga errada da carga existente no doseador e induzir os operadores da sala de comando a erro e a conseqüente paragem do forno.

6.4.2 Implementação das medidas

Com base nos dados recolhidos e analisados no RCA, permitiu-se determinar algumas medidas de prevenção de ocorrência da falha bem como medidas corretivas imediatas para reparar a falha e permitir que o ativo volte ao seu funcionamento normal.

Como a falha ocorrida no ativo causou a paragem e impediu o arranque do doseador e consequente o do Forno, foi necessário intervir de imediato para resolver os problemas detetados à priori. Desta forma, quando se analisou o ativo detetou-se, conforme descrito na RCA, que o ativo tinha material aglomerado no rotor do doseador o que impedia o seu funcionamento pelo que foi necessário a equipa de prevenção proceder à limpeza do interior do rotor de forma a permitir o seu devido funcionamento, sendo aplicada de imediato esta medida corretiva.

Outra medida corretiva que foi necessário executar de imediato foi a correção do desalinhamento das partes móveis do amortecedor, pois sem este alinhamento o sistema continuava a indicar que a carga estava elevada, o que induzia a erro a equipa da sala de comando que executa a vigilância dos equipamentos. Na Figura 6.13 estão representadas as medidas corretivas imediatas executadas na reparação da avaria, estas medidas foram executadas pela equipa de prevenção.

9 - Medidas Corretivas Imediatas		Foram tomadas ações imediatas para eliminar ou diminuir os efeitos da falha?		Sim	<input checked="" type="checkbox"/>	Não	<input type="checkbox"/>
Nº	Medida	Centro de Trabalho	Ordem				
1	Limpeza do interior do rotor do tambor	FSPQE					
2	Correção do desalinhamento das partes móveis do amortecedor	FSRE					

Figura 6.13 - Medidas Corretivas Imediatas aplicadas na resolução da falha

A partir da elaboração da RCA, determinaram-se medidas preventivas para evitar que as causas raízes analisadas voltassem a acontecer. Conclui-se, assim, depois de analisar a informação disponibilizada referente à manutenção dos ativos físicos, que já existia um plano de manutenção para este ativo, sendo que este plano era efetuado com periodicidade semestral, conforme demonstrado na Figura 6.14.

Figura 6.14 - Plano de Manutenção em vigor para o Doseador

Para a evitar a ocorrência da falha, determinou-se que era necessário rever o plano de manutenção preventiva e alterar a periodicidade no caso de se verificar que não está de acordo com a criticidade. Este plano permitirá detetar componentes críticas nos ativos e proceder à sua reparação antes da ocorrência de falhas que provoquem a paragem prolongada do ativo e, conseqüentemente, diminuam a disponibilidade operacional do ativo. Na Figura 6.15 está representada a medida preventiva determinada para prevenir a ocorrência deste género de falha.

10 - Medidas Preventivas/Melhoria		É possível levar a cabo alguma ação para evitar que a falha se repita?		Sim	<input checked="" type="checkbox"/>	Não	<input type="checkbox"/>
Nº	Medida	Nota	Responsável	Data estimada de implementação			
1	Revisão do Plano Preventivo	10152889	Engenharia	31/12/2023			

Figura 6.15 - Medidas Preventivas a serem aplicadas para prevenir a falha

No subcapítulo seguinte será analisado ao detalhe o plano de manutenção implementado para o ativo físico em análise.

6.5 Plano de Manutenção

Proveniente da elaboração do RCA, foi determinada uma ação preventiva, conforme referido no subcapítulo anterior, com base nas ordens existentes até à data para o ativo em análise. Quando analisadas as ordens de manutenção atuais para o ativo onde ocorreu a falha, detetou-se que já existia um plano de manutenção preventivo, no entanto este plano não estava a ser eficaz para prevenir a ocorrência da falha analisada na RCA. Desta forma, foi necessário rever o plano de manutenção e definir uma nova periodicidade para prevenir a ocorrência da avaria analisada neste caso de estudo e

garantir o funcionamento correto do ativo assim como a detecção de anomalias antecipadamente.

O plano de manutenção preventiva consiste num conjunto de ações e atividades periódicas que visam garantir que os ativos físicos operam sem falhas ou avarias inesperadas. Este tipo de manutenção permite garantir a eficiência global do ativo e a disponibilidade operacional através da minimização de fatores que provoquem anomalias. Contribui, assim, para um fluxo contínuo de trabalho, para economizar recursos financeiros, aumentar a vida útil e eficiência dos ativos físicos.

Um dos pontos cruciais na ocorrência da falha analisada, foi o facto de ser o equipamento que maior impacta a fiabilidade e a disponibilidade operacional do ativo e provoca paragem do elemento fundamental à produção de cimento, o forno. O plano de manutenção irá permitir identificar em primeira análise a possibilidade de ocorrer uma falha e atuar antes de esta ocorrer, garantido, assim, o aumento da disponibilidade operacional do ativo e da fiabilidade, sendo um dos objetivos deste estudo.

Depois de rever-se o plano verificou-se que este estava desatualizado e com operações em falta, pelo que foi necessário definir uma nova lista de operações que devem ser executadas aquando da manutenção sistemática, tendo-se definido a lista apresentada na Figura 6.16.

Plano de Trabalho	127-PREV	Divisão	MM	Tempo Total Execução (hs)	6 : 00
Descrição	Preventiva - Doseador Pfister - 4 SEMANAS				
Atividade		Mão-de-Obra			
Op.	Descrição	Código	Qtde		
10	Utilizar EPI's de acordo com a necessidade da tarefa realizada	MM-MEC	4		
20	Verificar se não existem riscos e condições inseguras para realização do trabalho	MM-MEC	4		
30	Elaborar análise preliminar de riscos da atividade (APR) e permissão de trabalho (PT) quando necessário	MM-MEC	4		
40	Consignar equipamento	MM-MEC	4		
50	Revisão do motor quanto a parafusos soltos, em falta, fissuras e sujidade	MM-MEC	4		
60	Revisão do redutor quanto a parafusos soltos, em falta, fissuras, sujidade, fugas e nível	MM-MEC	4		
70	Revisão polias e correias quanto a limpeza, desgaste, fissuras, alinhamento e danos	MM-MEC	4		
80	Revisão das proteções mecânicas quanto a instalação, fixação, danos e deformações	MM-MEC	4		
90	Revisão das mangueiras de fluidização e conexões quanto à presença de ressecamento, fissuras, furos e fugas	MM-MEC	4		
100	Revisão da estrutura metálica quanto a fixação, furos, vedação, revestimento, fissuras e deformações	MM-MEC	4		
110	Revisão de dilatadores de entrada e saída quanto a desgaste, furos, fissuras e fugas	MM-MEC	4		
120	Revisão de tubulações de entrada e saída quanto a desgaste, furos, fugas, deformações e fixação	MM-MEC	4		
130	Revisão das toldas de entrada e saída quanto a limpeza e acumulação de material	MM-MEC	4		
140	Verificação do sistema de medição de carga quanto a desalinhamentos	MM-MEC	4		
150	Testagem do sistema de medição de carga	MM-MEC	4		
160	Revisão das portas de inspeção quanto a desgaste, furos, fugas, vedação, deformações e fixação	MM-MEC	4		
170	Revisão do conjunto rotativo quanto a vedações, desgaste e fugas	MM-MEC	4		
180	Revisão das plataformas de acesso e corrimões quanto a corrosão, fissuras, danos e deformações	MM-MEC	4		
190	Realizar limpeza geral do conjunto	MM-MEC	4		
200	Testar equipamento e desconsignar	MM-MEC	4		

Figura 6.16 - Lista de tarefas do Plano de Manutenção para o Pfister

Na elaboração desta lista, teve-se em consideração a causa principal da falha analisada neste caso de estudo e definiram-se operações que a permitissem detetar, tais como:

- Revisão das toldas de entrada e saída quanto a limpeza e acumulação de material, como uma das causas da ocorrência de falha foi o material acumulado na alimentação do doseador foi definido uma operação que permite detetar a presença de material acumulado e proceder à limpeza caso se confirme a presença de material;
- Verificação do sistema de medição de carga quanto a desalinhamentos, como uma das causas da ocorrência de falha foi o sistema de medição de carga estar desalinhado definiu-se uma operação que permita avaliar possíveis desalinhamentos e proceder à sua resolução;
- Testagem do sistema de medição de carga, definiu-se uma operação para testagem do sistema de medição de carga de forma a validar se a leitura de carga no sistema corresponde à real carga existente no ativo.

Com a lista de operações definida, foi necessário determinar a nova periodicidade da realização do plano de manutenção. Para definir a periodicidade foi necessário definir a criticidade do ativo físico primeiramente, tendo-se recorrido ao método ABC. Como explicado no Capítulo 3, o método ABC permite definir o nível de criticidade dos ativos de acordo com grau de importância de cada um deles e classificando-os como A, B ou C, sendo que A os ativos mais importantes na produção e que menos podem falhar pelo que exigem uma maior vigilância e manutenção e os C são os ativos menos cruciais à produção e que não exigem tanta vigilância.

Para determinar a criticidade, avaliaram-se os seguintes critérios pelo método ABC, sendo que a escolha dos critérios foi realizada de acordo com o mais favorável à organização:

- Segurança / Meio Ambiente, de que forma afeta a segurança ou o meio ambiente;
- Qualidade, de que forma afeta a qualidade do produto final;
- Produção, de que forma afeta a produção do produto final;
- Gravidade de falha, qual a gravidade da falha;
- Custo de reparação, qual o custo de reparação em caso de falha.

Na Tabela 6-4 está representado o método de classificação de cada critério em A, B ou C.

Tabela 6-4 - Método de Classificação de cada critério

Crítérios de avaliação

		A	B	C
Fatores de Avaliação	Segurança / Meio Ambiente	No caso de falha provoque condição insegura pessoal e/ou patrimonial, e/ou poluição agredindo o meio ambiente e a comunidade	No caso de falha provoque poluição localizada e contida, sem agredir o meio ambiente	No caso de falha não provoque problemas de segurança e poluição
	Qualidade	No caso de falha a qualidade do cimento é afetada (produto final)	No caso de falha a qualidade dos produtos em processo é afetada (farinha, clínquer, areia)	No caso de falha não afeta a qualidade de produtos finais ou em processo
	Produção	No caso de falha a produção/expedição é interrompida e o volume não é recuperável (há impacto no fornecimento para o cliente)	No caso de falha a produção/expedição é interrompida ou diminuída e o volume é recuperável (não há impacto no fornecimento para o cliente)	No caso de falha não afeta a produção/expedição
	Gravidade de Falha	No caso de falha paralisa toda fábrica	No caso de falha paralisam fornos ou um único equipamento que alimenta outros equipamentos comuns	No caso de falha não pára a fábrica ou fornos ou equipamentos que alimentam equipamentos comuns
	Custo de reparação	No caso de falha o custo de reparo é acima de 100.000€	No caso de falha o custo de reparo está entre 10.000€ e 100.000€	No caso de falha o custo do reparo é inferior a 10.000€

Com base no método de classificação de cada critério, procedeu-se à realização da criticidade para o ativo físico onde ocorreu a falha, Doseador. Na Tabela 6-5 encontra-se representado os resultados obtidos da aplicação do método ABC.

Tabela 6-5 - Aplicação do método ABC ao Ativo Físico em estudo

Fatores de Avaliação	Critério de Avaliação
Segurança / Meio Ambiente	No caso de falha não provoque problemas de segurança e poluição - C
Qualidade	No caso de falha a qualidade do cimento é afetada (produto final) - A
Produção	No caso de falha a produção/expedição é interrompida e o volume não é recuperável (há impacto no fornecimento para o cliente) - A
Gravidade de Falha	No caso de falha paralisam fornos ou um único equipamento que alimenta outros equipamentos comuns - B
Custo de reparação	No caso de falha o custo de reparo é acima de 100.000€ - A

Os fatores de avaliação foram definidos com base no seguinte:

- Segurança / Meio Ambiente, em caso de falha o doseador não é um equipamento que cause poluição pois não é constituído por nenhum filtro de mangas que faça filtragem do ar emitido para a atmosfera e não produz emissões na sua operação;
- Qualidade, em caso de falha irá afetar a produção de cimento pois este ativo tem como função dosear a incorporação de carvão na constituição do cimento na linha de trabalho, o que pode condicionar a produção da linha onde está inserido;
- Produção, em caso de falha pode interromper a linha de produção e apesar da fábrica operar com duas linhas, só uma linha não é capaz de responder à procura do mercado;
- Gravidade de falha, em caso de falha do doseador o forno pára pelo que afeta ativos como consequência da sua paragem;
- Custo de reparação, em caso de avarias graves o custo de reparação pode ser superior a 100.000€ visto que qualquer componente da sua constituição tem um custo elevado.

Conclui-se assim, por meio da análise realizada por meio do método ABC, que o ativo físico apresenta uma classificação A visto ter 3 fatores classificados com A, o que revela que este ativo é essencial para a organização e produção sendo que o foco dos recursos deve ser priorizado neste de forma a evitar a perda da sua funcionalidade. Em caso de paragem deste ativo, reduz a capacidade produtiva da organização o que pode

comprometer a qualidade do produto final, cimento, aumentando em mais de 20% os custos de manutenção.

Com base na criticidade identificada para o ativo definiu-se a periodicidade da preventiva a ser executada, sendo que neste caso optou-se por uma periodicidade mensal visto ser um ativo que estava a ter algumas falhas causando constrangimentos na produção, estar classificado como A e ser essencial à produção. Neste caso como o ativo está classificado com criticidade A, a manutenção preventiva deve ser realizada mensalmente para evitar a ocorrência de falhas inesperadas e detetar antecipadamente possíveis falhas.

Por fim modificou-se o plano em sistema de acordo com os novos dados, conforme representado na Figura 6.17, definindo-se a o centro de trabalho que iria executar a ordem, sendo que neste caso como se trata de uma ordem de manutenção preventiva a equipa responsável pela sua execução é a equipa mecânica existente na fábrica.

The screenshot displays a software interface for maintenance planning. At the top, the window title is 'Plano manutenção' with the ID '5437' and the name 'Preventiva_Pfister_K8U01_Mensal'. Below the title bar, there are tabs for 'Ciclos plano de manutenção', 'Parâmetro programação plano manutenção', 'Dados adicionais plano de manutenção', and 'Solicitações p...'. The main area contains several input fields: 'Ciclo/unidade' set to '1 MES', 'Texto para ciclo' set to 'mensal', and 'Offset/unidade' set to '0 MES'. Below this, there are tabs for 'Item', 'Lista de objetos item', and 'Localização item'. The 'Item' tab is active, showing 'Item manutenção' as '22749' and 'Preventiva_Pfister_K8U01_Mensal'. Under 'Objeto de referência', 'Loc. instalação' is 'FSK8U01' and 'ECLUSA'. The 'Dados de planeamento' section includes: 'Centro planej.' '1100' (Secil - Outão), 'Tp. de ordem' '0003' (Preventiva - Sistemática), 'CenTrab respon.' 'FSRM02 / 1100' (Preventiva Mecânica Ár...), 'Prioridade' 'Média', 'Grp.plnj.PM' '030' (FSGT-Cais (M/E)), 'Tp.ativ.PM' '006' (Revisão), and 'Norma de apropriação' with a dropdown menu. There is also a checkbox for 'Não liberar imediatam.'.

Figura 6.17 - Alteração do Plano de Manutenção Preventivo do Pfister

Com o plano modificado procedeu-se à alteração da programação semestral para mensal, conforme demonstrado na Figura 6.18, e à execução de acordo com a data programada de execução.

Lista programações					
DtPlanej	Data de solc.	Data de con...	Tp.programação / status	Desv...	Unidade
06.12.2023		17.12.2023	Programado,concl.	11	Di
06.01.2024		22.01.2024	Programado,concl.	16	Di
06.02.2024		20.02.2024	Programado,concl.	14	Di
06.03.2024		12.03.2024	Programado,concl.	6	Di
06.04.2024		15.04.2024	Programado,concl.	9	Di
06.05.2024		27.05.2024	Programado,concl.	21	Di
06.06.2024		27.06.2024	Programado,concl.	21	Di
06.07.2024		16.07.2024	Programado,concl.	10	Di
06.08.2024			Programado,Solicitud		
06.09.2024	06.09.2024		Programado,espera		
06.10.2024	06.10.2024		Programado,espera		
06.11.2024	06.11.2024		Programado,espera		
06.12.2024	06.12.2024		Programado,espera		
06.01.2025	06.01.2025		Programado,espera		
06.02.2025	06.02.2025		Programado,espera		

Figura 6.18 - Programação do Plano de Manutenção

6.6 Análise dos Resultados

Concluída a aplicação da metodologia RCA e a implementação das medidas resultantes da RCA, é necessário analisar novamente os dados de Disponibilidade Operacional, MTBF e MTTR. Para proceder a esta análise, irá utilizar-se os dados referentes aos primeiros 6 meses de 2024, desde janeiro até junho, visto que as medidas resultantes da RCA começaram a ser aplicadas em dezembro de 2023.

Desta forma, foi necessário, primeiramente, consultar o software de gestão disponibilizado pela empresa e recolher os tempos totais de paragens do ativo (*downtime*) e o tempo em que o ativo esteve em condições de ser utilizado (*uptime*), tal como efetuado no subcapítulo 6.3.2. A recolha destes dados será realizada para o acumulado ano até junho e de forma individual para cada mês.

Na Tabela 6-6 está representado os dados recolhidos para cada intervalo de tempo definido.

Tabela 6-6 - Uptime, Downtime, Tempo de Reparação e Número de Avarias obtido para os intervalos de tempo em análise para os Ativos Físicos em estudo

Ativo	Intervalo de tempo	Uptime (horas)	Downtime (horas)	Tempo Reparação (Horas)	Número de Avarias
Forno W8	01/01/2024 31/01/2024	744	0	0	0
Forno W8	01/02/2024 29/02/2024	696	0	0	0
Forno W8	01/03/2024 31/03/2024	730,6	13,7	13,7	4
Forno W8	01/04/2024 30/04/2024	473,6	246,4	246,4	15
Forno W8	01/05/2024 31/05/2024	674,9	69,1	69,1	16
Forno W8	01/06/2024 30/06/2024	698,6	21,4	21,4	10
Forno W8	01/01/2024 30/06/2024	3954,5	350,5	350,5	45
K8U01	01/01/2024 31/01/2024	738	6	0	0
K8U01	01/02/2024 29/02/2024	690	6	0	0
K8U01	01/03/2024 31/03/2024	738	6	0	0
K8U01	01/04/2024 30/04/2024	711,6	8,4	2,4	1
K8U01	01/05/2024 31/05/2024	738	6	0	0
K8U01	01/06/2024 30/06/2024	713,9	6,1	0,1	1
K8U01	01/01/2024 30/06/2024	4329,5	38,5	2,5	2

Com base nos valores de *Uptime*, *Downtime* e Tempo de Reparação é possível calcular a Disponibilidade Operacional bem como o MTBF e o MTTR através das Equações 3.13, 2.1 e 2.2 apresentadas no Capítulo 3. Na Tabela 6-7 estão consolidados os dados obtidos para o cálculo da Disponibilidade Operacional, do MTBF e MTTR.

Tabela 6-7 - Disponibilidade, MTBF e MTTR calculados

Ativo	Intervalo de tempo	Disponibilidade	MTBF	MTTR
Forno W8	01/01/2024 31/01/2024	100%		
Forno W8	01/02/2024 29/02/2024	100%		
Forno W8	01/03/2024 31/03/2024	98,2%	182,6	3,4
Forno W8	01/04/2024 30/04/2024	65,8%	31,6	16,4
Forno W8	01/05/2024 31/05/2024	90,7%	42,2	4,3
Forno W8	01/06/2024 30/06/2024	97%	69,9	2,1
Forno W8	01/01/2024 30/06/2024	91,9%	87,9	7,9
K8U01	01/01/2024 31/01/2024	99,2%		
K8U01	01/02/2024 29/02/2024	99,1%		
K8U01	01/03/2024 31/03/2024	99,2%		
K8U01	01/04/2024 30/04/2024	98,8%	711,6	2,4
K8U01	01/05/2024 31/05/2024	99,2%		
K8U01	01/06/2024 30/06/2024	99,2%	713,9	0,1
K8U01	01/01/2024 30/06/2024	99,1%	2164,8	1,25

Com os dados calculados, verificou-se que a Disponibilidade Operacional tanto do Forno 8 como do Doseador aumentaram, e o valor de MTBF aumentou pelo que o intervalo de tempo entre falhas aumentou, deixando de ocorrer falhas com maior frequência. Contudo, para efetuar uma análise mais detalhada, calculou-se a Disponibilidade Operacional para os primeiros 6 meses de 2023. Na Tabela 6-8 estão representados os dados obtidos para a Disponibilidade Operacional referente aos primeiros 6 meses de 2023 para o Forno 8 e Doseador.

Tabela 6-8 - Disponibilidade Operacional obtida para o intervalo de tempo em análise

Ativo	Intervalo de tempo	Uptime (horas)	Downtime (horas)	Disponibilidade
Forno W8	01/01/2023 31/01/2023	465,3	278,7	62,5%
Forno W8	01/02/2023 29/02/2023	606	66	90,2%
Forno W8	01/03/2023 31/03/2023	586,6	157,4	78,8%
Forno W8	01/04/2023 30/04/2023	604,2	115,8	83,9%
Forno W8	01/05/2023 31/05/2023	638,8	105,2	85,9%
Forno W8	01/06/2023 30/06/2023	580,7	139,3	80,7%
Forno W8	01/01/2023 30/06/2023	3481,6	862,4	80,1%
K8U01	01/01/2023 31/01/2023	465,2	278,8	62,5%
K8U01	01/02/2023 29/02/2023	631,8	40,2	94%
K8U01	01/03/2023 31/03/2023	692,6	51,4	93,1%
K8U01	01/04/2023 30/04/2023	686,4	33,6	95,3%
K8U01	01/05/2023 31/05/2023	730,3	13,7	98,2%
K8U01	01/06/2023 30/06/2023	656,7	63,3	91%
K8U01	01/01/2023 30/06/2023	3863	481	88,9%

Por meio da análise dos dados obtidos para os primeiros 6 meses de 2023 e comparando com os primeiros 6 meses de 2024, verifica-se que os valores da Disponibilidade Operacional subiram em 2024 posteriormente à implementação do novo plano de manutenção. Apesar de em abril de 2024 se ter verificado uma descida na disponibilidade do Forno 8 comparativamente com 2024, esta descida não está relacionada com o Doseador visto que o mesmo aumentou a sua disponibilidade em 3,5% em comparação com 2023, e quando analisado os dados de paragens, verificou-se que esta paragem está relacionada com uma chumaceira do 4º apoio do forno, conforme demonstrado na Tabela 6-9 obtida do software de paragens.

Tabela 6-9 - Top 5 das Maiores Paragens do Forno 8 em Abril

LocalName	Event Frame Start Time	Event Frame End Time	Equipment	Duração	Causa1	Causa	Causa3	Comments
Forno W8	28-04-2024 05:35:08	2024-05-04 01:51:06	FSW8W04	140.3	Não Programada	Anomalia Mecânica	Equipamento Danificado / Defeituoso: Reparação / Substituição / Ajuste	Paragem devido a temperatura alta na chumaceira 1 do 4º apoio, foi detectado um parafuso no interior da chumaceira. Tampa lateral da chumaceira partida
Forno W8	02-04-2024 06:36:06	2024-04-03 05:04:39	FSJ8	22.5	Não Programada	Anomalia Elétrica	Avaria subestação	Paragem do forno devido a stock de farinha baixo e impossibilidade de operar o moinho R1.
Forno W8	25-04-2024 03:30:39	2024-04-25 17:25:39	FSW8U06	13.9	Não Programada	Anomalia de Processo	Encravamento de material em equipamento de transporte	W8U06 carregado e preso
Forno W8	15-04-2024 09:49:09	2024-04-15 18:37:06	FSC1L03	8.8	Não Programada	Anomalia de Processo	Qualidade do produto	Paragem por stock de farinha, problemas no transporte de extração da pilha da Marga Pilha concretada
Forno W8	04-04-2024 07:31:39	2024-04-04 15:26:35	FSW8	7.9	Programada	Produção	Plano de produção	Stock baixo farinha. R1 com rampa cheia

De forma a validar que as maiores causas de paragem do Forno 8 em 2024 não provém do Doseador K8U01 e que a implementação do plano de manutenção preventiva revelou-se eficaz, procedeu à elaboração dos Gráficos de Pareto para análise das causas registadas nos primeiros 6 meses de 2023 e nos primeiros 6 meses de 2024, conforme demonstrado nas Figuras 6.19 e 6.20.

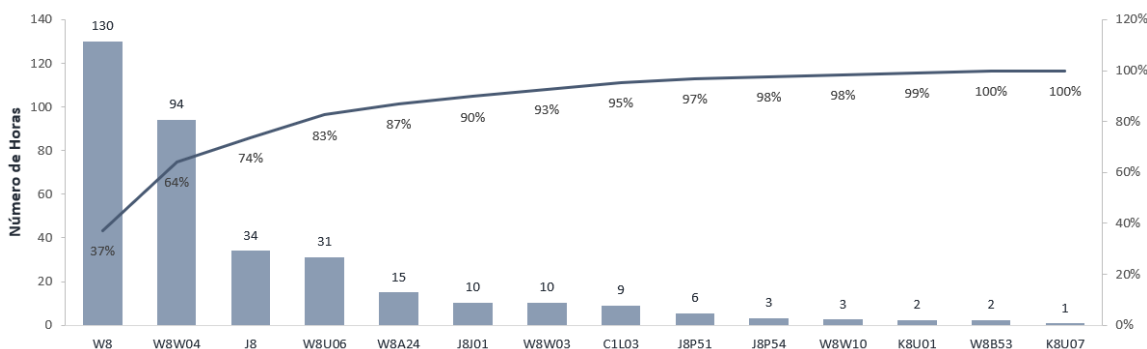


Figura 6.19 - Gráfico de Pareto para as ocorrências do Forno 8 nos primeiros 6 meses de 2024

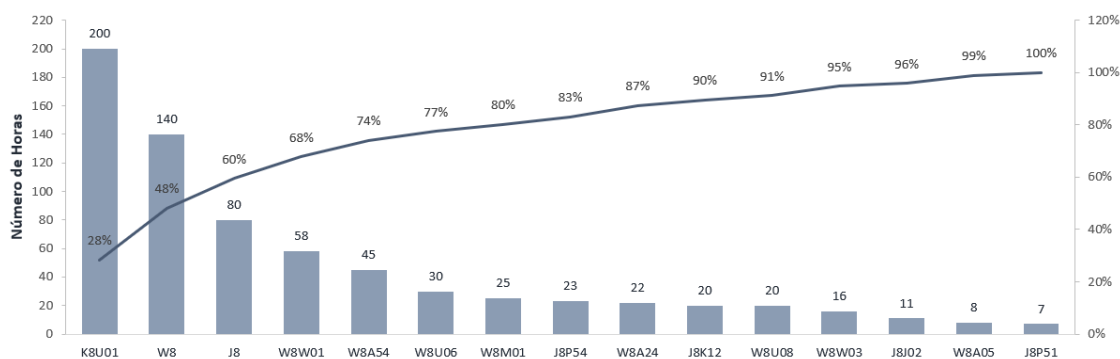


Figura 6.20 - Gráfico de Pareto para as ocorrências do Forno 8 nos primeiros 6 meses de 2024

Pela análise dos gráficos, verifica-se que o doseador K8U01 era o ativo com maior número de horas de paragem nos primeiros 6 meses de 2023 enquanto em 2024 este ativo, para os primeiros 6 meses de 2024, só registou 2 horas de paragem, havendo

uma descida de 198 horas de paragens em comparação com 2023. Quando analisado os dados de paragens, constatou-se que as 2 horas de paragem ativo K8U01 estavam relacionadas com um corte de energias (causa externa) que ocorreu pelo que esta paragem não está relacionada com a causa identificada na elaboração da RCA, conforme demonstrado na Tabela 6-10.

Tabela 6-10 - Dados da Paragem registado do Ativo K8U01

LocalName	Event Frame Start Time	Event Frame End Time	Equipment	Duração	Causa1	Causa	Causa3	Comments
Forno W8	11-04-2024 12:32:09	2024-04-11 14:57:39	FSK8U01	2.4	Fator Externo	Causa Externa	Corte Energia Elétrica / Oscilação Tensão	Pfister do carvão ficou em alarme numa baixa de tensão
Forno W8	20-04-2024 07:12:39	2024-04-20 09:32:09	FSW8	2.3	Não Programada	Anomalia Elétrica	Proteções (Térmico, Disjuntor, Fusível)	Pfister carvão em alarme K8U01
Forno W8	23-06-2024 17:43:09	2024-06-23 19:52:39	FSW8B54	2.2	Não Programada	Anomalia de Processo	Encravamento / limpeza de material em equipamento fixo	Ciclone W8B54 bloqueado

Conclui-se, assim, que a aplicação da metodologia RCA e a implementação das medidas resultantes desta contribuíram para o aumento da Disponibilidade Operacional, aumento do MTBF e diminuição do MTTR devido a pouca ocorrência de falhas tanto do forno 8 como do ativo analisado na RCA, Doseador K8U01, permitindo o aumento do tempo de trabalhos dos ativos e a antecipação de falhas com a implementação de um plano de manutenção realizado de forma contínua.

7 Conclusões e Trabalhos Futuros

7.1 Conclusões

Uma das principais conclusões deste trabalho é relativa à metodologia RCA. Esta metodologia revela-se muito versátil para a identificação e análise dos modos de falha de um ativo e permite reduzir, de forma eficaz, o tempo de inatividade e o consequente aumento da eficiência operacional, quando eliminada definitivamente a causa raiz por ela identificada. Para usufruir de todas as potencialidades desta ferramenta, é necessário que seja realizada um estudo rigoroso e exaustivo do ativo físico em análise, ficando, desta forma, os elementos que realizaram o estudo, com um conhecimento mais aprofundado do ativo e do processo produtivo da organização. No entanto, a RCA exige um alto grau de rigor e compromisso pois trata-se de uma análise minuciosa que exige a colaboração de diferentes áreas e a implementação de ações corretivas e preventivas eficazes para garantir que a causa raiz identificada é completamente ou parcialmente eliminada.

A aplicação da Metodologia RCA no estudo da Disponibilidade Operacional do ativo físico da Indústria Cimenteira analisado nesta dissertação demonstrou ser uma abordagem eficaz para identificar e eliminar a causa fundamental das falhas recorrentes no ativo. Através desta análise detalhada da falha e da implementação de medidas corretivas e preventivas, foi possível não apenas melhorar a Disponibilidade Operacional do ativo, mas também otimizar o desempenho geral do processo produtivo. O estudo evidenciou que, ao focar na eliminação das causas raízes das falhas ocorrentes nos ativos físicos da organização, esta pode reduzir significativamente o tempo de inatividade, aumentar a eficiência operacional e, conseqüentemente, melhorar a competitividade da empresa no mercado ao aumentar a sua produtividade. A adoção sistemática da RCA contribuirá para uma manutenção preventiva mais assertiva e para a sustentabilidade do negócio a longo prazo.

Para além do referido, a combinação da Metodologia RCA com o estudo da criticidade dos ativos pelo recurso ao Método ABC revelou-se uma abordagem robusta na otimização da gestão de ativos. A integração destas metodologias permitiu a identificação precisa das causas raízes das falhas, possibilitando intervenções mais eficazes e direcionadas para o aumento da fiabilidade dos ativos. O estudo da criticidade dos ativos pelo método ABC ajuda a priorizar recursos e ações de manutenção, focando os esforços nos ativos mais críticos para o processo produtivo. Como resultado da aplicação destas metodologias, ocorreu uma melhoria significativa na Disponibilidade Operacional do ativo físico avaliado nesta dissertação bem como um aumento do MTBF

e uma redução do MTTR, o que contribuiu diretamente para a eficiência operacional e para a sustentabilidade da produção. A combinação destas abordagens fornece um *framework* poderoso na tomada de decisões estratégicas na manutenção de ativos, através da maximização da produtividade e a competitividade no setor cimenteiro.

Com a elaboração desta dissertação espera-se ter contribuído para uma visão diferente sobre o desempenho dos ativos físicos de produção da indústria analisada e a sua importante relação com fatores intrínsecos e particulares do contexto onde está inserido, relevando a ligação entre homem e máquina como elemento decisivo na missão da manutenção.

7.2 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, e dando continuidade a este caso de estudo bem como a nova metodologia aplicada na organização (metodologia RCA), apresenta-se algumas propostas de melhoria para as seguintes medidas:

- Implementação de Manutenção Preventiva, adotar tecnologias de monitorização em tempo real e análise preventiva para identificar potenciais falhas antes que estas ocorram, contribuindo assim para o aumento do MTBF e a redução do MTTR;
- Implementação definitiva da RCA, adotar a metodologia RCA de forma definitiva e continua para a análise das causas raízes das falhas que ocorram nos ativos de forma a facilitar o processo de análise de causas e de identificação de medidas eficientes na eliminação de falhas;
- Formação Contínua, a organização deve investir na formação contínua da sua equipa de trabalho, nomeadamente a equipa de manutenção, focando-se em técnicas de RCA e melhores práticas de manutenção, de forma a reduzir o tempo de inatividade e melhorar a eficiência das reparações;
- Priorização dos Ativos Críticos, utilização da análise de criticidade de forma contínua através do método ABC, garantindo, assim, que os recursos são adequadamente alocados para os ativos de maior impacto no processo produtivo, reduzindo o risco de falhas graves;
- Revisão e Otimização dos Planos de Manutenção, revisão e otimização periódica dos planos de manutenção de acordo com a criticidade dos ativos físicos identificada no método ABC, ajustando assim a frequência, os procedimentos e a prioridade dos mesmos;

- Integração de Indicadores de Desempenho, estabelecer metas para os indicadores de desempenho relacionados com a disponibilidade, MTBF e MTTR, enquadrando-os nos objetivos estratégicos da organização;

Estas propostas visam criar um ciclo de melhoria contínua que permite que o desempenho dos ativos é regularmente revisto e otimizado, garantido, assim, a maior eficiência operacional e competitividade da organização.

Referências Bibliográficas

- 15341, N. E. (2022). *Manutenção: Indicadores chave de desempenho (KPIs) da manutenção*. Almada, Portugal: Instituto Português da Qualidade.
- Arunraj, N. S., & Maiti, J. (2013). Risk-based maintenance - Techniques and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 261-271.
- ASQ. (2024). Root Cause Analysis: The Core of Problem Solving and Corrective Action. *American Society for Quality*.
- Assis, R. (2014). *Apoio à decisão em gestão da manutenção*. Lisboa, Portugal: Lidel.
- Blanchard, B. S. (2016). *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. Estados Unidos: CRC Press.
- Borris, S. (2006). *Total Productive Maintenance*.
- Cabral, J. S. (2006). *Organização e Gestão da Manutenção dos conceitos à prática*. Lisboa: LIDEL-Edições Técnicas, Lda.
- Cabrita, C. M., & Silva, C. M. (2002). *Organização e Gestão da Manutenção Industrial*.
- Campbell, J. D., & Reyes-Picknell, J. V. (2016). *Uptime Strategies for Excellence in Maintenance Management*. Flórida: CRC Press.
- Carnero, M. C. (2017). Classification and analysis of maintenance strategies: A review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 430-452.
- CEN. (2004). *EN 197-1:2000*. European Committee for Standardization.
- Chong, M., Chin, J., & Hamzah, H. (2012). *Transfer of total productive maintenance practice to supply chain*.
- Dhillon, B. (2006). *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. Boca Raton, Florida, United States of America: CRC Press.
- Didelet, F. J., & Sena, F. M. (2012). *Fiabilidade e a sua Aplicação à Manutenção*. Porto: Pubindústria, Edições Técnicas.
- Ebeling, C. E. (2020). *Reliability and Maintainability Engineering*. Waveland Press: Long Grove, IL.
- Fogliatto, F. S., & Ribeiro, J. L. (2011). *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier.
- García Márquez, F. P., & Lewis, R. W. (2018). Maintenance management for improving manufacturing performance: A case study. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 215-229.
- García Márquez, F. P., Tobias, A. M., Pinar Pérez, J. M., & Papaelias, M. (2016). Maintenance management of wind turbines structures via SCADA data. *Renewable Energy*, 1331-1345.

- Garza-Reyes, J. A. (2015). Lean and agile maintenance: A review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 41-62.
- Gulati, R., & Smith, S. (2009). *Maintenance and Reliability best practices*. New York: Industrial Press Inc.
- Horenbeek, A. V., & Pintelon, L. (2017). A classification and review of maintenance optimization models. *European Journal of Operational Research*, 707-722.
- IAM. (2015). *Asset Management - an anatomy* (Vol. 3). (Bristol, Ed.) United Kingdom: The Institute Asset Management.
- ICA. (2015). *Geestão de Ativos, Guia para Aplicação da NNorma ABNT NBR ISO 55001*. Latin America, Los Condes, Santiago Chile: International Copper Association.
- Imbabi, M. S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*.
- Kardec, A., & Nascif, J. (2005). *Manutenção Função Estratégica*. Rio de Janeiro.
- Koch, R. (2015). *O Poder 80/20: Os segredos para conseguir mais com menos nos negócios e na vida*. São Paulo, Brasil: Gutenberg.
- Kurtulus, M., & Arıkan, M. (2019). RAMS Analysis for Improving Reliability, Availability, Maintainability, and Safety of Complex Systems. *Procedia CIRP*, 464-469.
- Levitt, J. (2005). *Managing Factory Maintenance*. New York, USA: Industrial Press.
- Mahto, D., & Kumar, A. (2008). Application of root cause analysis in improvement of product quality and productivity. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*.
- Marcorin, W. R., & Lima, C. R. (2003). Análise dos Custos de Manutenção e de Não-Manutenção de Equipamentos Produtivos. *Revista de Ciência & Tecnologia*.
- Marinho, P. S. (2020). *Dissertação: Implementação TPM - Total Productive Maintenance*. Porto, Portugal: Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Márquez, A. C. (2011). *The Maintenance Management Framework*.
- Marquéz, C. A., & Herguedas, A. S. (2004). Learning about failure root cause through maintenance records analysis. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*.
- Matos, J. C. (2013). *Dissertação: Melhoria Contínua numa empresa do ramo automóvel*. Aveiro, Portugal: Universidade de Aveiro.
- Moghaddam, K. S. (2018). Maintenance scheduling of multi-component systems using reinforcement learning and Monte Carlo simulation. *Reliability Engineering & System Safety*, 50-60.
- Montgomery, D. C. (2009). *Introduction to Statistical Quality Control* (Vol. 6). New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Moubray, J. (2017). *Reliability Centered Maintenance* (Vol. 2). United Kingdom: Aladon Ltd.

- NP EN 13306. (2021). *Terminologia da Manutenção*. Almada, Portugal: Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 13460. (2009). *Manutenção – Documentos para manutenção*. Almada, Portugal: Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 4492. (2010). *Gestão da Manutenção*. Almada, Portugal: Instituto Português da Qualidade.
- NP ISO 55000. (2024). *Sistema de Gestão de Ativos*. Almada, Portugal: Instituto Português da Qualidade.
- Patra, S. K., & Kumar, U. (2015). A comprehensive review of maintenance management and optimization techniques. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 34-53.
- Pereira, Z. L., & Requeijo, J. G. (2008). *Qualidade: Planeamento e controlo estatístico de processos*. Lisboa: Prefácio - Edição de Livros e Revistas, Lda.
- Pires, A. C., & Silva, F. J. (2017). Performance indicators for maintenance management: A review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 142-156.
- Pires, A. C., & Silva, F. J. (2017). Performance indicators for maintenance management: A review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 142-156.
- Prabhuswamy, M., Nagesh, P., & Ravikumar, K. (2016). Total Productive Maintenance: A Framework for Maximizing Equipment Effectiveness and Involving Employees at All Levels. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 406-422.
- Rao, S. S. (2017). *Reliability-Based Mechanical Design*. Estados Unidos: CRC Press.
- Raposo, B. S. (2021). *Dissertação: Utilização de ferramentas da qualidade na melhoria do desempenho da produção masterbatches*. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Render, B., Heizer, J., & Munson, C. (2019). *Operations Management Sustainability and Supply Chain Management*. United States of America: Pearson Education.
- Sellito, M. A., & Fachini, S. J. (2014). Análise Estratégica da Gestão de Manutenção Industrial de uma Empresa de Metalmeccânica. *E-TECH: Tecnologias para Competitividade Industrial*.
- Serrat, O. (2017). *The Five Whys Technique*. Philippines: Asian Development Bank.
- Sharma, A. Y., & Deshmukh, S. G. (2015). A literature review and future perspectives on maintenance optimization. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 186-202.
- Smith, A. M., & Hinchcliffe, G. (2016). Implementation of Reliability-Centered Maintenance in Industrial Organizations: A Collaborative Approach. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 368-383.

- Sobral, J. A. (2010). *Dissertação: "Utilização da metodologia RAMS na análise de barreiras de segurança de instalações industriais de risco elevado"*. Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Sondalini, M. (2004). Useful Key Performance Indicators for Maintenance. *Lifetime Reliability*.
- Tsang, A. H. (2016). Maintenance policies in operational research: A review. . *European Journal of Operational Research*, 233-243.
- Tsang, C. H. (2002). Strategic Dimensions of Maintenance Management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*.
- Valente, R. F. (2018). *Dissertação: Organização e Gestão da Manutenção de Equipamentos da Empresa Flamingo, S.A.* Porto, Portugal: Instituto Superior De Engenharia do Porto.
- Wang, H. F., & Hu, H. (2017). A degradation-based approach for optimizing maintenance and replacement decisions. *Reliability Engineering & System Safety*, 97-108.
- Weiss, A. E. (2011). *Key business solutions: essential problem-solving tools and techniques that every manager needs to know*. Grã-Bretanha: Pearson Education Limited.

ANEXO I - RCA

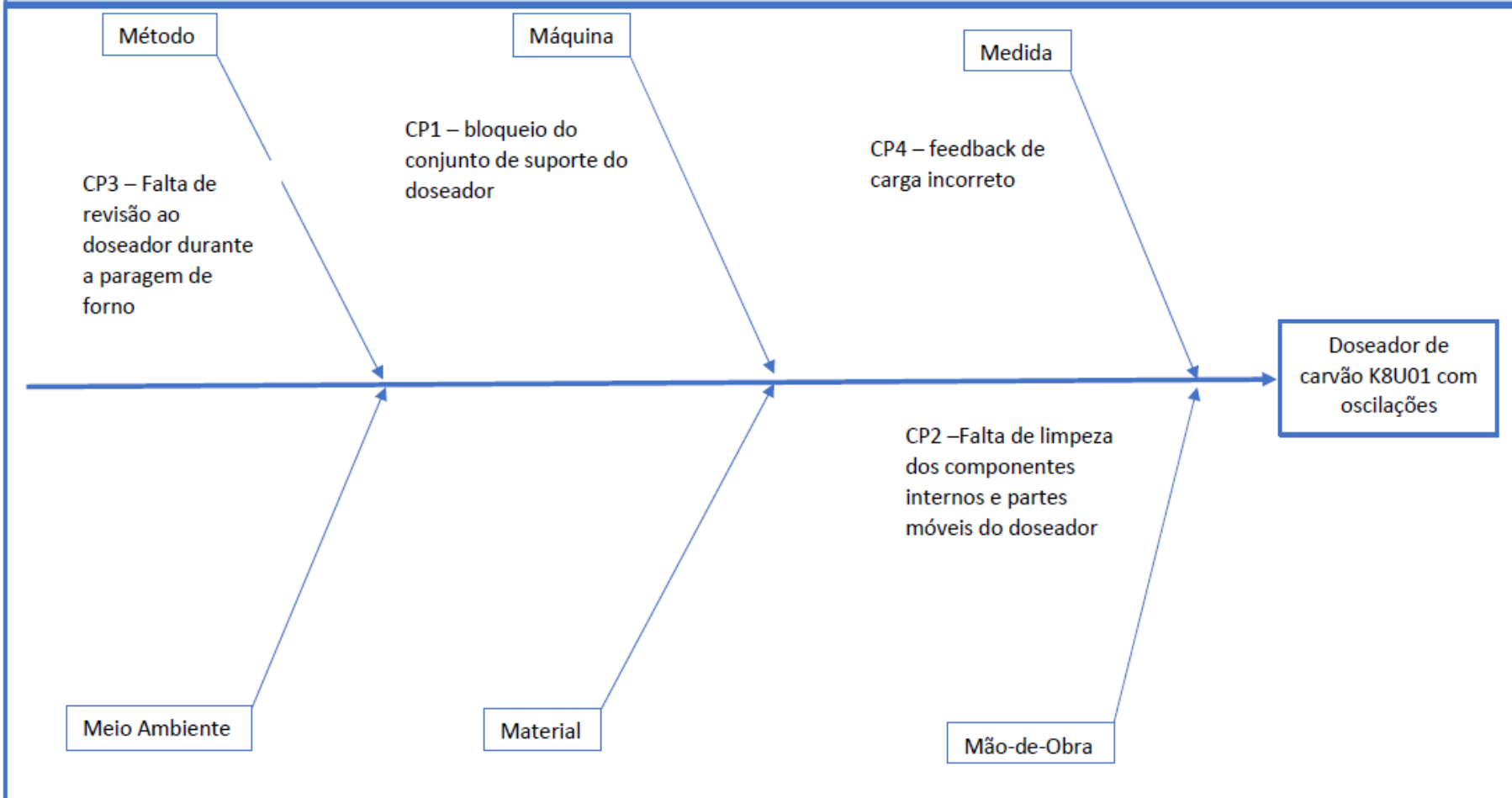
1 - Dados de Cabeçalho			
Elaborado por:	Mariana Gabriel	Data de elaboração:	01/11/2023
Colaborações:		Código:	RCF-23-050

2 - Caracterização						
Modo de Falha	Pfister com carga irregular				Duração	8h54m
Local de Instalação	FSK8U01		Data e Hora		07/01/2023 Das 12:25h às 21:21h	
Como foi detetada:	Insp. Periódica <input type="checkbox"/>	Insp. Fora do Plano <input type="checkbox"/>	Outros <input checked="" type="checkbox"/>		Irregularidade na alimentação de carvão	
Quem detetou?	OPCC		Provocou paragem da máquina?		Sim <input checked="" type="checkbox"/>	Não <input type="checkbox"/>
Descrição da falha						
<p>No dia 08/01, por volta das 00.20h, o operador da sala de comando mandou parar o forno W8 por falta de condições de alimentação de carvão.</p> <p>O doseador de carvão da marca Pfister não seguia o set-point recebido da sala de comando, oscilando a rotação e consequentemente as toneladas/hora de material doseado. Esta irregularidade na alimentação de carvão ao forno provocou grande instabilidade na sua condução, obrigando à paragem do mesmo.</p> <p>Foi solicitada a intervenção da equipa de prevenção elétrica, que em conjunto com a realização elétrica (MTEO), fizeram a análise da avaria, intervindo de seguida. Constatou-se que o rotor do doseador Pfister, estava com material aglomerado, o que obstruía a alimentação de material, elevando a velocidade para o máximo, de forma a dosear o carvão pedido.</p> <p>Além do descrito anteriormente, foi também reportado um problema no feedback de carga do doseador. Ao pressionar o conjunto suportado na cela de carga, verificava-se que o sinal de feedback, que mede o enchimento do rotor do doseador, não oscilava na mesma medida, levando a crer que havia um problema no sistema de medição de carga. Este dispositivo engloba um amortecedor hidráulico composto por um disco emerso em óleo. As folgas entre o disco e as paredes do recipiente onde o mesmo “joga” deveriam de ser de 0,4 mm. Foi efetuada a medição e verificou-se um desalinhamento entre os eixos que faziam com que o conjunto não estivesse livre para voltar à posição original após alívio da carga. Corrigiu-se este problema e o feedback de carga do Pfister voltou à normalidade, acompanhando as oscilações de peso no interior do doseador.</p> <p>Após correção destes problemas a avaria foi dada com resolvida, o equipamento ficou operacional e o forno W8 arrancou novamente.</p>						

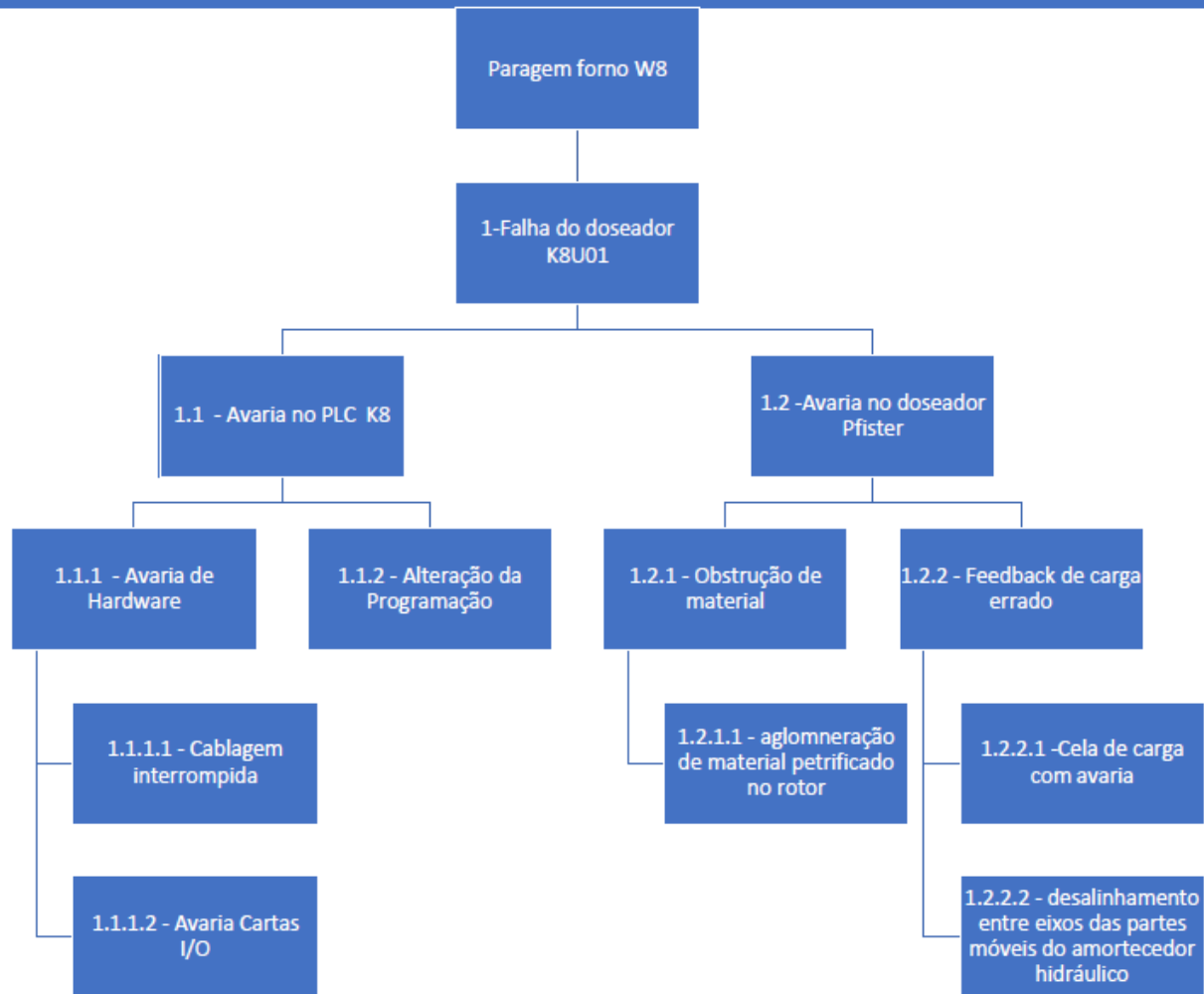
3 - Consequências da Falha			
Tipo de Consequência		Descrição	Gravidade
Operacional	Produção <input checked="" type="checkbox"/>	Paragem do forno W8	Muito Alta
	Qualidade <input type="checkbox"/>		Escolha um item.
Segurança <input type="checkbox"/>			Escolha um item.
Ambientais <input type="checkbox"/>			Escolha um item.

4 - Custos		
Tipo	Comentários	Valor
Reparação	Materiais	
	Mão-de-Obra	
	Outros	
Produção		
Total		

5 - Análise de Causas – Diagrama de Ishikawa



6 – Análise de Causas – Diagrama de falha



7 - Análise de Causas - Listagem					
Código	Causas Possíveis	VA	NV	NA	Comentários
CP1	Falha do doseador K8U01	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
CP1.1	Avaria no PLC K8	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
CP1.1.1	Avaria de Hardware	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
CP1.1.1.1	Cablagem interrompida	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
CP1.1.1.2	Avaria cartas I/O	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
CP1.1.2	Alteração na programação	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
CP1.2	Avaria no doseador Pfister	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
CP1.2.1	Obstrução de material	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
CP1.2.1.1	Aglomerção de material petrificado no rotor	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Pedras no interior do tambor do Pfister
CP1.2.2	Feedback de carga errado	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Ao pressionar o conjunto, o valor em mA não acompanhava o movimento oscilatório
CP1.2.2.1	Cela de carga com avaria	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
CP1.2.2.2	Desalinhamento entre eixos das partes móveis da cela de carga	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

VA – Verificou-se que aconteceu; NV – Verificou-se que não aconteceu; NA – Não foi possível verificar

8 - Análise de 5 Porquês	
Código	Comentários
Porquê 1	Paragem forno W8
Porquê 2	Oscilações Pfister Carvão
Porquê 3	Feedback de carga errado
Porquê 4	Cela de carga com avaria
Porquê 5	desalinhamento entre eixos das partes móveis do amortecedor hidráulico que suporta o

9 - Medidas Corretivas Imediatas		Foram tomadas ações imediatas para eliminar ou diminuir os efeitos da falha?		Sim	<input checked="" type="checkbox"/>	Não	<input type="checkbox"/>
Nº	Medida	Centro de Trabalho	Ordem				
1	Limpeza do interior do rotor do tambor	FSPQE					
2	Correção do desalinhamento das partes móveis do amortecedor	FSRE					

10 - Medidas Preventivas/Melhoria		É possível levar a cabo alguma ação para evitar que a falha se repita?		Sim	<input checked="" type="checkbox"/>	Não	<input type="checkbox"/>
Nº	Medida	Nota	Responsável	Data estimada de implementação			
1	Revisão do Plano Preventivo	10152889	Engenharia	31/12/2023			