



Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E
BIOLÓGICA

Gestão da Manutenção dos Ativos Físicos na CIMPOR

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

Autor

Paulo Jorge Ferreira Duarte

Orientador

Professor Doutor José Manuel Torres Farinha

Professor Doutor Hugo David Nogueira Raposo

Supervisor na empresa Cimpor Global Holdings.B.V.

Engenheiro Miguel Filipe

Coimbra, dezembro 2025



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

RESUMO

Neste relatório será apresentado o trabalho desenvolvido durante o estágio realizado numa indústria cimenteira, em particular no grupo Cimpor. A indústria cimenteira desempenha um papel crucial na economia global, fornecendo materiais essenciais para a construção civil e infraestruturas. Este setor caracteriza-se por processos produtivos intensivos em energia e recursos, envolvendo etapas como a extração de matérias-primas, a formação de clínquer em fornos rotativos e a produção do cimento final, onde a disponibilidade operacional é fundamental.

A gestão da manutenção dos ativos físicos no setor cimenteiro apresenta desafios significativos devido à escala, complexidade e criticidade dos equipamentos, como fornos, moinhos e motores industriais. A fiabilidade desses ativos é essencial para minimizar interrupções operacionais e custos diretos e indiretos. Para isso, são empregues metodologias avançadas de monitorização da condição, incluindo análise de vibrações, temperatura e desgaste, aliadas a estratégias de manutenção preditiva, preventiva e corretiva.

O objetivo deste estágio é contribuir para a implementação de uma metodologia integrada de gestão da manutenção dos ativos físicos, com foco na eficiência operacional, no uso de tecnologias avançadas de diagnóstico e monitorização, e na criação de uma equipa de fiabilidade dedicada à análise de avarias críticas. Esta abordagem visa fazer evoluir a análise de condição para o patamar da predição, utilizando ferramentas e *software* especializado de gestão, otimizando o desempenho, a fiabilidade dos ativos e o suporte à tomada de decisão ao longo do ciclo de vida dos equipamentos.

Palavras Chaves: Gestão dos Ativos Físicos, Manutenção, Fiabilidade, FMECA, Indústria Cimenteira.

ABSTRACT

This report presents the work carried out during an internship in the cement industry, in the Cimpor group. The cement industry plays a crucial role in the global economy, supplying essential materials for construction and infrastructure. This sector is characterized by energy- and resource-intensive production processes, involving stages such as the extraction of raw materials, the formation of clinker in rotary kilns and the production of final cement, where operational continuity is fundamental.

Managing physical assets in the cement sector presents significant challenges due to the scale, complexity and criticality of equipment such as kilns, mills and industrial motors. The reliability of these assets is essential to minimize operational interruptions and financial losses. To this end, advanced condition monitoring methodologies are employed, including vibration, temperature and wear analysis, combined with predictive, preventive and corrective maintenance strategies.

The aim of this internship is to contribute to the implementation of an integrated asset management methodology, with a focus on operational efficiency, the use of advanced monitoring and analysis technologies, and the creation of a reliability team dedicated to the analysis of critical breakdowns. This approach aims to evolve from predictive, using specialized management tools and software, optimizing performance, asset reliability and decision-making throughout the equipment's life cycle.

Keywords: Physical Asset Management, Maintenance, Reliability, FMECA, Cement Industry.

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar a minha mais profunda gratidão aos meus orientadores, Professor Doutor José Torres Farinha e Professor Doutor Hugo Raposo, pela excelente orientação, acompanhamento e constante incentivo em procurar sempre fazer mais e melhor. O vosso apoio, disponibilidade e partilha de conhecimento foram determinantes para o meu desenvolvimento académico e para o meu crescimento profissional na área.

Agradeço também à Cimpor, pela oportunidade de realização do estágio, que contribuiu de forma significativa para o meu crescimento pessoal e profissional, e ao Eng.º Miguel Filipe, pela orientação, disponibilidade e confiança depositada em mim.

Agradeço de forma muito especial à minha namorada, pelo amor, paciência e apoio incondicional ao longo de todo este percurso. A sua compreensão, incentivo e presença foram fundamentais para ultrapassar os momentos mais desafiantes e alcançar este objetivo.

Agradeço igualmente à minha família, pela força e apoio em todas as etapas da minha vida. Um agradecimento especial ao meu pai, pelo exemplo de dedicação, perseverança e por nunca deixar de acreditar em mim. Um profundo obrigado também à minha prima Inês e aos meus tios Jorge e Isabel, por tudo o que sempre fizeram por mim. O vosso carinho, incentivo e presença foram essenciais para que eu nunca desistisse e continuasse a lutar pelos meus objetivos, tornando possível alcançar esta etapa da minha vida.

Estendo ainda o meu agradecimento à família da minha namorada, pelo carinho, compreensão e apoio constante, e por me acolherem sempre como um membro da família.

A todos vocês, o meu mais sincero e sentido obrigado.

ÍNDICE

RESUMO	I
ABSTRACT	II
AGRADECIMENTOS.....	III
1 INTRODUÇÃO.....	7
1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA	7
1.2 OBJETIVOS.....	7
1.3 METODOLOGIAS	8
1.4 ESTRUTURA DO RELATÓRIO	9
2 ESTADO DA ARTE.....	10
2.1 MANUTENÇÃO	10
2.1.1 Conceitos de Manutenção	11
2.1.2 Tipos de Manutenção	12
2.2 MELHORIA CONTÍNUA.....	14
2.2.1 Análise dos 5 Porquês.....	15
2.2.2 Diagrama de Ishikawa.....	16
2.2.3 Ciclo PDCA e SDCA.....	17
2.2.4 Diagrama de blocos de fiabilidade.....	19
2.2.5 Análise FMEA e FMECA.....	20
2.2.6 Análise Árvore de Falhas.....	23
2.3 MODELOS ESTATÍSTICOS PARA ANÁLISE DE FIABILIDADE.....	25
2.3.1 Distribuição Lognormal.....	26
2.3.2 Distribuição de Weibull.....	27
2.4 INDICADORES DE DESEMPENHO	29
3 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA	33
3.1 CIMPOR GLOBAL HOLDINGS B.V.....	33
3.2 CIMPOR - INDÚSTRIA DE CIMENTOS , S.A.	34
3.3 ESTRUTURA CORPORATIVA E DESEMPENHO FINANCEIRO	37
3.4 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CIMENTO	38
3.5 COMPROMISSO COM A SUSTENTABILIDADE.....	43
3.6 PRODUTOS FABRICADOS	44
4 ESTÁGIO CIMPOR.....	48
4.1 DEPARTAMENTO DE EXCELÊNCIA OPERACIONAL	48
4.2 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS NO ÂMBITO DO ESTÁGIO	49
4.2.1 Ferramentas de Análise da Causa Raiz.....	49
4.2.2 Monitorização da Condição de Motores e Transformadores.....	54
4.2.3 Manutenção Preditiva com Machine Learning.....	56
5 CASO DE ESTUDO.....	60
5.1 MOINHO DO CRU	60
5.1.1 Funcionamento e Componentes de um Moinho Vertical	60
5.2 ANÁLISE DO MOINHO DO CRU	62
5.2.1 Diagrama de Blocos.....	62
5.2.2 Análise FMECA ao Corpo do Moinho.....	63
5.2.3 Diagrama de Ishikawa: Nível de Óleo Baixo nas Galgas	69
5.2.4 Análise de Árvore de Falhas ao Corpo do Moinho	71
6 CASO DE ESTUDO: ANÁLISE DE FIABILIDADE UTILIZANDO DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL E LOGNORMAL	73
6.1 ANÁLISE TEMPORAL	73

6.2	ESCOLHA DA DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA	76
6.3	RESULTADOS DA ANÁLISE DE FIABILIDADE	78
6.3.1	MTBF (<i>Mean Time Between Failures</i>).....	78
6.3.2	MTTR (<i>Mean Time To Repair</i>).....	82
6.3.3	Disponibilidade Operacional.....	86
6.3.4	Disponibilidade Técnica.....	92
7	CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	98
7.1	CONCLUSÕES	98
7.2	PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	100
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102
8	ANEXOS	105
	ANEXO I: FERRAMENTA PARA APLICAÇÃO DA ANÁLISE DOS 5 PORQUÊS	105
	ANEXO II: POWERPOINT PARA APRESENTAÇÃO E FORMAÇÃO SOBRE A ANÁLISE DOS 5 PORQUÊS	111
	ANEXO III: EXEMPLO DE CASO DE ESTUDO DO SOFTWARE DE MONITORIZAÇÃO DE MOTORES E TRANSFORMADORES	121
	ANEXO IV: EXEMPLO DE ANÁLISE DE ALERTA DO SOFTWARE XPTO DE MANUTENÇÃO PREDITIVA	122
	ANEXO V: EXEMPLO DE ANÁLISE DE ALERTA DO SOFTWARE XPTO DE MANUTENÇÃO PREDITIVA	127
	ANEXO V: ARTIGO APRESENTADO NO CONGRESSO INTERNACIONAL PAMDAS 2025	133

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 TIPOS DE MANUTENÇÃO SEGUNDO A NP EN 13306:2021, (IPQ, 2021)	12
FIGURA 2.2 ESQUEMA DA ANÁLISE DOS 5 PORQUÊS	15
FIGURA 2.3 DIAGRAMA DE ISHIKAWA,	16
FIGURA 2.4 CICLO PDCA	18
FIGURA 2.5 FLUXOGRAMA PARA IMPLEMENTAÇÃO DA ANÁLISE FMEA	22
FIGURA 2.6 PORTAS LÓGICAS AND E OR (IEC, 2006)	23
FIGURA 2.7 EXPLICAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO SIMÉTRICA OU ASSIMÉTRICA	25
FIGURA 2.8 DISTRIBUIÇÃO WEIBULL VS LOGNORMAL (HAPSE ET AL., 2010)	26
FIGURA 2.9 CURVA DA BANHEIRA	29
FIGURA 3.1 ESTRUTURA ACIONISTA	34
FIGURA 3.2 CENTRO DE PRODUÇÃO DE SOUSELAS	35
FIGURA 3.3 CENTRO DE PRODUÇÃO DE ALHANDRA	35
FIGURA 3.4 CENTRO DE PRODUÇÃO DE LOULÉ	36
FIGURA 3.5 MAAT UM EXEMPLO DE CONSTRUÇÃO COM BETÃO DA CIMPOR	36
FIGURA 3.6 DISTRIBUIÇÃO DE COLABORADORES	37
FIGURA 3.7 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CIMENTO	38
FIGURA 3.8 DESMONTE NA PEDREIRA	39
FIGURA 3.9 DESCARGA DE MATÉRIA-PRIMA NO BRITADOR	39
FIGURA 3.10 PRÉ-HOMOGENEIZAÇÃO	40
FIGURA 3.11 INTERIOR DO MOINHO VERTICAL DO CRU	40
FIGURA 3.12 TORRE DE CICLONES	41
FIGURA 3.13 FORNO ROTATIVO	42
FIGURA 3.14 MOINHO DE BOLAS DE CIMENTO	42
FIGURA 3.15 PROPOSTA PARA ATINGIR A NEUTRALIDADE CARBÓNICA	44
FIGURA 3.16 TIPOS DE CIMENTOS	45
FIGURA 3.17 CIMENTO CEM I 42.5R	46
FIGURA 3.18 CIMENTOS CEM II/B-L 32.5N CEM II/A-L 42.5	46
FIGURA 3.19 ENVIO DE CIMENTO GRANEL	47
FIGURA 4.1 INSTRUÇÕES DE EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÃO DO SOFTWARE DE REGISTO DE PARAGENS	51
FIGURA 4.2 INSTRUÇÕES PARA PREENCHIMENTO DA ANÁLISE DOS 5 PORQUÊS	51
FIGURA 4.3 PÁGINA DE DADOS	52
FIGURA 4.4 EXEMPLO DO CAMPO DE EVIDÊNCIAS	52
FIGURA 4.5 FORMULÁRIO DA PÁGINA DE ANÁLISE DE 5 PORQUÊS	53
FIGURA 4.6 EXEMPLO DE ANÁLISE PREENCHIDA	53
FIGURA 4.7 PÁGINA AÇÕES PREENCHIDA	54
FIGURA 4.8 INTERFACE DO SOFTWARE (FONTE: SOFTWARE XPTO)	55
FIGURA 4.9 FATORES DE SEVERIDADE (FONTE: SOFTWARE XPTO)	55
FIGURA 4.10 INTERFACE DO SOFTWARE XPTO (FONTE: SOFTWARE XPTO)	56
FIGURA 4.11 PÁGINA DE CONTRIBUIÇÕES SOFTWARE XPTO (FONTE: SOFTWARE XPTO)	57
FIGURA 4.12 ANÁLISE DAS CONTRIBUIÇÕES (FONTE: SOFTWARE XPTO)	57
FIGURA 4.13 INTERFACE DO SOFTWARE XPTO (FONTE: SOFTWARE XPTO)	58
FIGURA 4.14 PÁGINA DE MODELOS EM ALERTA DO SOFTWARE XPTO (FONTE: SOFTWARE XPTO)	58
FIGURA 4.15 ANÁLISE DAS CONTRIBUIÇÕES PARA MODELO /ALARME DO SOFTWARE XPTO (FONTE: SOFTWARE XPTO)	59
FIGURA 5.1 ESQUEMA DE MOINHO VERTICAL COM COMPONENTES	61
FIGURA 5.2 ESQUEMA DE CIRCULAÇÃO DE GASES E INTERIOR DO MOINHO	61
FIGURA 5.3 DIAGRAMA DE BLOCOS DE FIABILIDADE MOINHO DO CRU	62
FIGURA 5.4 FORMULÁRIO PARA DESENVOLVIMENTO DA FMECA	64
FIGURA 5.5 PRIMEIRA FASE DA ANÁLISE FMECA IDENTIFICAÇÃO DOS MODOS DE FALHA	65
FIGURA 5.6 LEGENDA PARA A CLASSIFICAÇÃO COM ESCALA 1 A 4	65
FIGURA 5.7 LEGENDA COM VALOR E CÓDIGO DE CORES PARA INTERPRETAÇÃO DO RPN	66
FIGURA 5.8 ANÁLISE FMECA CONCLUÍDA	68
FIGURA 5.9 DIAGRAMA DE ISHIKAWA: NÍVEL DE ÓLEO DAS GALGAS BAIXO	70

FIGURA 5.10 ÁRVORE DE FALHAS: CORPO DO MOINHO	72
FIGURA 6.1 ANÁLISE SÉRIE TEMPORAL (FONTE: MATLAB)	74
FIGURA 6.2 GRÁFICO DE QUANTIDADE DE PARAGENS INCIDENTAIS (FONTE: MATLAB)	75
FIGURA 6.3 GRÁFICO DO MTTR (FONTE: MATLAB)	75
FIGURA 6.4 GRÁFICO DO MTBF (FONTE: MATLAB)	76
FIGURA 6.5 HISTOGRAMA E PDF WEIBULL AJUSTADA (FONTE: MATLAB)	77
FIGURA 6.6 GRÁFICO DE PROBABILIDADE DE WEIBULL PARA OS DADOS DE MTBF E LINHA DE TENDÊNCIA (FONTE: MATLAB)	77
FIGURA 6.7 FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE (PDF) AJUSTADA AOS DADOS DO MTBF (FONTE: MATLAB)	79
FIGURA 6.8 COMPARAÇÃO ENTRE A CDF EMPÍRICA E AS DISTRIBUIÇÕES AJUSTADAS MTBF (FONTE: MATLAB)	80
FIGURA 6.9 GRÁFICOS DE PROBABILIDADE PARA O AJUSTE DOS DADOS DE MTBF (FONTE: MATLAB)	81
FIGURA 6.10 TAXA DE FALHA MENSAL HAZARD RATE (FONTE: MATLAB)	82
FIGURA 6.11 FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE (PDF) AJUSTADA AOS DADOS DO MTTR (FONTE: MATLAB)	83
FIGURA 6.12 COMPARAÇÃO ENTRE A CDF EMPÍRICA E AS DISTRIBUIÇÕES AJUSTADAS MTTR (FONTE: MATLAB)	83
FIGURA 6.13 GRÁFICOS DE PROBABILIDADE PARA O AJUSTE DOS DADOS DE MTTR (FONTE: MATLAB)	84
FIGURA 6.14 TAXA DE REPARAÇÃO MENSAL (FONTE: MATLAB)	86
FIGURA 6.15 FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE (PDF) AJUSTADA AOS DADOS DE DISPONIBILIDADE OPERACIONAL (FONTE: MATLAB)	87
FIGURA 6.16 COMPARAÇÃO ENTRE A CDF EMPÍRICA E AS DISTRIBUIÇÕES DE WEIBULL E LOGNORMAL PARA O INDICADOR DE DISPONIBILIDADE OPERACIONAL (FONTE: MATLAB)	88
FIGURA 6.17 GRÁFICOS DE PROBABILIDADE PARA O AJUSTE DOS DADOS DE DISPONIBILIDADE OPERACIONAL (FONTE: MATLAB)	88
FIGURA 6.18 FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE (PDF) AJUSTADA AOS DADOS DE DISPONIBILIDADE OPERACIONAL PELA DISTRIBUIÇÃO BETA (FONTE: MATLAB)	90
FIGURA 6.19 COMPARAÇÃO ENTRE A CDF EMPÍRICA E AS DISTRIBUIÇÕES WEIBULL, LOGNORMAL E BETA PARA O INDICADOR DE DISPONIBILIDADE OPERACIONAL (FONTE: MATLAB)	90
FIGURA 6.20 GRÁFICOS DE PROBABILIDADE PARA O AJUSTE DOS DADOS DISPONIBILIDADE OPERACIONAL PELA DISTRIBUIÇÃO BETA (FONTE: MATLAB)	91
FIGURA 6.21 EVOLUÇÃO MENSAL DA DISPONIBILIDADE OPERACIONAL (FONTE: MATLAB)	92
FIGURA 6.22 FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE (PDF) AJUSTADA AOS DADOS DE DISPONIBILIDADE TÉCNICA (FONTE: MATLAB)	93
FIGURA 6.23 COMPARAÇÃO ENTRE A CDF EMPÍRICA E AS DISTRIBUIÇÕES DE WEIBULL E LOGNORMAL PARA O INDICADOR DE DISPONIBILIDADE TÉCNICA (FONTE: MATLAB)	93
FIGURA 6.24 GRÁFICOS DE PROBABILIDADE PARA O AJUSTE DOS DADOS DE DISPONIBILIDADE TÉCNICA (FONTE: MATLAB)	94
FIGURA 6.25 FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE (PDF) AJUSTADA AOS DADOS DE DISPONIBILIDADE TÉCNICA PELA DISTRIBUIÇÃO BETA (FONTE: MATLAB)	95
FIGURA 6.26 COMPARAÇÃO ENTRE A CDF EMPÍRICA E AS DISTRIBUIÇÕES WEIBULL, LOGNORMAL E BETA PARA O INDICADOR DE DISPONIBILIDADE TÉCNICA (FONTE: MATLAB)	96
FIGURA 6.27 GRÁFICOS DE PROBABILIDADE PARA O AJUSTE DOS DADOS DISPONIBILIDADE TÉCNICA PELA DISTRIBUIÇÃO BETA (FONTE: MATLAB)	96
FIGURA 6.28 EVOLUÇÃO MENSAL DA DISPONIBILIDADE TÉCNICA (FONTE: MATLAB)	97

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2-1 DIFERENÇAS ENTRE PDCA E SDCA	19
TABELA 6-1 MÉTRICAS DE QUALIDADE DO AJUSTE DAS DISTRIBUIÇÕES WEIBULL E LOGNORMAL PARA OS DADOS DE MTBF (FONTE: EXCEL).....	81
TABELA 6-2 MÉTRICAS DE QUALIDADE DO AJUSTE DAS DISTRIBUIÇÕES WEIBULL E LOGNORMAL PARA OS DADOS DE MTTR (FONTE: EXCEL)	85
TABELA 6-3 MÉTRICAS DE QUALIDADE DO AJUSTE DAS DISTRIBUIÇÕES WEIBULL E LOGNORMAL PARA OS DADOS DE DISPONIBILIDADE OPERACIONAL (FONTE: EXCEL).....	89
TABELA 6-4 MÉTRICAS DE QUALIDADE DO AJUSTE DAS DISTRIBUIÇÕES WEIBULL E LOGNORMAL PARA OS DADOS DE DISPONIBILIDADE TÉCNICA (FONTE: EXCEL).....	94

LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

AI – *Artificial Intelligence*

CDF – *Cumulative Distribution Function*

FMEA – *Failure Mode and Effects Analysis*

FMECA – *Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*

FTA – *Fault Tree Analysis*

IEC – *International Electrotechnical Commission*

IoT – *Internet of Things*

KPI – *Key Performance Indicators*

MTBF – *Mean Time Between Failures*

MTTR – *Mean Time to Repair*

OEE – *Overall Equipment Effectiveness*

OT – *Ordem de Trabalho*

PDCA – *Plan-Do-Check-Act*

PDF – *Probability Density Function*

PMP – *Plano de Manutenção Preventiva*

RAM – *Reliability, Availability, Maintainability*

RBD – *Reliability Block Diagrams*

RPN – *Risk Priority Number*

SAP – *Systems, Applications and Products in Data Processing*

TCC – *Taiwan Cement Corporation*

1 INTRODUÇÃO

Este relatório de estágio foi desenvolvido no âmbito do Mestrado em Engenharia e Gestão de Ativos Físicos, tendo sido realizado na Cimpor-Indústria de Cimentos, S.A., no Centro de Produção de Souselas em Coimbra. O estágio teve como objetivo aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo do curso, com um foco especial na análise e melhoria dos processos relacionados com a gestão e manutenção de ativos físicos.

A Gestão de Ativos Físicos é uma atividade muito abrangente, pois faz a gestão completa do ciclo de vida dos ativos de uma organização, que pode ir desde a conceção até ao abate, procurando maximizar o seu valor para a atividade no mercado da empresa. A Gestão de Manutenção centra-se nas atividades técnicas e operacionais realizadas para garantir que os ativos físicos disponham da máxima fiabilidade e disponibilidade operacional. Este estágio centrou-se predominantemente na vertente da gestão de manutenção de ativos para potenciar a sua disponibilidade e maximizar a produção e, por consequência, a faturação da empresa.

1.1 Enquadramento do Tema

A gestão da manutenção dos ativos físicos desempenha um papel fundamental na atualidade, onde a eficiência operacional, a sustentabilidade e a redução de custos são prioridades para as organizações. A área da gestão dos ativos tem como objetivo maximizar o seu valor ao longo do seu ciclo de vida, equilibrando desempenho, custo e risco.

No âmbito da transformação digital e da Indústria 4.0, a gestão dos ativos físicos tem-se adaptado a um panorama tecnológico em rápida evolução, com a introdução de ferramentas como a Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA) e análise de dados em larga escala.

Durante o estágio, o autor teve a oportunidade de acompanhar e participar ativamente nos processos de gestão dos ativos da empresa, o que permitiu identificar oportunidades de melhoria e propor soluções para desafios específicos, tais como a criação de uma equipa dedicada à fiabilidade, monitorização de ativos e a realização de análises de causa raiz para as avarias críticas registadas.

1.2 Objetivos

O estágio realizado teve como objetivo a implementação de novas práticas direcionadas para a gestão da manutenção dos ativos físicos na organização, contribuindo para uma abordagem estruturada e eficiente para a manutenção e

operação dos equipamentos. Entre as principais atividades realizadas no estágio destaca-se a criação de uma equipa dedicada à fiabilidade dos ativos com o objetivo de realizar análises detalhadas da causa-raiz de avarias com maior impacto, permitindo um estudo aprofundado de modo a prevenir a recorrência dessas falhas.

Outro ponto relevante foi o trabalho de monitorização e acompanhamento contínuo dos ativos nas três fábricas localizadas em Portugal: Alhandra, Souselas e Loulé. Este acompanhamento revelou-se essencial para garantir que os responsáveis e as suas equipas técnicas fossem devidamente informadas sobre o estado dos ativos nos respetivos centros de produção. Com esta informação, foi possível alocar de forma eficiente os recursos necessários para a execução de manutenções preventivas e corretivas, assegurando a operacionalidade de todos os ativos e minimizando o risco de interrupções.

A organização tem como objetivo alcançar a máxima eficiência e inovação, investindo na integração de soluções tecnológicas e inovadoras, neste sentido estão em curso diversos projetos que envolvem a monitorização do estado de vários ativos, a integração de inteligência artificial na previsão de avarias e a adoção de outras tecnologias emergentes que refletem o progresso da transformação digital e os princípios da Indústria 4.0.

Estas iniciativas estão em conformidade com as principais normas internacionais de gestão de ativos, como a ISO 55001, evidenciando o compromisso da organização com a melhoria contínua, a sustentabilidade e a excelência na sua operação. Adicionalmente, este estágio representou uma oportunidade única para adquirir e desenvolver competências técnicas e estratégicas, especialmente nas áreas da fiabilidade e manutenção preditiva.

1.3 Metodologias

Este capítulo descreve as metodologias utilizadas durante o estágio realizado na CIMPOR, abrangendo desde as atividades iniciais de integração até às responsabilidades atribuídas ao longo do período. A abordagem metodológica adotada está dividida em diferentes etapas, cada uma relacionada com os objetivos específicos do estágio.

Nas semanas iniciais de estágio, foi realizada uma visita ao centro de produção de Alhandra, com o intuito de proporcionar uma visão abrangente sobre o funcionamento das operações e dos processos industriais característicos da empresa.

Posteriormente, no centro de produção de Souselas, foi realizada a formação necessária para a prática do estágio num centro de produção, com maior ênfase na segurança e nas práticas da empresa.

Nas semanas seguintes foram propostos diversos desafios, incluindo o desenvolvimento de uma ferramenta para análise da causa raiz usando a metodologia

dos cinco porquês e o acompanhamento do estado de condição de motores e transformadores.

As metodologias usadas foram estudadas através de artigos, livros e outros documentos, para que a sua implementação pudesse ser feita da melhor forma.

1.4 Estrutura do Relatório

O presente relatório está dividido em cinco capítulos:

- No primeiro capítulo é apresentada uma introdução ao enquadramento do tema, bem como os objetivos do estágio e as metodologias utilizadas;
- No segundo capítulo é apresentado o estado da arte, onde é descrita toda a pesquisa realizada sobre o conceito onde o estágio está inserido, neste caso na área da manutenção, tipos de manutenção, melhoria contínua e algumas metodologias de análise;
- No terceiro capítulo é apresentada a empresa onde o estágio foi realizado, bem como o processo de produção;
- No quarto capítulo é apresentada a equipa onde o autor foi incluído, bem como o trabalho desenvolvido no estágio, com uma estrutura dividida por cada tarefa que foi proposta ao autor;
- No quinto capítulo é apresentado um caso de estudo realizado no âmbito do estágio, centrado na análise do moinho do cru, um equipamento fundamental no processo de produção de cimento.
- No sexto capítulo é apresentado um caso de estudo realizado no âmbito do estágio, centrado na análise de fiabilidade do moinho do cru, utilizando a distribuição de Weibull.
- O capítulo final apresenta as conclusões retiradas do estágio, bem como sugestões de melhoria e propostas de desenvolvimentos futuros.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Manutenção

A área de manutenção é frequentemente mal vista dentro das organizações, em parte devido aos altos custos associados com a mão-de-obra, materiais e serviços contratados. No entanto, essa visão deve ser revista, e a avaliação da manutenção deverá ser mais centrada no seu desempenho e nos benefícios que traz para o produto ou serviço final.

A manutenção desempenha um papel crucial na rentabilidade da empresa, pois afeta diretamente a eficiência e os custos operacionais dos equipamentos. O trabalho da manutenção visa elevar o desempenho e a disponibilidade dos equipamentos, podendo aumentar os custos operacionais, mas reduzir os custos indiretos. Portanto, o objetivo de qualquer departamento de manutenção é encontrar o equilíbrio ideal entre esses efeitos, procurando maximizar a contribuição da manutenção para a rentabilidade da empresa (José et al., 2022).

A importância da manutenção pode ser vista em três áreas principais, conforme descrito por Pinto (Pinto, 1994):

- No aspeto económico - a manutenção visa maximizar o rendimento dos ativos por meio de investimentos em instalações e equipamentos, prolongando sua vida útil e aumentando as taxas de operacionalidade. Isto é alcançado através da redução de desperdícios e rejeições de produtos, evitando atrasos ou interrupções na produção e utilizando melhor os recursos humanos disponíveis;
- Em relação ao cumprimento da legislação - a manutenção desempenha um papel crucial na prevenção de acidentes e na minimização dos riscos para a segurança dos trabalhadores, bem como na redução de fatores perturbadores durante a execução do trabalho, como ruídos, fumos ou odores, além de contribuir para a redução da poluição e o cumprimento de regulamentos ambientais;
- Na vertente social - a manutenção também desempenha um papel importante ao contribuir para a preservação ou melhoria da imagem da empresa, através da implementação de medidas que não são necessariamente impostas por leis, mas que demonstram o compromisso da empresa com a segurança, qualidade e responsabilidade ambiental.

Atualmente, a importância da manutenção tem crescido consideravelmente. Isso deve-se ao aumento da complexidade das unidades industriais, tornando a gestão mais desafiadora, bem como ao aumento significativo dos custos associados às paragens. Além disso, os trabalhos de manutenção tornaram-se mais sofisticados e

dispendiosos, exigindo uma abordagem mais estratégica e eficiente para garantir a rentabilidade da empresa (Matos & Ferreira, 2008).

2.1.1 Conceitos de Manutenção

Todas as definições de manutenção, sejam elas oficiais ou não, têm subentendido que a função da manutenção é garantir a disponibilidade dos equipamentos em produção, através da avaliação das falhas e avarias no património tecnológico investido, (Souris & Batista, 1992).

Segundo a norma NP EN 13306:2021, a manutenção é definida como a “Combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida”, (IPQ, 2021).

Segundo Farinha (2011), o conceito manutenção sofreu uma evolução ao longo do tempo com finalidade de “(...) aumentar o seu âmbito e diversificar as estratégias de intervenção. Essa evolução foi acompanhada do reconhecimento da sua importância no conjunto das atividades empresariais e da sua interpretação com outras áreas funcionais”.

Já outros autores, como Pintelon & Hertz (2006), defendem que a manutenção é indispensável para qualquer operação e instrumentalização de cada equipamento, cumprindo com o seu objetivo principal de reparar ou restaurar esses equipamentos a fim de repor a sua utilidade.

É importante estabelecer desde o início deste relatório alguns conceitos básicos da linguagem usada em gestão da manutenção segundo a norma portuguesa.

Avaria, segundo a NP EN 13306:2021, é definida como “Estado de um bem inapto para cumprir uma função requerida, excluindo a incapacidade devida à manutenção preventiva ou outras ações programadas, ou devida à falta de recursos externos”, (IPQ, 2021).

Falha, segundo a NP EN 13306:2021, é definida como a “perda da capacidade de um bem para cumprir uma função requerida” em que a causa poderá ser por falha, por desgaste, por envelhecimento ou por utilização deficiente, entre outras, (IPQ, 2021).

Os termos “avaría” e “falha” são praticamente sinónimos e podem utilizar-se indistintamente. É comum, no entanto, utilizar o termo “avaría” com mais amplitude, para um equipamento como um todo, e o termo “falha”, em sentido mais restrito, dirigido ao órgão, por exemplo, o empilhador avariou por falha no sistema hidráulico.

Um Bem é definido, segundo a NP EN 13306: 2021, como um “Elemento, componente, aparelho, subsistema, unidade funcional, equipamento ou sistema que pode ser descrito e considerado individualmente”, (IPQ, 2021).

A Vida útil, segundo a NP EN 13306:2021, é definida como o “Intervalo de tempo desde a primeira utilização até ao instante em que um estado limite é atingido”, já o Ciclo de vida é definido como uma “Série de etapas pelas quais um bem passa, desde a sua conceção até à eliminação”, (IPQ, 2021).

2.1.2 Tipos de Manutenção

Segundo a norma NP EN 13306:2021, a manutenção está dividida em três vertentes, manutenção preventiva, manutenção corretiva e de melhoria, como mostra a Figura 2.1, (IPQ, 2021).

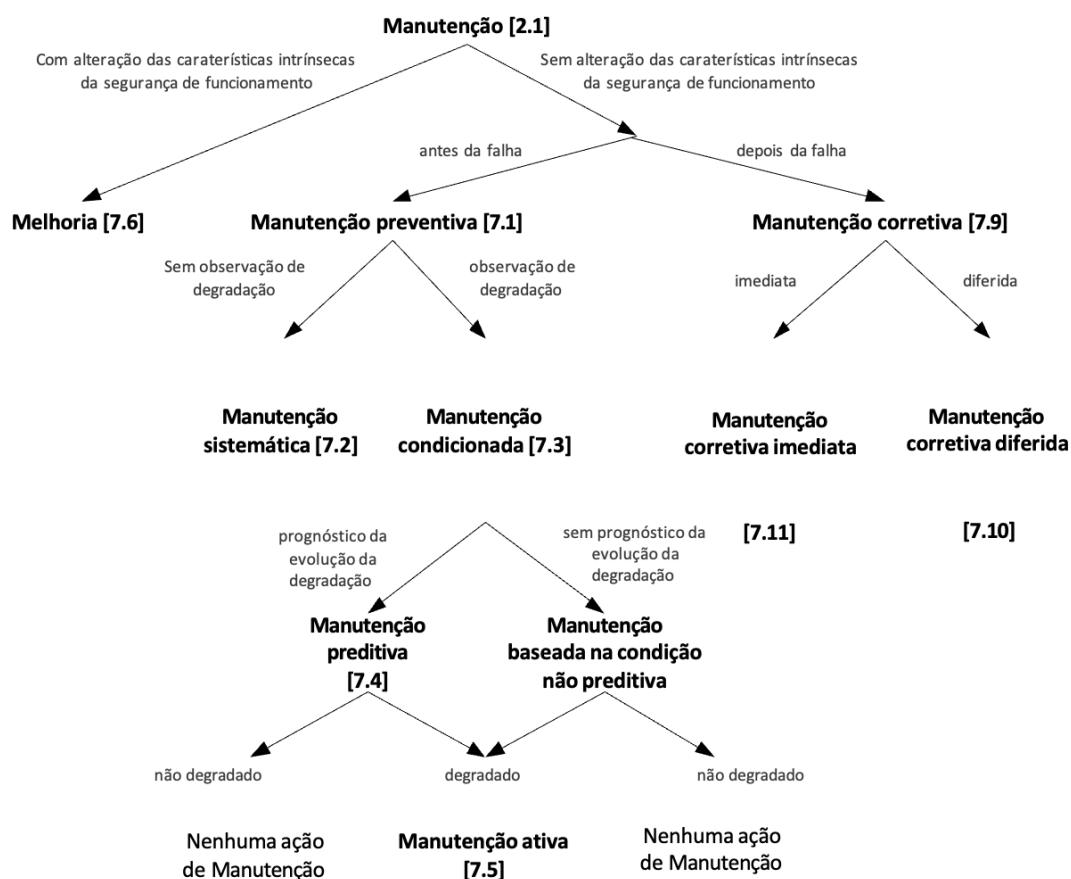


Figura 2.1 Tipos de Manutenção segundo a NP EN 13306:2021, (IPQ, 2021)

2.1.2.1 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva é uma abordagem onde a manutenção é planeada atempadamente com base em cronogramas, orientações dos fabricantes e análise do histórico de manutenção do equipamento. De acordo com a norma NP EN 13306:2021, os tipos de manutenção preventiva são a manutenção sistemática e a condicionada.

Manutenção preventiva, tal como é descrita na norma precedente, é definida como a” Manutenção efetuada com a finalidade de avaliar e/ou mitigar a degradação e reduzir a probabilidade de falha de um bem”, (IPQ, 2021).

A manutenção preventiva está dividida em sistemática e condicionada:

- A manutenção preventiva sistemática é estruturada de modo que as atividades de manutenção sejam realizadas em intervalos regulares, independentemente do estado real dos equipamentos, esta metodologia de manutenção envolve a prática de inspeções, medições, ajustes e se necessário, a substituição de peças, procurando evitar falhas inesperadas, períodos de inatividade e prolongar a vida útil dos equipamentos.
- A manutenção preventiva condicionada, onde está inserida a manutenção preditiva, baseia-se nas condições reais dos equipamentos, é definida pela norma NP EN 13306:2021 como a “Manutenção baseada na condição efetuada de acordo com as previsões extrapoladas de análises repetidas ou características conhecidas e a avaliação de parâmetros significativos da degradação do bem”, (IPQ, 2021).

Mobley (2002) define a manutenção preditiva como uma monitorização regular do estado atual das condições mecânicas, da eficiência de funcionamento e de outros indicadores que fornecem dados para determinar o intervalo máximo entre intervenções para minimizar o custo e o número de paragens não programadas, (Raposo et al., 2019).

De acordo com Mobley (2002) a manutenção preditiva consiste na monitorização contínua das condições do ativo, do desempenho operacional e de outros indicadores que fornecem informações para determinar o maior intervalo possível entre intervenções. O principal objetivo é minimizar custos de manutenção e reduzir o número de paragens não programadas (Raposo et al., 2019).

Brown (2003) explica que a manutenção preditiva compara a tendência das medições de alguns parâmetros físicos (vibração, pressão, corrente, temperatura, ...) com os limites estabelecidos para esses parâmetros, a fim de analisar, prever e corrigir problemas antes da falha, (Raposo et al., 2019).

Segundo Lima & Sales *apud* Raposo *et al.* (2019), a adoção de uma política de manutenção preditiva implica a capacidade de definir e classificar a criticidade de cada ativo físico para a sua função produtiva.

Otani & Machado (2008) defendem que a manutenção preditiva garante a qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de determinadas técnicas de análise, utilizando meios centralizados ou por amostragem, para minimizar as intervenções preventivas e reduzir a manutenção corretiva, (Raposo et al., 2019).

Em resumo, a manutenção é programada com base nas condições reais do equipamento, utilizando técnicas de monitorização contínua, como análise de vibração, termografia e monitorização elétrica, para identificar padrões anormais que

podem indicar potenciais problemas, com esta informação é possível prever e agendar intervenções apenas quando necessário, tendo como objetivo minimizar o tempo de inatividade não programado, reduzir os custos associados à manutenção e as perdas de produção, às quais correspondem custos indiretos, usualmente mais elevados do que os diretos da manutenção. Segundo Farinha (2018), ao estruturar o planeamento da manutenção numa perspetiva de gestão do ciclo de vida dos ativos, a integração de tecnologias de monitorização e análise torna-se um fator determinante para aumentar a eficiência e a sustentabilidade das operações.

2.1.2.2 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva é definida pela NP EN 13306:2021 como a “Manutenção efetuada após deteção de avaria e destinada a repor um bem num estado em que pode realizar uma função requerida”, (IPQ, 2021). Ocorre em resposta a falhas ou avarias imprevistas nos equipamentos e, conseqüentemente este tipo de manutenção resulta em períodos de inatividade não planeados e prejudiciais para a produção, os custos de manutenção, geralmente, são mais elevados, assim como os danos nos equipamentos. De acordo com a norma existem dois tipos de manutenção corretiva, a manutenção corretiva imediata e a manutenção corretiva diferida:

- A manutenção corretiva imediata é definida como a “Manutenção corretiva que é efetuada sem atraso após deteção de uma avaria, de forma a evitar conseqüências inaceitáveis,”(IPQ, 2021);
- A manutenção corretiva diferida é definida na NP EN 13306:2021 como a “Manutenção corretiva que não é efetuada imediatamente após deteção de avaria, mas que é adiada de acordo com regras estabelecidas”, (IPQ, 2021); logo, na manutenção corretiva imediata as ações são realizadas imediatamente depois de detetada a falha enquanto na manutenção corretiva diferida a manutenção pode ser adiada devido, por exemplo, à disponibilidade do equipamento.

2.2 Melhoria Contínua

A melhoria contínua é definida na NP EN 13306:2021 como a “Combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, com o objetivo de melhorar a fiabilidade intrínseca e/ou manutibilidade e/ou segurança de um bem, sem alterar a sua função original”, (IPQ, 2021), é um aspeto importante na manutenção para que haja um processo contínuo de aperfeiçoamento das práticas de manutenção, isto é alcançado por meio de diversas iniciativas, incluindo a otimização de processos, a implementação de tecnologias avançadas, o desenvolvimento das competências da equipa, a gestão eficaz dos ativos e a análise regular do desempenho. Ao priorizar a melhoria na manutenção, as organizações podem aumentar a eficiência operacional, racionalizar custos, maximizar a vida útil dos equipamentos e, em última análise, alcançar uma vantagem competitiva sustentável no mercado.

2.2.1 Análise dos 5 Porquês

A análise dos 5 porquês teve origem na década de 1930, criada por Sakichi Toyoda, fundador das indústrias Toyota, o mesmo foi pioneiro na implementação de filosofias de melhoria contínua e resolução de problemas, que mais tarde seriam a base de ferramentas, como a análise dos 5 Porquês, ele acreditava em capacitar os trabalhadores para questionarem e resolverem os problemas, o que se tornou um elemento central da cultura Toyota, (Paterson, 2023), (Perry & Mehlretter, 2018).

No entanto, foi Taiichi Ohno, engenheiro da Toyota, que nos anos 1950 e 1960 sistematizou a técnica e a transformou numa ferramenta crucial para a resolução de problemas e melhoria contínua na Toyota.

Esta metodologia consiste em questionar repetidamente a pergunta “Porquê?” até que a verdadeira causa do problema seja encontrada, o número de perguntas pode variar, mas na maioria dos casos 5 iterações são suficientes para alcançar a causa raiz do problema (Figura 2.2). Essa abordagem evita soluções superficiais, promovendo a implementação de ações corretivas para eliminar o problema e garantir que não retorne, (Perry & Mehlretter, 2018).

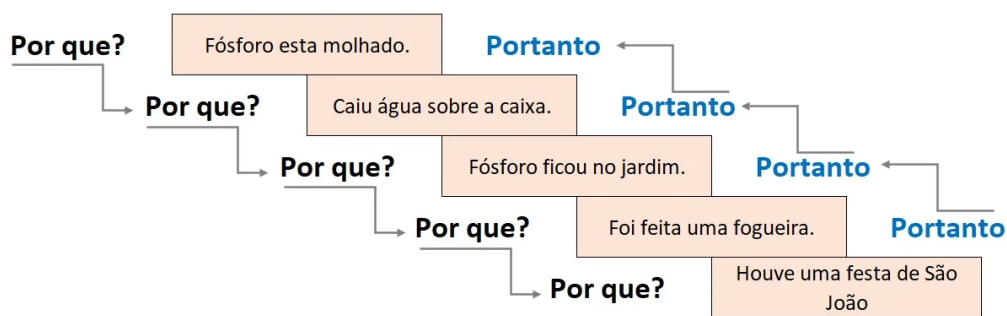


Figura 2.2 Esquema da Análise dos 5 Porquês¹

Entre os benefícios da análise dos 5 porquês destacam-se a simplicidade, pois não exige conhecimento especializado ou ferramentas complexas, e a vertente económica, uma vez que pode ser implementada sem custos. Esta abordagem ajuda a alcançar a melhoria contínua em qualquer nível da organização, este método é bastante utilizado para resolver problemas simples. No entanto, é importante reconhecer as suas limitações, especialmente em questões mais complexas, onde existem múltiplas causas - nestes casos o método deve ser complementado por outras técnicas, como a análise FMECA (Failure Mode Effects and Criticality Analysis) e o Diagrama de Ishikawa, (Paterson, 2023).

¹<https://www.linkedin.com/pulse/gest%C3%A3o-da-qualidade-namanuten%C3%A7%C3%A3o-de-placas-eletr%C3%B4nicas-1cqjf/>

2.2.2 Diagrama de Ishikawa

O Diagrama de Ishikawa, também conhecido como diagrama de espinha de peixe, é uma ferramenta de análise de causa e efeito desenvolvida pelo japonês Kaoru Ishikawa em 1943. (Varde et al., 2022), (Xiaolun & Zhang, 2020).

Esta ferramenta é utilizada para identificar, organizar e representar graficamente as possíveis causas de um problema, facilitando a análise em problemas mais complexos.

Ao estruturar visivelmente as possíveis causas para o problema, permite à organização desenvolver estratégias de manutenção, sejam estas corretivas, preventivas ou até preditivas, provocando assim uma melhor fiabilidade e eficiência dos ativos.

O desenvolvimento da análise através do Diagrama de Ishikawa envolve uma correta identificação do problema, que fica posicionado no lado direito do diagrama (Figura 2.3), a partir desse ponto as linhas maiores são onde são anotadas as causa principais (Método, Mão de obra, Material, Medida, Meio ambiente, Máquina), nas linhas mais pequenas é onde vão ser inseridas as possíveis causas secundárias englobadas na causa principal, (Varde et al., 2022).

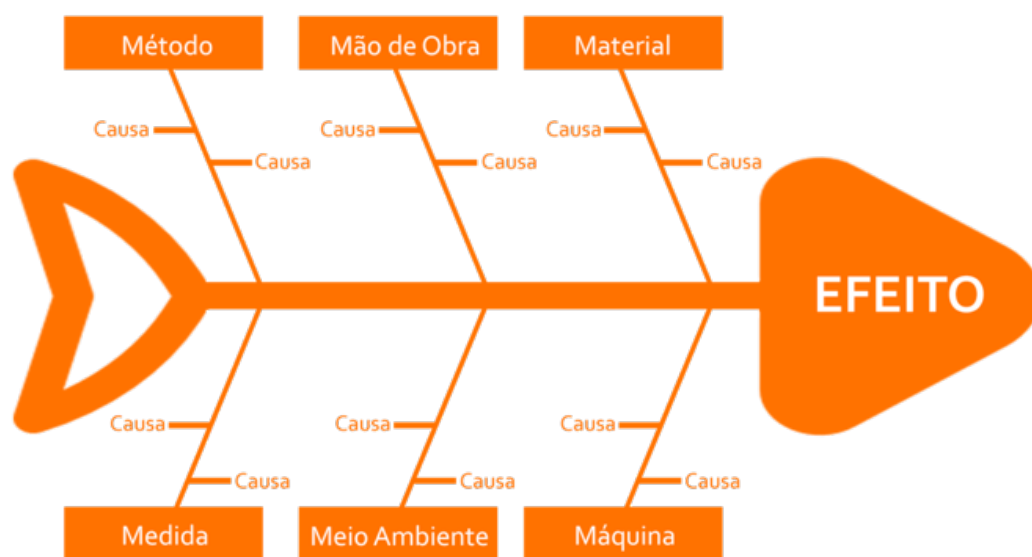


Figura 2.3 Diagrama de Ishikawa, ²

Este método oferece vários benefícios, entre eles a compreensão aprofundada dos problemas, e o incentivo ao trabalho em equipa na identificação da causa e efeito das falhas.

² <https://www.linkedin.com/pulse/o-diagrama-de-ishikawa-uma-ferramenta-poderosa-para-an%C3%A1lise-rocha-l1paf/>

2.2.3 Ciclo PDCA e SDCA

A origem do ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act) remonta à década de 1930, onde Walter A. Shewhart, um físico, engenheiro norte-americano desenvolveu um método cíclico para o controlo estatístico da qualidade. Posteriormente, W. Edwards Deming adaptou e popularizou o modelo, que passou a ser conhecido como o Ciclo de Deming. Nos anos 50, Deming apresentou o modelo PDCA no Japão, onde desempenhou um papel crucial na transformação da indústria japonesa após a Segunda Guerra Mundial, onde se tornou uma referência mundial em qualidade, (Pinto, 2009).

O modelo do ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act ou Planear, Fazer, Verificar, Agir) e o SDCA (Standardize, Do, Check, Act ou Padronizar, Fazer, Verificar, Agir) são metodologias fundamentais na gestão da qualidade e na melhoria contínua, são reconhecidas pela sua aplicação transversal em diversos setores. Estes modelos foram concebidos como ferramentas sistemáticas de análise, execução e avaliação, tendo como objetivo não só otimizar processos e resolver problemas, mas também garantir a sustentabilidade de boas práticas, (IPQ, 2015).

O PDCA é o ciclo de melhoria contínua com o objetivo de otimização de processos e a resolução de problemas, este modelo é composto por quatro etapas que se repetem de forma cíclica, de forma que a cada etapa seja possível melhorar a análise (Figura 2.4), (Pietrzak & Paliszkiewicz, 2015):

- **Planear (Plan):** É a primeira etapa do ciclo PDCA que envolve o planeamento de ações a executar, nesta etapa é essencial que se identifique de forma correta o problema ou oportunidades de melhoria, depois desta análise é importante definir quais os objetivos e estabelecer estratégias para os alcançar, contudo é necessária uma seleção de indicadores para que seja feita a sua monitorização, (IPQ, 2015).
- **Fazer (Do):** Depois de realizada a primeira etapa, de planear as ações, é necessário implementar essa ação, nesta fase as ações devem ser executadas em conformidade com o plano definido e respeitando as metodologias estabelecidas, o importante nesta etapa é implementar mudanças de forma gradual, sempre acompanhadas, para verificar a eficácia das mudanças propostas.
- **Verificar (Check):** Depois da implementação das ações é fundamental verificar se as ações implementadas estão a surtir o efeito desejado, caso haja diferença entre o resultado e os objetivos propostos no planeamento é necessário investigar a causa dessa diferença.
- **Agir (Act):** Esta última etapa consiste em ajustar o processo conforme necessário. Se os resultados forem compatíveis com o planeado, a mudança pode ser implementada numa escala maior. Caso contrário, devem ser

tomadas ações corretivas ou preventivas, ajustando o plano de ação e repetindo o ciclo até alcançar os resultados desejados.



Figura 2.4 Ciclo PDCA³

Pereira et al. (2022) referem que, “Como o próprio nome indica está-se perante um ciclo, sendo previsível e aconselhável que este não apresente um fim, chegando à etapa de atuação deve-se retomar a etapa de planeamento.

Guo et al., (2018) referem que se deve sempre regressar ao planeamento de forma a corrigir algum problema que tenha surgido durante o ciclo corrente. Na eventualidade de não ter surgido nenhum problema deve-se ainda assim regressar ao planeamento, analisando por completo o sistema na procura de potenciais melhorias que não tenham sido decifradas anteriormente.

Nguyen et al. (2020) salientam que “mais do que uma ferramenta, o PDCA é uma filosofia que deve ser enraizada na cultura organizacional tendo sempre em vista a melhoria contínua”.

O SDCA surgiu como uma extensão do PDCA, com o objetivo de estabilizar e padronizar os processos após as melhorias já implementadas. Alinhado com a filosofia Kaizen, o SDCA salienta a importância de estabelecer normas claras e práticas consistentes para evitar retrocessos e garantir a fiabilidade dos processos, (Pietrzak & Paliszkiewicz, 2015).

Ao priorizar a consolidação e padronização, o ciclo SDCA atua como um complemento ao PDCA, contribuindo para uma estrutura sólida de suporte à melhorias continua (Tabela 2.1). Essa metodologia mostra-se particularmente útil em áreas onde a uniformidade e a qualidade são fatores críticos, como na indústria, no setor dos serviços e na área tecnológica. Quando integrada com a filosofia Kaizen, essa abordagem ganha ainda mais força, pois incentiva a adoção de mudanças graduais e sustentáveis, que contribuem para o desenvolvimento de uma

³ <https://pt.linkedin.com/pulse/ciclo-pdca-plan-do-check-act-como-ele-pode-mudar-sua-empresa-cobo>, acedido em 2025.06.19

cultura organizacional focada na melhoria contínua e na excelência operacional, (Ohno, 1988), (Pietrzak & Paliszkievicz, 2015).

Tabela 2-1 Diferenças entre PDCA e SDCA

	PDCA	SDCA
Objetivo	Promover melhorias contínuas nos processos.	Garantir a uniformidade e a manutenção dos processos.
Aplicação	Utilizado em processos novos que necessitam de ajustes ou melhorias.	Utilizado em processos já uniformizados, para manter as melhorias implementadas.
Processo	Cada ciclo procura melhorar ainda mais o processo.	Cada ciclo procura reforçar e manter os padrões estabelecidos.

2.2.4 Diagrama de blocos de fiabilidade

O diagrama de blocos de fiabilidade (Reliability Block Diagrams – RBD) é uma metodologia utilizada na área de gestão da manutenção dos ativos físicos com o objetivo de analisar a fiabilidade de um sistema e identificar os seus pontos críticos, ou seja, os elementos cuja falha pode comprometer significativamente o desempenho e a disponibilidade do ativo. (Choudhary et al., 2019)

De acordo com a norma IEC 61078:2016, os diagramas de blocos de fiabilidade permitem representar, de forma gráfica, as interdependências operacionais entre os diferentes componentes de um sistema, considerando a forma como contribuem para o seu funcionamento global. Esta abordagem revela-se particularmente importante tanto na fase inicial de conceção do sistema, como nas fases de operação e manutenção, uma vez que permite identificar configurações críticas e apoiar a tomada de decisões informadas no âmbito da gestão da fiabilidade e da disponibilidade dos ativos físicos.

Segundo Farinha (2018), a utilização de modelos como os diagramas de blocos de fiabilidade contribui significativamente para a melhoria do desempenho dos sistemas técnicos, ao fornecer uma base quantitativa para a avaliação do risco, a otimização da manutenção.

Os diagramas de blocos de fiabilidade baseiam-se, essencialmente, em duas configurações: série e paralelo (IEC, 2016).

Na configuração em série o sistema apenas funciona se todos os seus componentes funcionarem, criando uma dependência funcional, em que a falha de qualquer componente implica a paragem de todo o sistema, neste caso a fiabilidade do sistema é calculada através do produto das fiabilidades individuais de todos os componentes que constituem o sistema, como mostra a Equação 2.1.

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_{i(t)} \quad (2.1)$$

Onde, $R_i(t)$ representa a fiabilidade do componente i ao longo do tempo.

De outro modo, a configuração em paralelo representa a existência de redundâncias, garantindo que a falha de um componente não compromete o funcionamento global, nestes casos, um componente suplente assume automaticamente a operação, evitando a paragem do sistema, contribuindo assim para um aumento da fiabilidade e da disponibilidade do ativo.

A fiabilidade de um sistema com a configuração em paralelo é calculada pela Equação 2.2:

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_{i(t)}) \quad (2.2)$$

Em conclusão, a aplicação dos diagramas de blocos de fiabilidade revela-se uma ferramenta, que permite não só a representação gráfica das dependências funcionais, mas também identificar os pontos críticos, e quantificar a fiabilidade de modo a apoiar as decisões de forma informada nas estratégias de manutenção.

A sua aplicação em contextos industriais, é demonstrada por Choudhary et al. (2019), onde mostra o contributo prático dos diagramas de blocos de fiabilidade na melhoria do desempenho e disponibilidade dos ativos.

2.2.5 Análise FMEA e FMECA

A FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) ou Análise dos Modos e Efeitos de falha, é uma metodologia de carácter indutivo e sistemático utilizada na gestão de risco, melhoria de produtos, processos e sistemas. Teve origem em 1949, quando o exército americano desenvolveu um procedimento para avaliar a fiabilidade de sistemas classificando as falhas com base no seu impacto no sucesso de missões e na segurança de pessoas e materiais.⁴

Ao longo do tempo esta metodologia tem sido adotada pelo setor industrial em diversas áreas. A FMEA permite identificar os potenciais modos de falha, e analisar as respetivas causas e efeitos para que possam ser tomadas decisões a nível preventivo, antes que as falhas ocorram. Este método é amplamente reconhecido como uma técnica de engenharia destinada a antecipar, prevenir e eliminar falhas conhecidas ou potenciais antes que atinjam o consumidor, (Sobral & Abreu, 2013), (Stamatis, 2003), (Teoh & Case, 2004).

⁴ <https://elsmar.com/FMEA/sld011.htm>, acedido em 2026.06.19

A análise FMEA pode assumir duas vertentes: uma análise qualitativa, tipicamente conhecida como FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) ou análise de modos e efeitos de falha, ou então uma abordagem quantitativa e mais detalhada, designada de FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) ou análise de modos de falha, efeitos e criticidade, na qual é avaliada a criticidade dos modos de falha identificados, (IEC, 2018; Silva, 2021).

A criticidade é avaliada através da aplicação do *Risk Priority Number* (RPN), ou Número de Prioridade de Risco, que é calculado através de três fatores:

- Severidade (S): Segundo a norma IEC 60812:2018 O número de severidade refere-se à gravidade do efeito da falha nos equipamentos, a nível local ou global do sistema, (IEC, 2018).
- Ocorrência (O): Segundo a norma IEC 60812:2018, o número de ocorrências refere-se à probabilidade ou frequência com que o modo de falha pode surgir durante o ciclo de vida do equipamento, (IEC, 2018).
- Detetabilidade (D): Segundo a norma IEC 60812:2018, o número de detetabilidade representa a probabilidade de um modo de falha ser detetado durante o funcionamento antes de ocorrerem efeitos de falha significativos. (IEC, 2018).

De acordo com a norma IEC 60812:2018, os três fatores que compõem o *Risk Priority Number* (RPN), severidade, ocorrência e detetabilidade, são avaliados através de uma escala numérica de 1 a 10, que permite quantificar de forma sistemática o nível de risco associado a cada modo de falha. Nesta escala, valores mais elevados de severidade indicam efeitos mais graves no desempenho, segurança ou integridade do ativo, enquanto valores altos de ocorrência traduzem uma maior probabilidade de o modo de falha se manifestar ao longo do ciclo de vida do ativo. Já a detetabilidade é avaliada de forma inversa, quanto maior o número atribuído, menor é a probabilidade de a falha ser detetada antes de provocar consequências significativas. Assim, um valor elevado de detetabilidade aumenta o RPN, refletindo uma maior criticidade do modo de falha. (IEC, 2018).

O *Risk Priority Number* (RPN), ou Número de Prioridade de Risco, é calculado através da seguinte Equação 2.3:

$$RPN = S \times O \times D \quad (2.3)$$

Onde S: severidade, O: ocorrência e D: detetabilidade.

Apesar da sua utilidade, a FMEA/FMECA tem limitações. É dependente da qualidade da informação disponível, da experiência dos analistas e pode tornar-se subjetiva na atribuição das classificações. Além disso, o RPN pode levar a interpretações incorretas se os fatores S, O e D forem mal ponderados. Por isso, em contextos mais rigorosos, pode ser complementada com outras metodologias, como

a análise através de árvore de falhas (FTA - Fault Tree Analysis) ou análise de causa raiz (Root Cause Analysis, RCA)(IEC, 2018), (Mikulak, 2017), (Stamatis, 2003).

Em conclusão, quando as análises FMEA ou FMECA são aplicadas segundo a norma IEC 60812:2018, esta análise é uma das ferramentas fundamentais para a identificação precoce de falhas, possibilitando uma resposta proativa por parte das equipas de engenharia e manutenção, contribuindo significativamente para a fiabilidade, segurança e eficiência dos ativos industriais (Figura 2.5), (IEC, 2018).

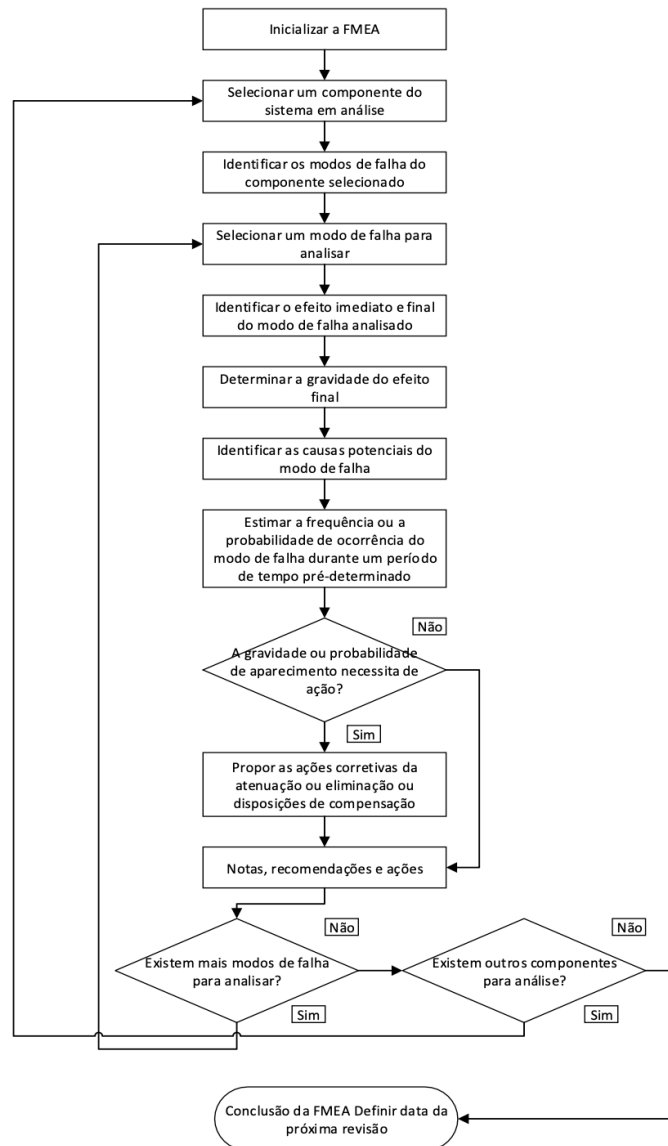


Figura 2.5 Fluxograma para Implementação da Análise FMEA⁵

⁵ International Electrotechnical Commission. (2018). IEC 60812:2018 - Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA) (3rd ed.). www.iec.ch

2.2.6 Análise Árvore de Falhas

A análise por Árvore de Falhas (FTA, *Fault Tree Analysis*) é uma metodologia dedutiva utilizada na identificação, estruturação e avaliação das causas que podem conduzir a um determinado evento indesejado. Esta técnica consiste em representar de forma hierárquica e lógica a sequência de falhas ou eventos que contribuem para uma falha crítica de um equipamento. Pela sua capacidade de decompor problemas complexos em causas elementares, a árvore de falhas consiste em ser uma ferramenta fundamental nos domínios da gestão da manutenção dos ativos, segurança e manutenção industrial, sendo particularmente eficaz na análise de sistemas com múltiplas interdependências, (Zio, 2007).

Segundo a norma IEC 61025:2006, a análise por árvore de falhas consiste na decomposição lógica do evento de topo em eventos mais simples, até alcançar as causas raízes ou os eventos básicos. (IEC, 2006)

Esta norma internacional define os princípios, os símbolos e os procedimentos a seguir para a construção e análise de árvores de falhas, promovendo a uniformização e a fiabilidade dos resultados obtidos, para esse efeito a norma recomenda o uso de dados reais sempre que possível (por exemplo, históricos de falhas), para garantir maior fiabilidade na quantificação dos eventos. (IEC, 2006)

As causas são então organizadas num diagrama de árvore onde, através de portas lógicas, portas *AND* e *OR*, expressam a relação entre os diferentes eventos. (IEC, 2006)

As portas lógicas *OR* representam situações em que o evento de saída ocorre se, pelo menos um dos eventos de entrada ocorrer, já a porta lógica *AND* representa uma situação em que o evento de saída só ocorre se todos os eventos de entrada ocorrerem simultaneamente (Figura 2.6).

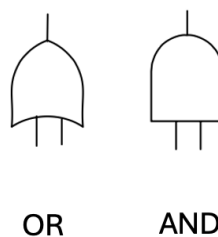


Figura 2.6 Portas Lógicas AND e OR (IEC, 2006)

Esta estrutura lógica permite também avaliar a probabilidade de falha com base em dados de fiabilidade de componentes, históricos de avarias ou estimativas de especialistas. A sua aplicação prática é valorizada em setores onde a análise da fiabilidade e a minimização do risco são fundamentais, como a aeronáutica, energia, e processos industriais, (Ericson, 2011).

Para o cálculo da probabilidade são usadas as seguintes fórmulas, conforme estipulado na norma IEC 61025:2006:

Portas OR:

$$F(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R(t)) \quad (2.4)$$

Portas AND:

$$F(t) = \prod_{i=1}^n R(t) \quad (2.5)$$

Onde $F(t)$ é a probabilidade de ocorrência do evento e $R(t)$ a fiabilidade do elemento.

Contudo, apesar de ser uma ferramenta poderosa e amplamente utilizada, a análise por árvore de falhas (FTA) não está isenta de limitações. Na prática, nem sempre é fácil reunir dados fiáveis e suficientes para realizar a análise, especialmente quando se lida com sistemas complexos ou em ambientes onde predominam a incerteza e o conhecimento empírico.

De modo a ultrapassar essas dificuldades tem existido uma evolução na metodologia utilizada através da integração da análise de árvore de falhas com outras abordagens, como, por exemplo, a lógica difusa, as redes Bayesianas ou até a análise RAMS (Reliability, Availability, Maintainability & Safety), entre outras, como demonstra Farinha *et al.* (2021). De facto, “A metodologia integrada permite melhorar a capacidade preditiva dos modelos de falha e, simultaneamente, otimizar decisões de manutenção com base em dados reais e conhecimento tácito dos operadores”, (Soltanali et al., 2021).

Como demonstrado por Gotora e Labib (2025), a utilização combinada de um modelo híbrido que integra FTA (Análise da Árvore de Falhas), RBD (Diagramas de Blocos de Fiabilidade) e FMECA (Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidade), aplicado na investigação de um incidente numa mina subterrânea, não só permitiu uma análise técnica mais completa, como também possibilitou uma melhor priorização das ações corretivas e a aprendizagem organizacional a partir das falhas. (Gotora & Labib, 2025)

2.3 Modelos Estatísticos para Análise de Fiabilidade

A análise de fiabilidade é uma área essencial para compreender o comportamento de falhas de um sistema, componente ou processo ao longo do tempo, permitindo quantificar a probabilidade de sobrevivência e prever a vida útil do ativo.

Ao utilizar dados de tempo até à falha, acontece, com frequência, observar distribuições assimétricas (Figura 2.7) normalmente positivas, o que torna inadequada a utilização de distribuições simétricas (Figura 2.7), como, por exemplo a distribuição normal. Por sua vez, as distribuições assimétricas, como a distribuição lognormal e Weibull, assumem um papel fundamental na análise estatística deste tipo de dados, devido à sua flexibilidade e capacidade de representar diferentes padrões de falha (Billinton & Allan, 1992).

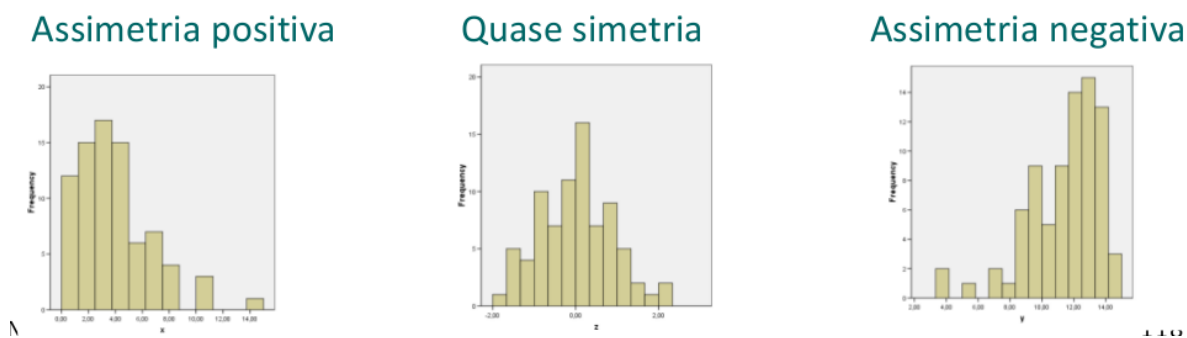


Figura 2.7 Explicação de Distribuição Simétrica ou Assimétrica⁶

Além da escolha da distribuição adequada, a análise de fiabilidade envolve o estudo das funções de fiabilidade e funções de risco (hazard). A função de fiabilidade $R(t)$ expressa a probabilidade de um componente operar sem falhar além de um tempo t , enquanto a função de risco $h(t)$ permite identificar períodos críticos com maior propensão a falhas, sendo fundamental para o planeamento de manutenção preventiva e otimização da vida útil dos ativos, contribuindo para uma gestão mais eficiente dos ativos. (Billinton & Allan, 1992)

⁶ <https://sweet.ua.pt/pedrocruz/bioestatistica/ed-assimetria-amostal.html#gsc.tab=0>

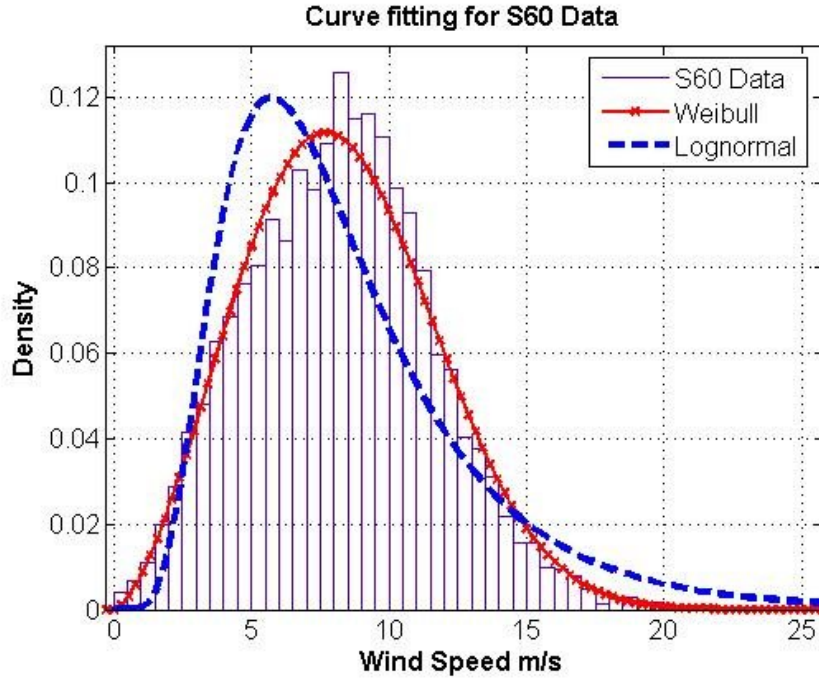


Figura 2.8 Distribuição Weibull Vs Lognormal (Hapse et al., 2010)

Ruhi (2015) e Elmahdy (2017) demonstraram que, em situações onde os dados de falha apresentam alguma diversidade, a utilização de um conjunto de distribuições, como a combinação da distribuição de Weibull e lognormal, permite modelar com maior precisão diferentes padrões de falha.

2.3.1 Distribuição Lognormal

A distribuição lognormal é adequada quando o tempo até à falha resulta da multiplicação de múltiplos fatores aleatórios positivos, sendo útil para situações em que a probabilidade de falha aumenta gradualmente. Matematicamente, uma variável T segue uma distribuição lognormal quando o logaritmo natural de T apresenta uma distribuição normal (Equação 2.6).

$$\ln(T) \quad (2.6)$$

E a sua função densidade é expressa pela equação 2.7:

$$f(t) = \frac{1}{t \sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2} \right], t > 0 \quad (2.7)$$

Onde μ é a Média e σ é o desvio padrão.

A função cumulativa é definida pela equação 2.8:

$$Q(t) = \Phi\left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right) \quad (2.8)$$

Onde μ é a Média e σ é o desvio padrão.

Função de fiabilidade é definida pela equação 2.9:

$$R(t) = 1 - Q(t) \quad (2.9)$$

A função de risco (Hazard rate) é definida pela equação 2.10

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.10)$$

Os percentis, onde inclui também os quartis utilizados na análise de fiabilidade são obtidos pela equação 2.11 :

$$Q_p = \exp(\mu + z_p\sigma) \quad (2.11)$$

Onde z_p é o quantil da distribuição normal.

2.3.2 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull destaca-se pela sua flexibilidade, uma vez que a mesma não possui uma forma única, A sua configuração depende dos valores dos seus parâmetros, como do parâmetro de forma β que representa o padrão da falha ao longo do tempo e o parâmetro de escala η que indica, por definição, o ponto onde 63,2% dos eventos modelados já ocorreram. Assim é possível ajustar a distribuição para representar uma grande variedade de padrões de falha, como em certos casos

representar semelhanças a outras distribuições, como a distribuição gama ou lognormal.

Esta característica permite que a distribuição de Weibull seja utilizada para modelar um conjunto de dados experimentais que não se assemelham a nenhuma distribuição específica, sendo caracterizados de forma adequada pela distribuição Weibull através da seleção do parâmetro forma apropriado.

A função densidade de probabilidade é calculada pela equação 2.12:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta} \right] \quad (2.12)$$

Onde β é o parâmetro de forma e η é o parâmetro de escala

A função cumulativa é definida pela equação 2.13:

$$Q(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta} \right] \quad (2.13)$$

Função de fiabilidade é definida pela equação 2.14:

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta} \right] \quad (2.14)$$

A função de risco (Hazard rate) é definida pela equação 2.15

$$h(t) = \frac{f(t)}{Q(t)} = \frac{f(t)}{1 - R(t)} \quad (2.15)$$

A utilização da distribuição de Weibull na análise de fiabilidade permite extrair diversa informação sobre o comportamento do ativo ao longo do tempo.

Através dos parâmetros é possível determinar o tempo de vida do ativo através do parâmetro de escala (η) e identificar o padrão de falha através do parâmetro de forma (β), permitindo distinguir se o ativo apresenta falhas na altura inicial, também chamada de mortalidade infantil, onde $\beta < 1$, tempo de vida operacional onde $\beta = 1$ ou já na zona de desgaste onde $\beta > 1$, como mostra a Figura 2.9. (Billinton & Allan, 1992)

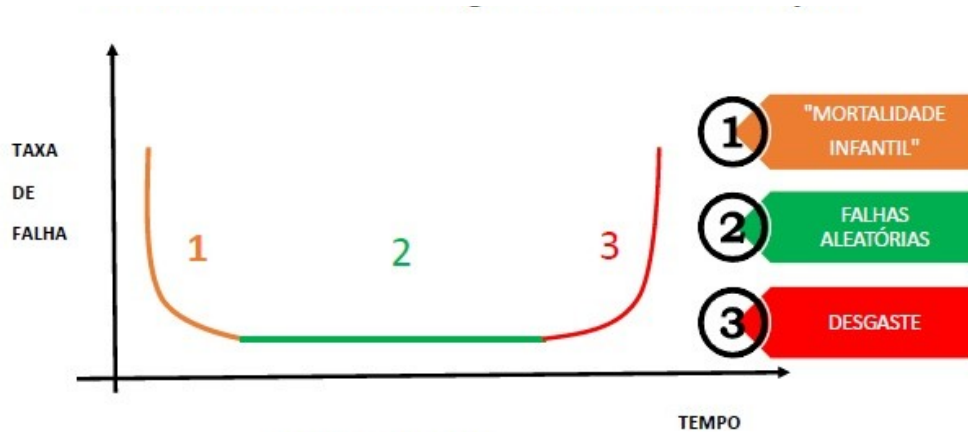


Figura 2.9 Curva da Banheira⁷

Estes resultados são importantes para ajudar na tomada de decisão, no planeamento da manutenção preventiva, definição de intervalos ótimos de substituição e comparação de desempenho entre diferentes componentes ou fornecedores, contribuindo para a melhoria da disponibilidade e redução de custos ao longo do ciclo de vida dos ativos.

Com base nas tendências atuais e futuras, Qasaimeh e Kosiba (2025) combinaram a análise de Weibull com algoritmos de inteligência artificial aplicados a dados permitindo transformar a modelação estatística clássica em ferramentas preditivas e adaptadas à realidade operacional.

2.4 Indicadores de Desempenho

Os indicadores de desempenho ou KPIs (Key Performance Indicator), segundo a norma NP EN 15341: 2009 correspondem a “um sistema de gestão de indicadores (KPI) para medir o desempenho da manutenção sob a influência de diversos fatores, tais como: económicos, técnicos e organizacionais. Estes indicadores servem para avaliação e melhoria da eficiência e eficácia de forma a se atingir a excelência da manutenção dos bens imobilizados”, (IPQ, 2009).

Como referenciado por Raposo *et al.* (2019), “Cabrita e Cardoso (2013) salientam a importância dos indicadores de desempenho (KPI) na medição do desempenho do equipamento. Os programas de software instalados em muitas empresas podem medir vários KPI, mas o utilizador tem de prestar atenção aos que realmente acrescentam valor e correspondem aos objetivos da empresa e da manutenção”. Cabrita e Cardoso (2013) acrescentam que a norma EN 15341:2009 (IPQ, 2009), “Manutenção / Indicadores Chave de Desempenho da Manutenção (KPI)”, “...

⁷<https://www.linkedin.com/pulse/curva-da-banheira-na-engenharia-manuten%C3%A7%C3%A3o-mario-pegno/>

estabelece que os KPIs da manutenção apoiam a manutenção a atingir a excelência e a utilização dos ativos físicos de forma competitiva. A maioria destes indicadores aplica-se a todas as instalações e serviços industriais (equipamentos, edifícios, infraestruturas, transportes, entre outros)”.

A importância de integrar os KPIs com a manutenção preditiva é crucial para a melhoria contínua das operações. A manutenção preditiva tem como objetivo antecipar falhas e atuar preventivamente, aumentando a fiabilidade e a disponibilidade dos ativos.

O desempenho da manutenção é o resultado da utilização eficiente dos recursos para manter ou restabelecer a condição de um bem, permitindo que ele cumpra a função requerida. Este desempenho pode ser expresso como um resultado obtido ou esperado e é influenciado por fatores internos e externos, (IPQ, 2009).

Os principais KPIs usados na área da manutenção são os seguintes:

- MTBF (Mean Time Between Failures): Indica o tempo médio entre falhas avaliando assim a fiabilidade do equipamento, sendo calculado através da seguinte Equação 2.16:

$$MTBF = \frac{\text{Tempo total de funcionamento}}{\text{Número de falhas}} \quad (2.16)$$

- MTTR (Mean Time to Repair): Indica o tempo médio necessário para uma reparação, logo mede a eficácia da equipa de manutenção na resolução de problemas, sendo calculado através da seguinte Equação 2.17:

$$MTTR = \frac{\text{Tempo de paragem após falha incidental}}{\text{Número de falhas}} \quad (2.17)$$

- Disponibilidade: Indica o tempo que o ativo esteve disponível para uso em relação ao tempo total, sendo calculado através da seguinte Equação 2.18:

$$\text{Disponibilidade} = \frac{\text{Tempo em operação}}{\text{Tempo total}} \times 100 \quad (2.18)$$

Onde o Tempo total é igual ao Tempo em operação + horas de paragens programadas + horas paragem incidentais + horas de paragens circunstanciais.

Gestão da Manutenção dos Ativos Físicos na CIMPOR

- Disponibilidade Operacional: Indica o tempo que o ativo esteve disponível para uso em relação ao tempo total de produção, excluindo as paragens programadas, calculado através da seguinte Equação 2.19:

$$\frac{\text{Disponibilidade Operacional}}{\text{Operacional}} = \frac{\text{Tempo em operação}}{\text{Tempo total} - \text{horas paragem programadas}} \times 100 \quad (2.19)$$

- Rácio de Manutenção Preventiva *versus* Corretiva: Indica a proporção de recursos de tempo e custos associados com a manutenção preventiva em comparação com a corretiva (Equação 2.20).

$$\frac{\text{Tempo ou custo de manutenção preventiva}}{\text{Tempo ou custo de manutenção corretiva}} \times 100 \quad (2.20)$$

- Taxa de execução de ordens de trabalho: Indica a percentagem de realização de ordens de trabalho (Equação 2.21).

$$\text{Taxa OT realizadas} = \frac{\text{Nº OTs realizadas}}{\text{Nº Total OTs}} \times 100 \quad (2.21)$$

- Taxa de realização de planos de manutenção preventiva: Indica a taxa de tarefas de manutenção preventiva que foram concluídas conforme o plano de manutenção em um determinado período (Equação 2.22).

$$\text{Taxa realização PMP} = \frac{\text{Nº PMP realizadas}}{\text{Nº Total PMP}} \times 100 \quad (2.22)$$

- OEE (Overall Equipment Effectiveness): Combina três fatores principais: disponibilidade, performance e qualidade. Fornece uma visão abrangente da eficiência operacional de um equipamento ou processo de produção (Equação 2.26).

$$\text{Disponibilidade} = \frac{\text{Tempo em operação}}{\text{Tempo total}} \times 100 \quad (2.23)$$

$$\text{Performance} = \frac{\text{Produção real}}{\text{Produção Ideal}} \times 100 \quad (2.24)$$

$$\text{Qualidade} = \frac{\text{Produtos Bons}}{\text{Total Produzido}} \times 100 \quad (2.25)$$

$$\text{OEE} = \text{Disponibilidade} \times \text{Performance} \times \text{Qualidade} \quad (2.26)$$

Na manutenção, os KPIs são fundamentais, pois medem a eficiência e eficácia das atividades, identificam áreas que necessitam de melhorias, facilitam o planeamento de estratégias corretivas ou preventivas, permitem a monitorização contínua. Além disso, partilham resultados que informam e motivam a equipa, promovendo um ambiente focado na melhoria contínua e no alcance de metas.

No entanto, é importante destacar que existe uma infinidade de KPIs que podem ser utilizados, dependendo das necessidades específicas da empresa e dos aspectos que deseja acompanhar.

3 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

3.1 Cimpor Global Holdings B.V.

A Cimpor Global Holdings B.V. é uma holding internacional responsável pela coordenação estratégica e financeira das operações do Grupo CIMPOR, reunindo as suas atividades em Portugal, Cabo Verde, Roménia, Turquia, Costa do Marfim, Camarões e Gana. Constituída em 2018 e sediada nos Países Baixos, a Cimpor Global Holdings foi criada com o propósito de assegurar uma governação corporativa integrada, promovendo a harmonização de processos de gestão, inovação e eficiência industrial entre as suas diversas subsidiárias (Cimpor Global Holdings, 2024; Cimpor, 2021).

Em 2024, a Cimpor Global Holdings passou a integrar o universo da TCC Group Holdings (Taiwan Cement Corporation), facto que reforçou de forma significativa a sua capacidade de investimento e modernização tecnológica. Esta integração consolidou o grupo como um dos principais produtores cimenteiros à escala mundial.

A Cimpor mantém-se como líder nacional no setor cimenteiro, operando três fábricas de cimento (Alhandra, Souselas e Loulé), duas unidades de moagem, 42 centrais de betão pronto, 15 pedreiras de agregados e uma unidade de produção de sacos (Cimpor Global Holdings, 2024).

A nível corporativo, a Cimpor Global Holdings tem vindo a impulsionar um programa de transformação digital centrado na gestão da manutenção dos ativos físicos baseada em dados, na manutenção preditiva e na automação de processos produtivos. Entre as tecnologias implementadas destaca-se a utilização de *drones indoor e outdoor*, *Smartglasses*, e óculos de realidade virtual, sensores IoT e sensores wireless. Estes dados são integrados nos sistemas digitais de manutenção e complementadas por plataformas de análise preditiva e ferramentas de *machine learning* que monitorizam continuamente o estado dos ativos (Cimpor, 2024).

Com esta abordagem, a Cimpor Global Holdings procura otimizar a disponibilidade dos equipamentos, reduzir paragens não planeadas e aumentar a eficiência operacional das suas unidades industriais. As iniciativas em curso traduzem-se numa cultura de excelência operacional e fiabilidade, suportada pela digitalização e pela inovação tecnológica, consolidando a Cimpor como uma referência internacional no setor cimenteiro (Cimpor, 2024).

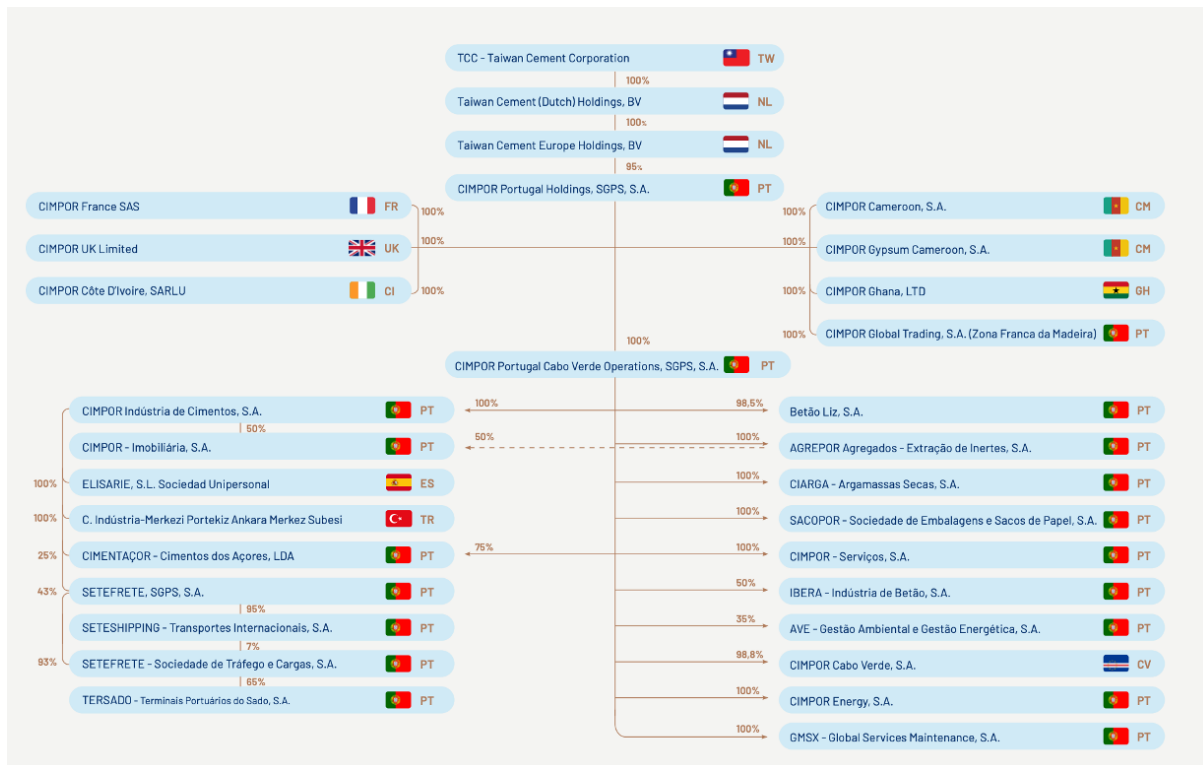


Figura 3.1 Estrutura Acionista⁸

3.2 Cimpor - Indústria de Cimentos ,S.A.

A Cimpor – Indústria de cimentos, S.A. é uma empresa de referência no setor dos materiais de construção, com uma história marcante no panorama industrial português e uma sólida presença internacional. Fundada em 1976, a empresa nasceu da fusão de várias cimenteiras nacionais, assumindo um papel central no fornecimento de cimento e betão para o desenvolvimento das infraestruturas em Portugal.

A Cimpor – Indústria de cimentos, S.A. opera através de três centros de produção localizados em Souselas, Alhandra e Loulé, cada um com uma história própria e um papel fundamental na estratégia da empresa.

O Centro de Produção de Souselas, situado no concelho de Coimbra, iniciou as suas atividades em 1974, antes mesmo da fundação oficial da Cimpor. Desde então, tornou-se um dos maiores centros de produção de cimento no país, beneficiando de sucessivos processos de modernização tecnológica que o tornaram mais eficiente e sustentável (Figura 3.2).

⁸ https://www.cimpor.com/documents/20124/1236544/RelatorioSustentabilidade_CIMPOR_ABPC_20251006_cmpressed.pdf/24081004-8069-7045-751a-f01fdb88eefb?t=1759833587723, acedido a 25/10/2025



Figura 3.2 Centro de Produção de Souselas⁹

O Centro de Produção de Alhandra, localizado em Vila Franca de Xira, tem origens ainda mais antigas, datado de 1894. Esta unidade é reconhecida pelo seu papel crucial no fornecimento de cimento para grandes projetos de infraestruturas em Portugal, como pontes e barragens, sendo um símbolo da tradição e experiência da Cimpor no setor. Ao longo dos anos, o centro de Alhandra foi alvo de diversas atualizações, com destaque para a incorporação de tecnologias que promovem a eficiência energética e a redução do impacto ambiental (Figura 3.3).



Figura 3.3 Centro de Produção de Alhandra¹⁰

Já o Centro de Produção de Loulé, inaugurado em 1979, é uma unidade estratégica para o abastecimento do sul do país e das regiões mediterrânicas. Localizado no

⁹ <https://www.cimpor.com/souselas>, acedido em 2025.06.19

¹⁰ <https://www.cimpor.com/alhandra>, acedido em 2026.06.19

Algarve, este centro beneficia da proximidade ao Porto de Faro, facilitando as exportações e permitindo uma ligação eficiente com outros mercados. Reconhecido pela sua capacidade produtiva e pelo rigor ambiental, o centro de Loulé desempenha um papel relevante na economia local e no apoio ao crescimento da região (Figura 3.4).



Figura 3.4 Centro de Produção de Loulé¹¹

Com uma sólida base histórica e um compromisso claro com o futuro, a Cimpor continua a destacar-se como um exemplo de resiliência, inovação e responsabilidade. Os seus centros de produção em Portugal, representam a sua importância na economia nacional e a sua capacidade de adaptação às necessidades de um mercado em constante evolução (Figura 3.5).



Figura 3.5 MAAT um Exemplo de Construção com Betão da Cimpor¹²

¹¹ <https://www.cimpor.com/loule>, acedido em 2025.06.19

¹² <https://www.cimpor.com/-/maat>, acedido em 2025.06.19

3.3 Estrutura Corporativa e Desempenho Financeiro

O mais recente relatório integrado, publicado pela Cimpor Portugal e Cabo Verde, referente ao ano de 2024, apresenta uma visão global sobre a sua atividade operacional, social, ambiental e financeira.

Desde o início de 2024, a CIMPOR passou a ser integralmente detida pela Taiwan Cement Corporation (TCC), uma das maiores empresas do setor a nível mundial, o que marca uma nova etapa estratégica na sua trajetória de internacionalização e descarbonização.



Figura 3.6 Distribuição de Colaboradores ¹³

A nível organizacional, a Cimpor Portugal e Cabo Verde, em 2024, contava com 1236 colaboradores, tendo nesse ano criado 229 novos postos de trabalho, refletindo o dinamismo da empresa e o reforço das suas operações. A empresa investiu fortemente no desenvolvimento das suas equipas, com 36 mil horas de formação realizadas, em diversos temas, como segurança, sustentabilidade, inovação e eficiência operacional (Cimpor, 2024).

A solidez financeira da empresa é igualmente evidenciada pelos indicadores de elegibilidade da Taxonomia da União Europeia que, em 2024 apresentaram 74% do CAPEX, 77% do OPEX e 59% do volume de negócios alinhados com atividades sustentáveis (Cimpor, 2024).

O ano de 2024 foi marcado por um crescimento consistente das operações. Segundo o Relatório de Sustentabilidade 2024, as operações em Portugal registaram um aumento de 10% no volume de negócios. Em Cabo Verde, o mercado cresceu cerca de 5,3%, enquanto a CIMPOR alcançou um crescimento de 9,1%, reforçando a sua quota de mercado e consolidando a posição de liderança (Cimpor, 2024).

¹³ Cimpor. (2024). Relatório de Sustentabilidade 2024. <https://www.cimpor.pt/> acedido em 2025.10.26

3.4 Processo de Produção de Cimento

O cimento é um material amplamente utilizado na construção civil, com um papel fundamental no desenvolvimento das infraestruturas e no avanço do setor da construção. O processo industrial de produção de cimento é complexo e envolve várias etapas integradas, cada uma desempenha um papel crucial na obtenção de um produto final de qualidade. Esta seção apresenta uma descrição pormenorizada de cada fase do processo produtivo do cimento, a Figura 3.7 ilustra este processo.

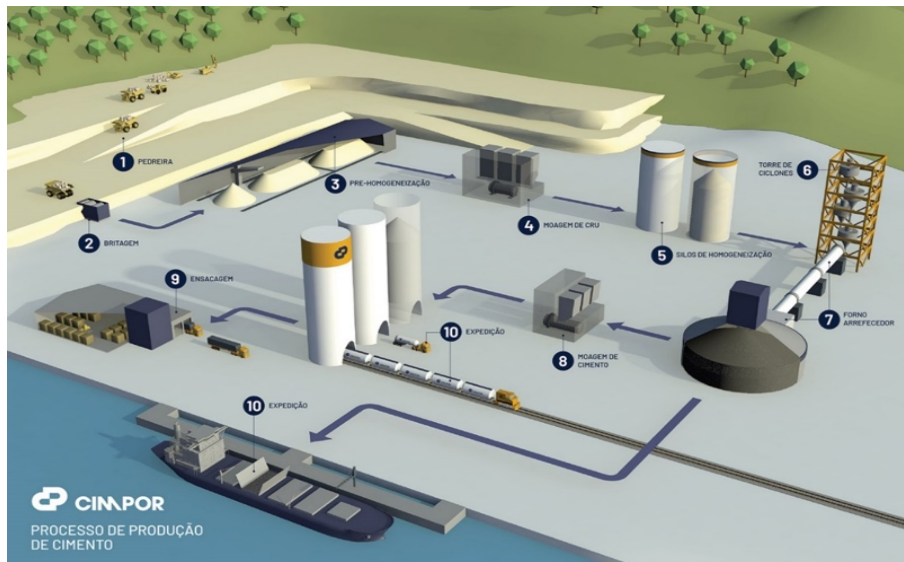


Figura 3.7 Processo de Produção de Cimento¹⁴

O processo está dividido em 10 etapas:

1. **Pedreira (Extração de matéria-prima)**: A produção do cimento inicia-se com a extração de matéria, predominantemente calcário e argilas provenientes da pedreira. Este processo envolve perfuração e desmonte com explosivos, permitindo o acesso a depósitos geológicos ricos em carbonatos de cálcio e silicatos. A composição química da matéria-prima extraída é um fator determinante para a eficiência e qualidade do produto (Figura 3.8).

¹⁴ <https://shre.ink/xOvw>, acedido em 2025.06.19



Figura 3.8 Desmonte na Pedreira

2. Britagem: O material que é extraído após o desmonte e transportado através de *dumpers* até à unidade de britagem, onde é reduzido o tamanho do material - o material pode chegar a ter 1000mm e é reduzido para 40mm, através de britadores de martelos - este processo é essencial para facilitar a etapa de moagem. (Figura 3.9).



Figura 3.9 Descarga de Matéria-Prima no Britador

3. Pré-Homogeneização: Após o processo de britagem o material resultante é depositado numa pilha longitudinal - este processo é realizado para minimizar as variações químicas da matérias-primas camadas são depositadas

longitudinalmente como referido e, posteriormente a pilha é consumida de forma transversal garantindo uma composição uniforme (Figura 3.10).



Figura 3.10 Pré-Homogeneização

4. Moagem do cru: O material vindo da pré-homogeneização é moído através de moinhos de bolas ou em moinhos verticais (Figura 3.11) reduzindo, mais uma vez, a dimensão do material, designando-se por “cru”. Nesta etapa o material é seco através do aproveitamento dos gases do forno. Para cumprir os objetivos da composição química, sempre que for necessário é possível adicionar no moinho material de correção.



Figura 3.11 Interior do Moinho Vertical do Cru

5. Silos de Homogeneização: O “cru”, após sair do moinho, é depositado em silos equipados com fluidificadores que promovem a homogeneização, a matéria após a homogeneização passa a designar-se por “Farinha”.
6. Torre de ciclones: A “farinha” é extraída dos silos e colocada no topo da torre de ciclones, ficando em contacto com os gases quentes provenientes do forno, a farinha ao descer na torre vai subindo de temperatura provocando a descarbonatação (Figura 3.12).



Figura 3.12 Torre de Ciclones

7. Forno | Arrefecedor: Depois da descarbonatação, a farinha é cozida num forno rotativo a cerca de 1450 °C, originando o clínquer, uma pedra artificial que constitui o principal componente do cimento. Este material resulta da reação entre matérias-primas calcárias e argilosas, através de um processo designado por clinquerização, durante o qual ocorrem transformações químicas que dão origem aos compostos responsáveis pelas propriedades hidráulicas do cimento.

À saída do forno, o clínquer é bruscamente arrefecido até temperaturas entre 100 e 200 °C, de modo a estabilizar as fases minerais formadas e garantir que as reações químicas ocorridas durante a cozedura se mantenham irreversíveis.



Figura 3.13 Forno Rotativo

8. Moagem de Cimento: O clínquer é misturado com gesso e outros aditivos, como fíler calcário, escórias ou cinzas volantes, e moído em moinhos de bolas (Figura 3.14). Esta etapa é determinante para ajustar propriedades essenciais do cimento, como a resistência mecânica e o tempo de presa. O produto final é então armazenado em silos.



Figura 3.14 Moinho de Bolas de Cimento

9. Ensacagem: O cimento é extraído dos silos para ser ensacado. Uma vez terminada esta operação, os sacos podem ser dispostos em paletes ou em pacotões.

10. Expedição: Por fim, o cimento é expedido para o mercado em sacos (paletes ou em pacotões) ou a granel por extração dos silos para camiões-cisterna (rodovia), vagões (ferrovia) ou navios (via fluvial ou marítima).

3.5 Compromisso com a Sustentabilidade

O compromisso da Cimpor com a sustentabilidade é um dos pilares centrais da sua atuação. A empresa tem implementado medidas significativas para minimizar o impacto ambiental, como a utilização de combustíveis alternativos, a redução das emissões de CO₂ e a adoção de práticas de economia circular. Além disso, a Cimpor investe na recuperação ambiental das áreas exploradas, assegurando a reabilitação dos solos e promovendo o equilíbrio ecológico. (*Sustentabilidade - Cimpor*, n.d.)

No âmbito do seu compromisso com a eficiência energética e a descarbonização, a Cimpor tem vindo a implementar sistemas de Recuperação de Calor Residual (WHR- Waste Heat Recovery) nas fábricas de Alhandra e Souselas, com capacidades de 4,3 MW e 7,3 MW, respetivamente. Estes sistemas capturam a energia térmica residual proveniente dos gases de exaustão do processo de fabrico do clínquer, convertendo-a em eletricidade através de um ciclo orgânico de Rankine. No centro de produção de Souselas, este sistema entrou em funcionamento em 2025 e no centro de produção de Alhandra está previsto entrar em funcionamento em 2026.

A Cimpor prevê que estes sistemas contribuirão para suprir cerca de 21% da energia elétrica necessária destas unidades, reduzindo significativamente a dependência de energia externa. (Cimpor, 2024)

Em paralelo, a Cimpor está a investir no hidrogénio verde. A empresa encontra-se a desenvolver um projeto-piloto na fábrica de Souselas, com um eletrolisador de 10 MW, cuja entrada em funcionamento está prevista para 2026. O objetivo é substituir gradualmente o petcoke por gás natural e hidrogénio de origem renovável, diminuindo as emissões associadas ao processo de clínquerização. A eletricidade necessária para alimentar o eletrolisador será proveniente de fontes renováveis, será, gerada num parque híbrido dedicado, que combina energia solar e eólica. (Cimpor, 2024)

A empresa reforçou ainda o seu portefólio de energia renovável, com destaque para a expansão da capacidade solar fotovoltaica. Em 2025, a Cimpor atingiu uma capacidade instalada de 29,6 MW.

A Cimpor estabeleceu objetivos ambiciosos, como a redução de 37% das emissões de CO₂ até 2030 e estabelece uma meta para atingir a neutralidade carbónica até 2050. Estas medidas vão ao encontro dos compromissos assumidos por Portugal no âmbito do Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050) e refletem a responsabilidade da empresa em contribuir para a transição global para uma economia neutra em carbono. (*Sustentabilidade - Cimpor*, n.d.)

Paralelamente, a Cimpor assume uma forte responsabilidade social, contribuindo para o desenvolvimento das comunidades onde opera. A empresa apoia iniciativas locais, promove a criação de emprego e investe em projetos de formação e desenvolvimento. Esta abordagem reforça o seu papel como um parceiro ativo no progresso económico e social das regiões onde está presente (Figura 3.15).



Figura 3.15 Proposta para Atingir a Neutralidade Carbónica¹⁵

3.6 Produtos Fabricados

A Cimpor – Indústria de cimentos, S.A. é uma das principais produtoras de cimento em Portugal, sendo esta a sua principal área de negócio. A empresa é líder no desenvolvimento de cimentos inovadores e sustentáveis, adaptados às exigências da construção moderna e às metas de descarbonização para a indústria cimenteira.

A produção de cimento é a atividade principal da Cimpor em 2023, a produção total ultrapassou os 3,1 milhões de toneladas de cimento. Os cimentos fabricados cumprem os requisitos da norma europeia NP EN 197-1:2012 e encontram-se certificados com a marcação CE, assegurando a sua conformidade e livre circulação no espaço europeu.

¹⁵ <https://www.cimpor.com/sustentabilidade>, acedido em 2025.06.19

Gestão da Manutenção dos Ativos Físicos na CIMPOR

Dos 5 tipos de cimento especificados na norma (Figura 3.16), a Cimpor produz apenas 3, cimento Portland (CEM I), cimento Portland Composto (CEM II) e cimento Pozolânico (CEM IV), entre cada categoria existem sob categorias devido a percentagem de clínquer presente na sua composição.

Tipos principais	Notação dos 27 produtos (tipos de cimento corrente)		Composição (percentagem em massa ^{a)})										Constituintes adicionais minoritários
			Constituintes principais										
			Clinquer	Escória de alto forno	Sílica de fumo	Pozolana		Cinza volante		Xisto cozido	Calcário		
		K	S	D ^{b)}	P	Q	V	W	T	L	LL		
CEM I	Cimento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cimento Portland de escória	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de sílica de fumo	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de pozolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de cinza volante	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de xisto cozido	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Cimento Portland de calcário	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Cimento Portland composto ^{c)}	CEM II/A-M	80-88	<----- 12-20 ----->								0-5	
	CEM II/B-M	65-79	<----- 21-35 ----->										
CEM III	Cimento de alto-forno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cimento pozolânico ^{c)}	CEM IV/A	65-89	-	<----- 11-35 ----->				-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	<----- 36-55 ----->				-	-	-	0-5	
CEM V	Cimento composto ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	-	<----- 18-30 ----->			-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	-	<----- 31-49 ----->			-	-	-	0-5	

^{a)} Os valores do Quadro referem-se à soma dos constituintes principais e dos adicionais minoritários.

^{b)} A incorporação de sílica de fumo é limitada a 10 %.

^{c)} Nos cimentos Portland compostos CEM II/A-M e CEM II/B-M, nos cimentos pozolânicos CEM IV/A e CEM IV/B e nos cimentos compostos CEM V/A e CEM V/B os constituintes principais, além do clínquer, devem ser declarados na designação do cimento (como exemplo, ver secção 8).

Figura 3.16 Tipos de Cimentos ¹⁶

Os principais exemplos produtos produzidos pela Cimpor são:

- CEM I 52.5R/CEM I 42.5R - Cimentos com elevado teor de clínquer ($\geq 95\%$), desenvolvidos para betões de alta resistência inicial. São particularmente adequados para betão armado(Figura 3.17).

¹⁶ Instituto Português da Qualidade. (2012). NP EN 197-1:2012: Cimento — Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes.www.ipq.pt.



Figura 3.17 Cimento CEM I 42.5R ¹⁷

- CEM II/A-L 42.5/CEM II/B-L 32.5N - Cimento Portland de Calcário, constituído por clínquer e filler calcário. Permite produzir betões de elevada resistência e trabalhabilidade. Cimento muito versátil com uma ampla gama de utilizações, com especial vantagem nas classes de betão de C25/30 a C40/50. Especialmente indicado para ambientes que induzam carbonatação(Figura3.18).



Figura 3.18 Cimentos CEM II/B-L 32.5N CEM II/A-L 42.5¹⁸

- CEM II/A-P/CEM II/B-P - Cimento Portland de pozolana constituído por clínquer e pozolana natural. Permite produzir betões de elevada resistência com especial vantagem nas classes de betão de C25/30 a C35/45.
- CEM IV/A(V) 42.5R-SR/CEM IV/B(V) 32.5N-SR - Cimento Pozolânico, resistente a sulfatos, constituído por clínquer com $C3A \leq 9\%$ e cinzas volantes. Cimento de calor de hidratação reduzido. Recomendado para betão de resistência moderada levada (classes C30/37 a C35/45) exposto a ambientes agressivos nomeadamente aqueles com presença de cloretos e/ou sulfatos. Indicado para betões em massa.

¹⁷ <https://www.cimpor.com/-/catalogo-cimentos-e-argamassas>, acedido 2025/06/26

¹⁸ <https://www.cimpor.com/-/catalogo-cimentos-e-argamassas>, acedido 2025/06/26

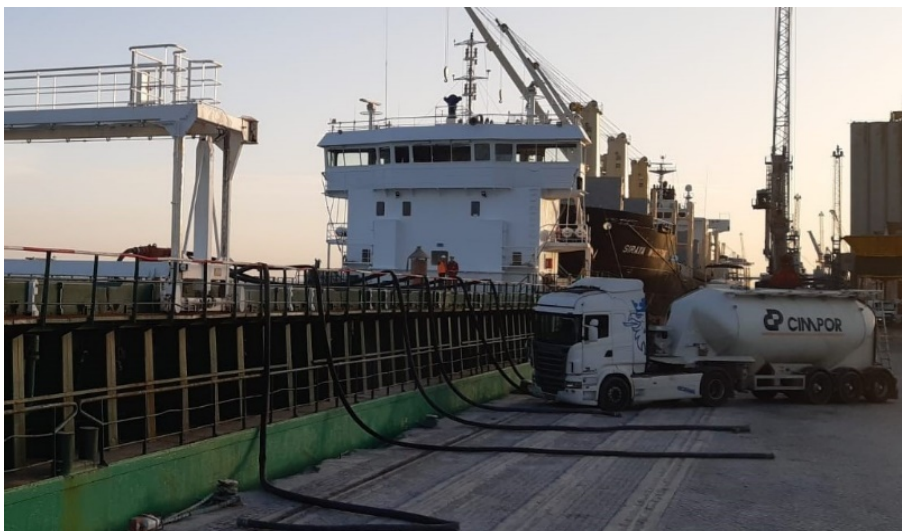


Figura 3.19 Envio de Cimento Granel¹⁹

Para além da produção de cimento, a Cimpor – Indústria de cimentos, S.A. atua noutras áreas de negocio com: a Agrepor, produz agregados para betão e construção civil (com cerca de 5 milhões de toneladas em 2023), a Ciagra fabrica argamassas secas para alvenaria, revestimento e restauro (94 mil toneladas), a Betão Liz lidera na produção de betão-pronto (1,48 milhões de m³), incluindo betões sustentáveis como o EcoBet, por fim a Sacopor fornece sacos de papel técnicos para embalagem de cimento e argamassas, com mais de 64 milhões de unidades produzidas em 2025.

¹⁹ <https://www.cimpor.com/servi%C3%A7os-de-transporte>, acedido 2025/06/26

4 ESTÁGIO CIMPOR

Este capítulo descreve o estágio realizado na empresa Cimpor Global Holdings, BV, com foco no apoio às atividades do departamento de Excelência Operacional, mais especificamente na equipa de Manutenção de Excelência. O trabalho desenvolvido envolveu a implementação de várias ferramentas e projetos direcionados às unidades de produção localizadas em Portugal, nomeadamente em Alhandra, Loulé e Souselas. São apresentados os objetivos do estágio, o ambiente organizacional, as funções desempenhadas e as competências desenvolvidas ao longo do período do estágio.

4.1 Departamento de Excelência Operacional

O Departamento de Excelência Operacional assume um papel transversal, envolvendo diversas áreas da organização, com o objetivo de potencializar o desempenho operacional em conformidade com os princípios da Indústria 4.0.

A sua missão passa por assegurar a melhoria contínua dos processos, otimizar a gestão da manutenção dos ativos físicos e impulsionar os resultados operacionais dos centros de produção, através da implementação de soluções digitais e metodologias integradas.

A estrutura do departamento é composta por cinco áreas funcionais principais:

- **Digitalização:** Esta equipa é responsável por impulsionar a transformação digital das operações industriais, analisando os processos existentes e identificando oportunidades de melhoria. Para esse efeito, investiga e avalia tecnologias inovadoras e desenvolve soluções digitais alinhadas com a estratégia organizacional. Adicionalmente, promove a padronização tecnológica entre as diferentes unidades industriais, garantindo coerência e eficiência na adoção das ferramentas digitais.
- **Manutenção:** A área de Manutenção é responsável pela implementação de um sistema integrado de gestão de manutenção, assegurando a padronização de processos, procedimentos e fluxos de trabalho suportados pelo SAP PM, bem como a uniformização dos principais KPIs e relatórios de custos. Paralelamente, impulsiona a digitalização da manutenção através da monitorização online dos ativos e da integração de tecnologias IoT, análise avançada de dados e metodologias preditivas, permitindo a avaliação contínua do estado de condição dos equipamentos. Desenvolve ainda projetos tecnológicos inovadores, como inspeções por drones e utilização de smartglasses em intervenções remotas, que aumentam a eficiência e a segurança operacional. Adicionalmente, fomenta uma cultura de inovação e aprendizagem contínua, promovendo a adoção de tecnologias inovadoras e de práticas avançadas de manutenção.

- Automação: Esta equipa é responsável pela definição e padronização da estratégia corporativa para os sistemas de controlo industrial, abrangendo PLCs (*Programmable Logic Controller*), sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), infraestruturas de rede e protocolos de comunicação adotados em todas as unidades, incluindo novos projetos. Esta área elabora documentação técnica e diretrizes que servem de referência para implementações futuras e assegura a digitalização da automação através da integração de sensores OT, ferramentas IoT, análise avançada de dados e metodologias de manutenção preditiva, em colaboração com as equipas de Manutenção e Digitalização. Garante geralmente a disponibilidade, integração do PI System em todas as fabricas, bem como o apoio à padronização e implementação do módulo SAP PM.
- Tecnologia operacional: Esta equipa é responsável pela gestão e desenvolvimento da infraestrutura digital que suporta a digitalização industrial, assegurando a monitorização, o desempenho, a segurança e a proteção das plataformas que integram sistemas *Machine Learning* a análise avançada de dados e outras soluções de apoio às operações. Compete-lhe garantir a compatibilidade e a integração destas infraestruturas com os sistemas existentes e com novos desenvolvimentos. Adicionalmente, esta área lidera a normalização e gestão da *data warehouse* corporativo e a desenvolvimento dos *dashboards* industriais, trabalhando em colaboração com as equipas de Digitalização, Automação, IT e Benchmarking e desempenho de forma a garantir consistência e fiabilidade da informação utilizada na tomada de decisão operacional.
- Benchmarking e desempenho: Esta equipa é responsável pela definição e atualização do dicionário corporativo de KPIs, pela elaboração dos relatórios de benchmarking e pela manutenção da Base de Dados Central e dos *dashboards* industriais, assegurando a validação e o tratamento rigoroso dos indicadores das unidades operacionais. Adicionalmente, define os principais KPIs industriais de suporte ao orçamento e apoia o desenvolvimento da documentação técnica necessária à análise de desempenho e à tomada de decisão estratégica no Grupo.

4.2 Atividades Desenvolvidas no Âmbito do Estágio

4.2.1 Ferramentas de Análise da Causa Raiz

Após as primeiras semanas de integração na empresa, período dedicado à adaptação, familiarização com o processo de fabrico e conhecimento da unidade fabril onde o estagiário ficou alocado, foi-nos proposto um desafio relacionado com a melhoria contínua e análise de causa raiz de paragens incidentais.

Assim sendo, com objetivo de contribuir para a melhoria da performance das equipas de fiabilidade, surgiu a necessidade de criar uma ferramenta simples e eficaz que permitisse realizar uma análise aprofundada das paragens incidentais. Esta necessidade surgiu devido às limitações do software atualmente utilizado para o registo e análise de paragens, o qual não possuía funcionalidades adequadas para o tipo de análise pretendida.

O objetivo desse desafio consistia na criação de um ficheiro, neste caso em Microsoft Excel, onde pudesse ser aplicada a metodologia escolhida de análise da causa raiz. Foi escolhida a metodologia dos “5 porquês”, reconhecida pela sua simplicidade, eficácia.

Esta metodologia, para além de ser intuitiva e de fácil compreensão, permite o envolvimento ativo de uma equipa multidisciplinar, composta por colaboradores de diferentes áreas da organização, sem que seja necessária formação técnica especializada. Esta característica tem-se revelado essencial para assegurar uma implementação gradual e eficaz, encontrando-se atualmente numa fase de consolidação. A sua aplicação tem vindo a ser integrada de forma progressiva nas rotinas das equipas, nomeadamente através da realização de uma reunião semanal, sempre que se verificam paragens incidentais relevantes, com o intuito de analisar essas paragens e identificar as respetivas causas-raiz. Pretende-se, assim, que esta ferramenta assuma um papel fundamental, a médio prazo, no apoio à melhoria contínua da fiabilidade e disponibilidade dos ativos.

A ferramenta foi desenvolvida com o intuito de facilitar o preenchimento por parte do utilizador. Para esse efeito, foram utilizadas macros em Excel, permitindo automatizar determinados passos do processo de preenchimento, com o objetivo de simplificar a utilização e, simultaneamente, reduzir a probabilidade de ocorrência de erros de preenchimento.

O ficheiro está estruturado em quatro páginas, instruções, dados, análise dos 5 porquês e ações.

Na página de Instruções (Figura 4.1 e Figura 4.2), é apresentada uma explicação detalhada que descreve todas as funcionalidades da ferramenta, orientações sobre a sua utilização, bem como um exemplo prático. Este conteúdo tem como objetivo auxiliar qualquer utilizador que não tenha familiaridade prévia com a ferramenta e que esteja a iniciar o processo de análise, permitindo-lhe compreender o seu funcionamento de forma clara e autónoma.

Gestão da Manutenção dos Ativos Físicos na CIMPOR

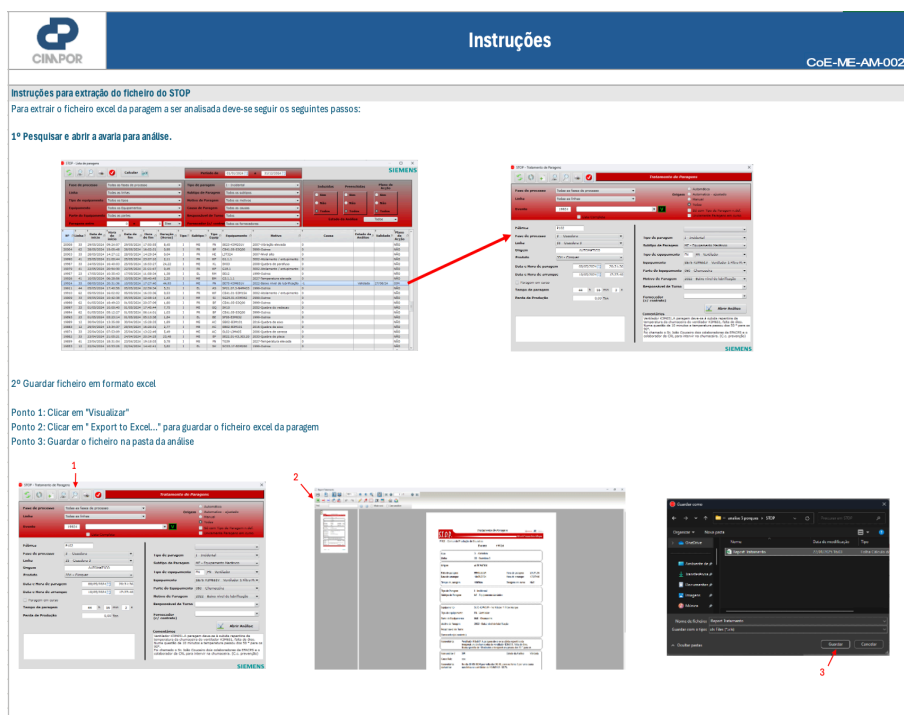


Figura 4.1 Instruções de Extração de Informação do Software de Registo de Paragens

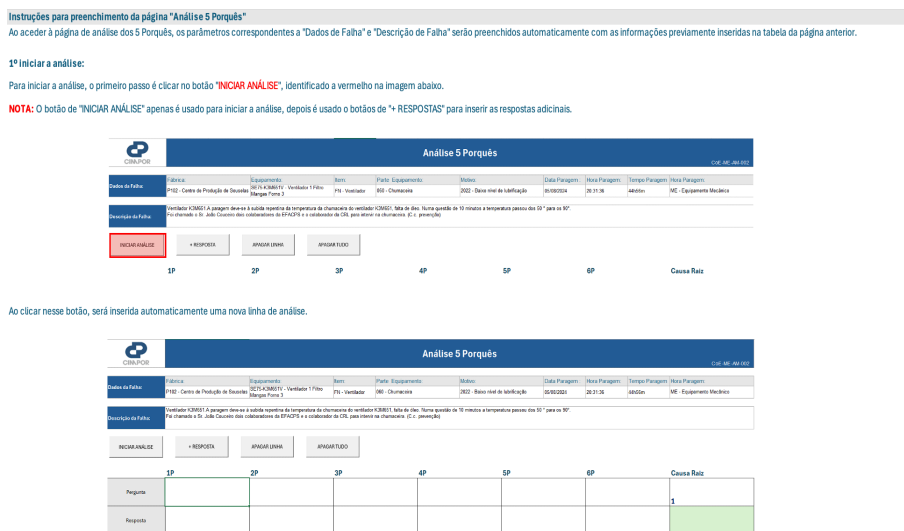


Figura 4.2 Instruções para Preenchimento da Análise dos 5 Porquês

Na página Dados, inicia-se o processo de recolha de informação necessária para a análise. Através de um botão, é possível carregar automaticamente o ficheiro extraído do software de registo de paragens (STOP), preenchendo de forma automática os campos principais (Figura 4.3). Esta página inclui ainda um campo destinado à inserção de evidências relevantes que serão analisadas durante a reunião, tais como fotografias, gráficos ou outros documentos que possam fornecer informação útil para a análise (Figura 4.4).

Dados da Falha

Cód: ME-AM-002

CARREGAR FICHEIRO

APAGAR

Dados da Falha:		Subtipo Paragem:		Participantes:	Serviço:
Fábrica:		Parte Equipamento:			
Equipamento:		Motivo:			
Item:		Data Arranque:			
Data Paragem:		Hora Arranque:			
Hora Paragem:		Evento:			
Tempo Paragem:					
Descrição da Falha:					

Dados da Falha		Subtipo Paragem		Participantes	Serviço
Fábrica:	P102 - Centro de Produção de Sosselas	ME - Equipamento Mecânico			
Equipamento:	SE75K3M651V - Ventilador 1 Filtro Mangas Forno 3	953 - Chumaceira			
Item:	FN - Ventilador	2052 - Baixo nível de lubrificação			
Data Paragem:	05/08/2024	Data Arranque:	05/10/2024		
Hora Paragem:	20:31:36	Hora Arranque:	17:27:40		
Tempo Paragem:	44h56m	Evento:	19924		
Descrição da Falha: Ventilador K3M651 A paragem deve-se à subida repentina da temperatura da chumaceira do ventilador K3M651, falta de óleo. Numa questão de 10 minutos a temperatura passou dos 50 ° para os 90 ° e o colaborador da CRL para interir na chumaceira. (C.c. prevenção) Foi chamado o Sr. João Coocero dois colaboradores da EFACPS					

Figura 4.3 Página de Dados

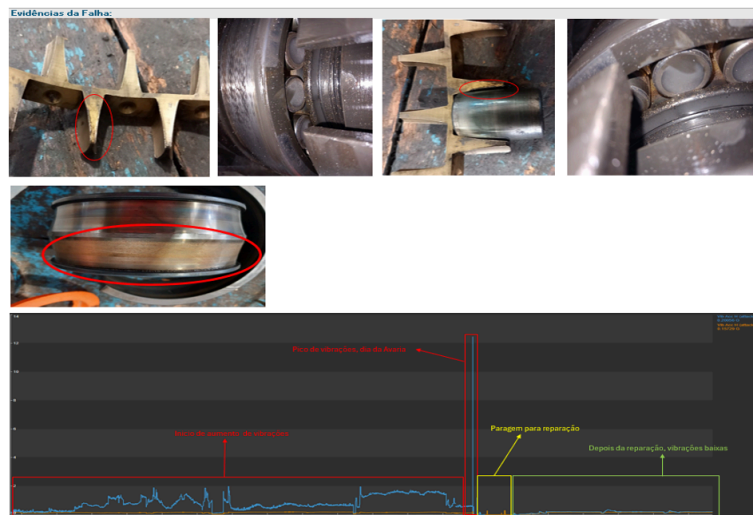


Figura 4.4 Exemplo do Campo de Evidências

A página Análise dos 5 Porquês, Figura 4.5, é dedicada à aplicação da metodologia com o objetivo de identificar a causa-raiz da paragem.

Através da utilização de botões, o utilizador conduz a análise de forma orientada, podendo adicionar linhas de raciocínio à medida que a discussão evolui. Esta abordagem facilita a identificação de todas as possíveis causas-raiz associadas à paragem em análise, promovendo um processo estruturado (Figura 4.5 e 4.6).

Gestão da Manutenção dos Ativos Físicos na CIMPOR

Análise 5 Porquês									
Cód. ME-AM-002									
Dados da Falha:	Fábrica: P102 - Centro de Produção de Sosselas	Equipamento: SE75-K3M651V - Ventilador 1 Filtro Mangas Fome 3	Item: FN - Ventilador	Parte Equipamento: 060 - Chumaceira	Motivo: 2022 - Baixo nível de lubrificação	Data Paragem: 05/08/2024	Hora Paragem: 20:31:36	Tempo Paragem: 44h56m	Hora Paragem: ME - Equipamento Mecânico
Descrição da Falha: Ventilador K3M651 A paragem deve-se à subida repentina da temperatura da chumaceira do ventilador K3M651, falta de óleo. Numa questão de 10 minutos a temperatura passou dos 50 ° para os 90°. Foi chamado o Sr. João Couceiro dois colaboradores da EFACPS e o colaborador da CRL para intervir na chumaceira. (C.c. prevenção)									
INICIAR ANÁLISE + RESPOSTA APAGAR LINHA APAGAR TUDO									
	1P	2P	3P	4P	5P	6P	Causa Raiz		
Pergunta									1
Resposta									

Figura 4.5 Formulário da Página de Análise de 5 Porquês

Análise 5 Porquês									
Cód. ME-AM-002									
Dados da Falha:	Fábrica: P102 - Centro de Produção de Sosselas	Equipamento: SE75-K3M651V - Ventilador 1 Filtro Mangas Fome 3	Item: FN - Ventilador	Parte Equipamento: 060 - Chumaceira	Motivo: 2022 - Baixo nível de lubrificação	Data Paragem: 05/08/2024	Hora Paragem: 20:31:36	Tempo Paragem: 44h56m	Hora Paragem: ME - Equipamento Mecânico
Descrição da Falha: Ventilador K3M651 A paragem deve-se à subida repentina da temperatura da chumaceira do ventilador K3M651, falta de óleo. Numa questão de 10 minutos a temperatura passou dos 50 ° para os 90°. Foi chamado o Sr. João Couceiro dois colaboradores da EFACPS e o colaborador da CRL para intervir na chumaceira. (C.c. prevenção)									
INICIAR ANÁLISE + RESPOSTA APAGAR LINHA APAGAR TUDO									
	1P	2P	3P	4P	5P	6P	Causa Raiz		
Pergunta	Porquê que a temperatura da chumaceira do ventilador subiu repentinamente?	Porquê que os rolos do rolamento agarraram?	Porquê que existia desgaste na gaiola do rolamento?	Porquê que houve falta de lubrificação?					1
Resposta	Porque os rolos do rolamento agarraram	Porque existia desgaste na gaiola do rolamento (existia detritos da gaiola na pista do rolamento)	Porque houve falta de lubrificação	Porque existia uma fuga de óleo					Porque existia uma fuga de óleo
									2
				Porque a equipa de lubrificação não alertou para uma perda de óleo excessiva	Porque os planos de lubrificação tinham um erro nas quantidades de óleo das chumaceiras				Porque os planos de lubrificação tinham um erro nas quantidades de óleo das chumaceiras

Figura 4.6 Exemplo de Análise Preenchida

Por fim, uma vez concluída a identificação das causas-raiz da paragem através da metodologia dos 5 Porquês, torna-se essencial definir e registar as ações corretivas a que vão ser implementadas, com o objetivo de eliminar de forma definitiva a causa raiz. Para esse efeito, recorre-se à página Ações (Figura 4.7).

Nesta página, o dinamizador da reunião é responsável por registar no software de gestão de paragens todas as ações definidas para serem executadas. Este registo deve assegurar que cada ação esteja devidamente associada a um responsável e a um prazo de conclusão previamente estabelecido, garantindo assim o acompanhamento e controlo eficaz da sua implementação.

Esta estrutura permite assegurar o acompanhamento eficaz das medidas propostas, promovendo o cumprimento dos prazos e a monitorização da eficácia das ações implementadas. Assim, esta etapa final assume um papel crucial na consolidação dos resultados da análise, garantindo que as conclusões obtidas se traduzem em melhorias concretas e sustentáveis no processo.

Plano de Ações								
Cód. ME-AM-002								
Dados da Falha:	Fábrica:	Equipamento:	Item:	Parte/Equipamento:	Motivo:	Data Paragem:	Hora Paragem:	Tempo Paragem:
	P102 - Centro de Produção de Souselas	SE75-K3M651V - Ventilador 1 Filtro Mangas Forno 3	FN - Ventilador	965 - Chumaceira	2022 - Baixo nível de lubrificação	05/08/2024	20:31:36	44h56m
Subtipo Paragem:	ME - Equipamento Mecânico							
Descrição da Falha:	Ventilador K3M651A paragem deve-se à subida repentina da temperatura da chumaceira do ventilador K3M651, falta de óleo. Numa questão de 10 minutos a temperatura passou dos 50 ° para os 90°. Foi chamado o Sr. João Couceiro dois colaboradores da EFACPS e o colaborador da CRL para intervir na chumaceira. (C.c. prevenção)							
INSERIR CAUSAS + CAUSAS APAGAR LINHA APAGAR TUDO								
Causa Raz 1	Ação 1	Ação 2	Ação 3	Ação 4				
Porque existia uma fuga de óleo	Substituição do chumaceira	Reajustados os planos de lubrificação						
Causa Raz 2	Ação 1	Ação 2	Ação 3	Ação 4				
Porque os planos de lubrificação tinham um erro nas quantidades de óleo das chumaceiras	Reajustados os planos de lubrificação	Implementação de procedimento de envio de relatório						

Figura 4.7 Página Ações Preenchida

Após o desenvolvimento da ferramenta tornou-se essencial acompanhar as reuniões de fiabilidade, de modo a identificar eventuais dificuldades por parte dos utilizadores e esclarecer dúvidas relativas à metodologia aplicada.

Nesse contexto, uma das responsabilidades consistiu em prestar suporte às equipas de fiabilidade sempre que surgissem obstáculos na utilização da ferramenta. Paralelamente foi também avaliado o grau de adoção tanto da ferramenta como da metodologia escolhida, de forma a garantir a sua eficácia.

4.2.2 Monitorização da Condição de Motores e Transformadores

Durante o período de estágio, uma das funções consistiu em acompanhar a integração de um software de monitorização da condição de motores e transformadores, que foi instalado nas três fábricas em Portugal. O papel do estagiário foi servir de interface entre a empresa responsável pelo desenvolvimento da solução e as equipas de manutenção das fábricas, garantindo a correta implementação da ferramenta e a maximização do seu potencial de utilização.

A ferramenta em questão uma solução inovadora baseada em tecnologias IoT (Internet of Things), que permite monitorizar, em tempo real, online e de forma remota, o estado de condição e funcionamento de equipamentos elétricos considerados críticos, como transformadores e motores de baixa e média tensão de elevada potência.

O software utiliza modelos matemáticos para realizar a análise de condição, estabelecendo limites onde, caso sejam ultrapassados ou haja algum desvio do padrão, o software emite alarmes de modo a alertar o utilizador para um possível problema.

O software calcula cinco fatores de severidade entre eles fator de severidade mecânico, rotor, estator, alimentação, variação de carga, o que permite filtrar a origem do problema (Figura 4.8 e Figura 4.9).

Esta abordagem possibilita a previsão do estado de funcionamento e da degradação das máquinas, bem como a deteção precoce de falhas, permitindo planear a

Gestão da Manutenção dos Ativos Físicos na CIMPOR

manutenção de forma proativa e reduzir o risco de paragens inesperadas em processos críticos.

Outro ponto crucial para a correta implementação do software é o seu ajuste, tendo em conta não apenas as variáveis medidas e os modelos matemáticos, mas também o histórico do equipamento. Isto porque alguns dos equipamentos onde a solução foi aplicada apresentam já uma idade considerável e diversas intervenções anteriores, o que faz com que o seu comportamento e variáveis sigam padrões que, normalmente, não seriam classificados como normais, mas sim como críticos.

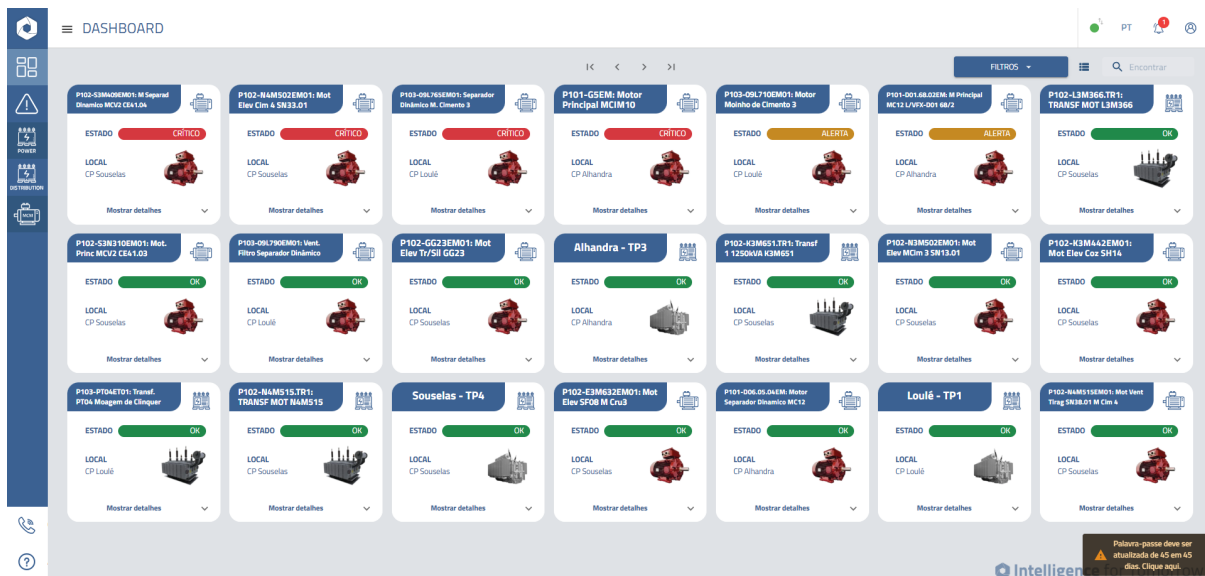


Figura 4.8 Interface do Software (Fonte: Software XPTO)



Figura 4.9 Fatores de Severidade (Fonte: Software XPTO)

4.2.3 Manutenção Preditiva com *Machine Learning*

No âmbito do estágio foi realizado o acompanhamento de duas ferramentas de análise preditiva, que recorrem a algoritmos de *machine learning* para apoiar a gestão de manutenção dos ativos.

Estas ferramentas foram testadas no moinho de cru do Centro de Produção de Souselas, com o objetivo de monitorizar o seu comportamento através de diferentes variáveis, como pressões, temperaturas, níveis de óleo e outros parâmetros operacionais, de modo a identificar tendências anormais face às condições normais de funcionamento. A lógica subjacente consiste em detetar desvios precoces e emitir alertas sempre que determinado valor se afasta do comportamento esperado, permitindo ao utilizador atuar de forma preventiva antes da ocorrência de falhas.

O trabalho realizado durante o período do teste e validação das ferramentas passou por analisar os alarmes gerados e avaliar a sua relevância de acordo com as condições de processo, analisar se existiram paragens durante este período e perceber se a ferramenta alertou atempadamente para um possível problema.

Este processo permitiu identificar o grau de eficácia de cada solução na deteção de falhas mas bem como avaliar a interface da aplicação às necessidades operacionais dos utilizadores. Através desta avaliação, foi possível compreender de que forma a ferramenta apoia as atividades diárias dos colaboradores.

Por fim, o objetivo final foi determinar se as ferramentas cumprem o esperado e qual das ferramentas oferece maior fiabilidade de resultados, e que contribui para uma maior disponibilidade do ativo e uma melhor gestão e mais eficiente da manutenção dos ativos.

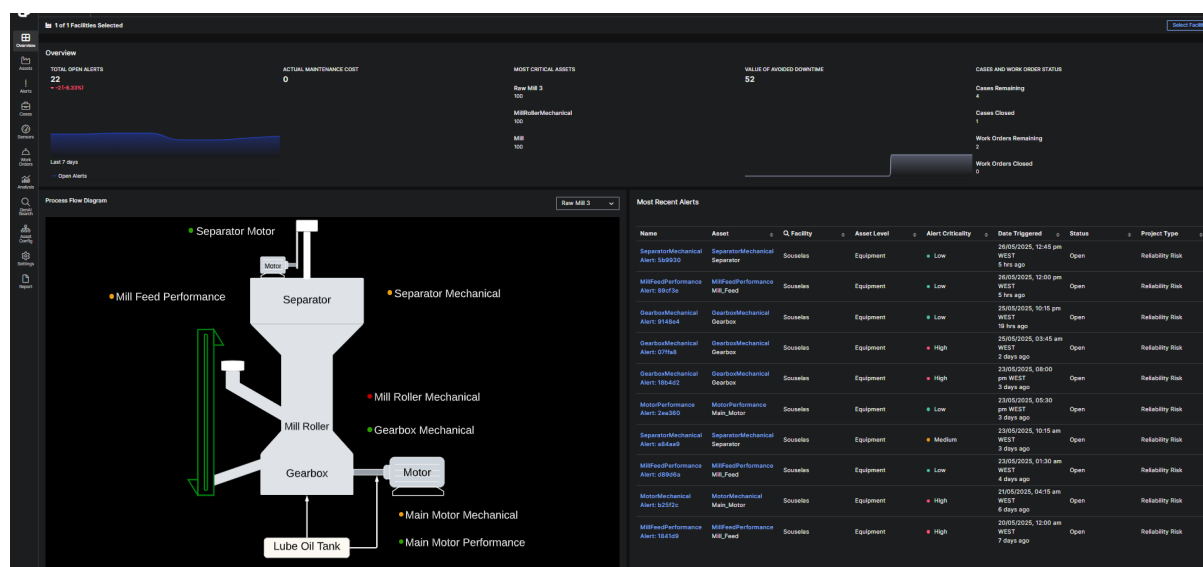


Figura 4.10 Interface do Software XPTO (Fonte: Software XPTO)

Gestão da Manutenção dos Ativos Físicos na CIMPOR

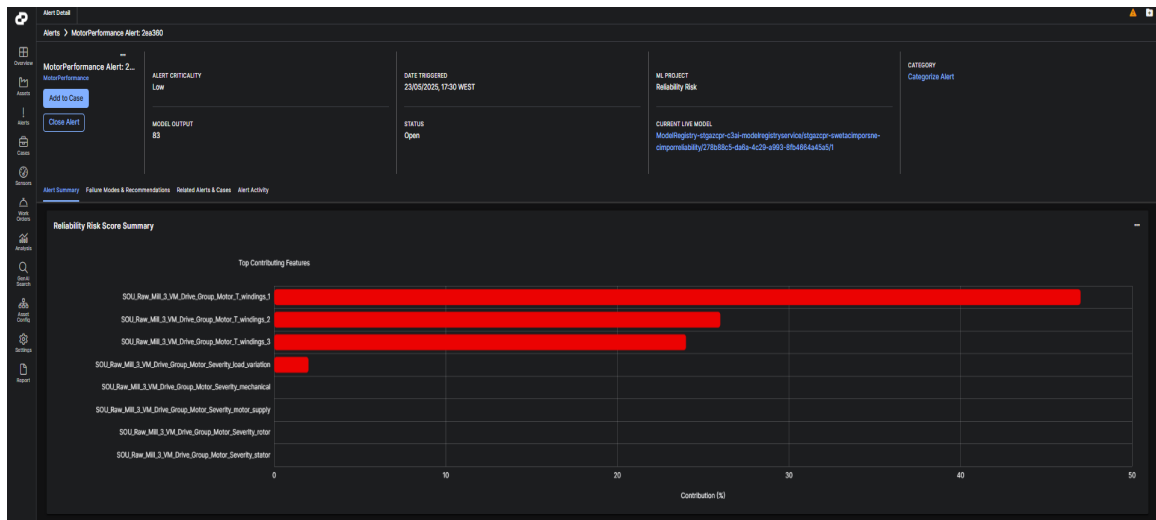


Figura 4.11 Página de Contribuições Software XPTO (Fonte: Software XPTO)



Figura 4.12 Análise das Contribuições (Fonte: Software XPTO)

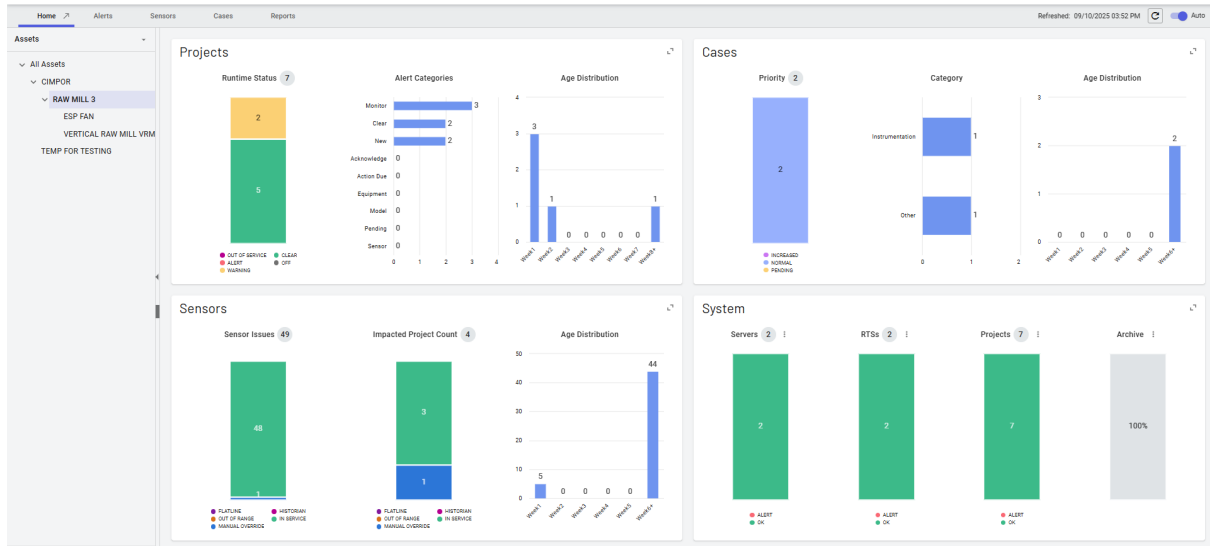


Figura 4.13 Interface do Software XPTO (Fonte: Software XPTO)

The screenshot displays the 'Alerts' page in the XPTO software. The table below lists the alerts and their associated data:

Name	Alert State	Runtime Status	Case Status	Open Cases	Alert Persistence (%)	Alert Age (Days)	7 Day Event History	Assigned To
ESP FAN MECH	✓	●	○					
ESP FAN MOTOR AF	✗	●	○		17	13.7		
Vertical Raw Mill Grinding Rollers DA	✗	●	○		100	0.2		
VRM GEARBOX MECHANICAL	✗	●	○	1	72	49.1		João Vieira
VRM MAIN MOTOR	✗	●	○	1	83	5.3		
VRM PROCESS	✓	●	○					
VRM SEPARATOR	✗	●	○		12	0.2		

The table includes a '7 Day Event History' column with a bar chart showing the frequency of events over the last 7 days. The 'Assigned To' column shows the name of the person responsible for the alert.

Figura 4.14 Página de Modelos em Alerta do Software XPTO (Fonte: Software XPTO)

Gestão da Manutenção dos Ativos Físicos na CIMPOR



Figura 4.15 Análise das Contribuições para Modelo / Alarme do Software XPTO (Fonte: Software XPTO)

5 CASO DE ESTUDO

Este capítulo apresenta o caso de estudo desenvolvido durante o decorrer do estágio na empresa Cimpor Global Holdings. O foco deste trabalho foi o estudo do moinho do cru do centro de produção de Souselas, com o objetivo de compreender os principais modos de falhas associados ao seu funcionamento.

Através da análise do histórico de intervenção e ocorrências registados ao longo de um período de três anos, procurou-se identificar as causas mais frequentes para as falhas registadas, contribuindo assim para aprofundar o conhecimento sobre o comportamento do equipamento, mas também fornecer informação para a implementação de estratégias de manutenção mais eficazes de modo a melhorar a disponibilidade do equipamento.

5.1 Moinho do Cru

O moinho do cru é um dos equipamentos fundamentais para o processo de fabrico de cimento, a sua função é a realização da moagem das matérias-primas utilizadas para a produção de clínquer.

A preparação do cru é uma etapa essencial na produção de cimento, que visa obter uma mistura homogénea de matérias-primas com composição química adequada à formação do clínquer. Esta mistura resulta principalmente de calcário e argila, podendo incluir também materiais corretivos, de modo a ajustar a composição química final.

O moinho em estudo faz parte da linha 3 do centro de produção de Souselas e é um moinho vertical de rolos da fabricante Polysius. Os moinhos verticais são a tecnologia que tem vindo a substituir os moinhos de bolas dada a sua maior eficiência energética.

5.1.1 Funcionamento e Componentes de um Moinho Vertical

O funcionamento dos moinhos verticais baseia-se no princípio de moagem por compressão através de uma mesa rotativa horizontal e um conjunto de rolos verticais submetidos a uma pressão constante através cilindros hidráulicos.

A matéria-prima é introduzida no centro da mesa onde, através da força centrífuga da rotação da mesa, a matéria-prima é conduzida para as extremidades do prato e, à medida que passa sob os rolos o material é moído, reduzindo-se a partículas finas. Em simultâneo, é insuflado ar quente na parte inferior do moinho que percorre o interior do moinho, este ar quente tem duas funções: secar o material e o transporte das partículas moídas para a parte superior do moinho onde se encontra o separador.

O separador tem como função a seleção de material, as partículas moídas com a granulometria correta passam pelo separador seguindo o fluxo de gases para a

próxima fase do processo, enquanto as partículas maiores são devolvidas através do cone de rejeição para ser novamente moído (Figuras 5.1 e 5.2). Além disso, partículas maior granulometria ou material que eventualmente sai da mesa de moagem são recolhidos e reintroduzidos no circuito pelo elevador de recirculação, garantindo que retornem ao moinho para serem novamente moídos.

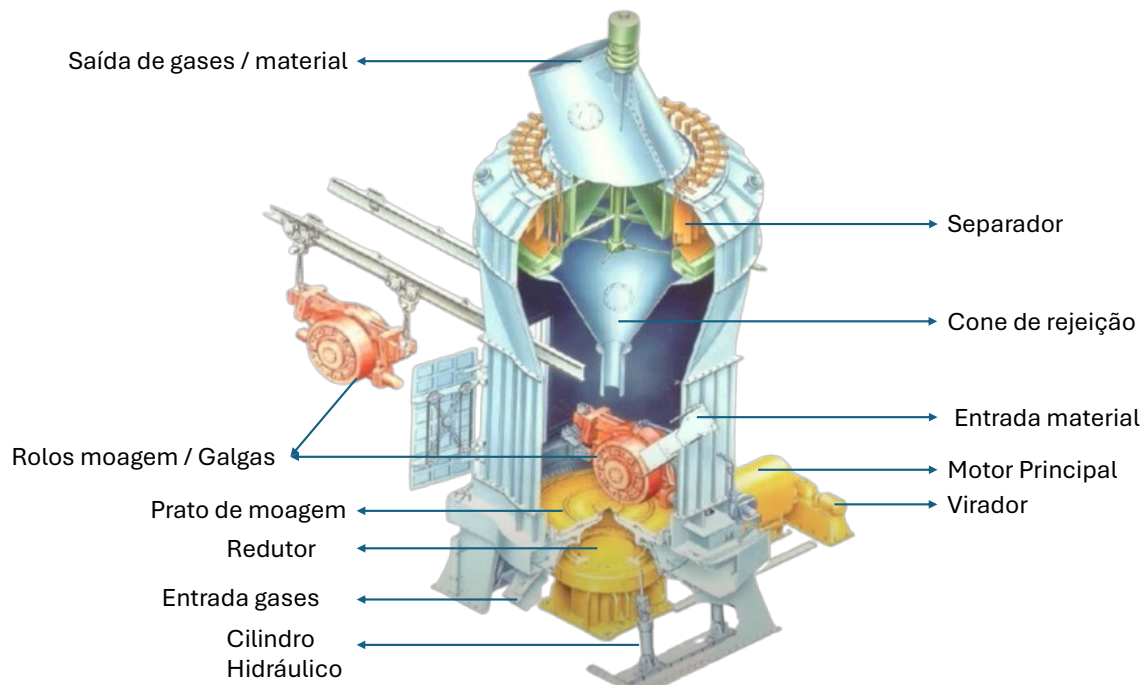


Figura 5.1 Esquema de Moinho Vertical com Componentes²⁰

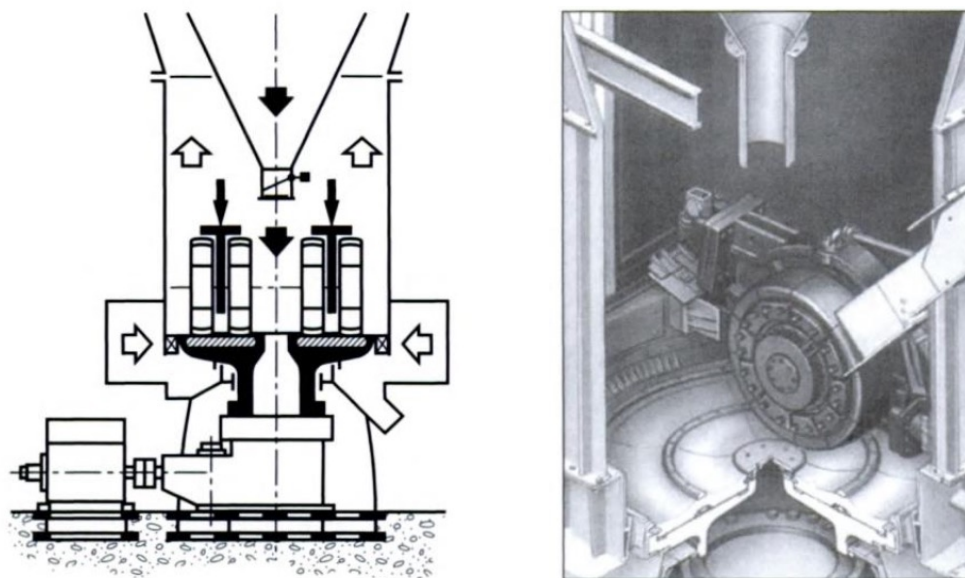


Figura 5.2 Esquema de Circulação de Gases e Interior do Moinho²¹

²⁰ <https://www.youtube.com/watch?v=U-InfMiITQ0>

²¹ Lynch, A. J., & Rowland, C. A. (2005). The History of Grinding. ISBN, 0873352386, 9780873352383. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BB17444815>

5.2 Análise do Moinho do Cru

A análise desenvolvida neste estudo teve como base o histórico de falhas incidentais registadas entre janeiro de 2022 e abril de 2025. O principal objetivo foi identificar, compreender e caracterizar os modos de falha que impactam o desempenho e a disponibilidade deste equipamento.

O estudo foi estruturado em quatro etapas, cada uma com uma abordagem distinta, mas interligadas entre si, permitindo uma análise detalhada deste equipamento.

- Na primeira etapa foi desenvolvido um diagrama de blocos onde são representados os principais equipamentos que constituem o moinho do cru, sendo que esta representação permitiu identificar os elementos do sistema e avaliar a existência de soluções de redundância.
- Na segunda etapa foi realizada uma análise FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis), centrada no corpo do moinho, de modo a identificar os modos de falha mais relevantes, os seus efeitos e a sua criticidade.
- Na terceira etapa foi realizado, como complemento à análise FMECA, um diagrama de Ishikawa, focado no modo de falha “nível de óleo baixo nas galgas”, permitindo uma análise das possíveis causas.
- Por fim, na quarta etapa, foi elaborado um diagrama de árvore de falhas (Fault Tree Analysis, FTA), no qual foram representados os modos de falha identificados na análise FMECA, bem como as interligações e as probabilidades de ocorrência, baseado nos dados históricos do equipamento.

5.2.1 Diagrama de Blocos

O estudo iniciou-se com uma análise através de um diagrama de blocos de fiabilidade (série-paralelo), representando os principais equipamentos que constituem o moinho do cru, tais como, virador, acoplamento, motor principal, redutor, corpo do moinho, elevador de recirculação e separador.

A construção deste diagrama permitiu visualizar as interdependências entre os diferentes equipamentos e avaliar as possíveis soluções de redundância, ou seja, a existência de equipamentos que possam assegurar o funcionamento em caso de falha de algum equipamento (Figura 5.3).

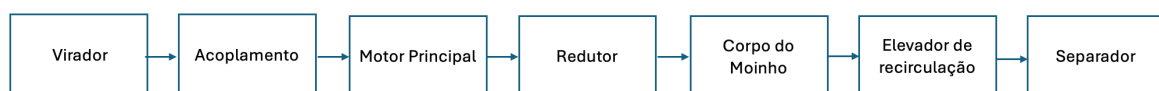


Figura 5.3 Diagrama de Blocos de Fiabilidade Moinho do Cru

Depois de analisado o diagrama confirmou-se que não existem equipamentos de redundância - todos os equipamentos operam de forma sequencial e interdependente, sendo todos os equipamentos necessários para o funcionamento contínuo do processo. O único equipamento que não opera de forma contínua com os restantes equipamentos é o Virador, que apenas é utilizado quando é necessário realizar alguma manobra no moinho, por exemplo em alguma manutenção ou outro caso quando é necessário ajustar a altura da camada de material, então é usado o virador para realizar a primeira passagem, para depois arrancar com o motor principal.

Por consequência, sempre que falha qualquer um dos equipamentos constituintes, implica inevitavelmente a paragem do moinho do cru, o que coloca este sistema como um sistema crítico do processo.

É importante relembrar que em situações de paragem do moinho do cru em que não exista *stock* de farinha suficiente armazenada nos silos, esta falha pode provocar também a paragem da etapa do forno, visto que a alimentação de matéria-prima ao forno é interrompida, provocando assim consequências significativas ao nível de eficiência, custos operacionais e queda de produção.

Esta análise demonstra a importância da monitorização contínua deste equipamento de modo a minimizar o risco de falhas inesperadas.

5.2.2 Análise FMECA ao Corpo do Moinho

Após a elaboração do diagrama de blocos e a análise do funcionamento do equipamento e os seus constituintes, segue-se a elaboração da análise FMECA (*Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*), com o objetivo de analisar um dos constituintes com maior criticidade deste equipamento, sendo que, neste caso foi escolhido o corpo do moinho. Esta escolha baseou-se na natureza das falhas existentes neste equipamento e na dimensão das consequências das falhas para o funcionamento do moinho.

A primeira fase da análise consistiu na recolha dos dados relativos às paragens incidentais do moinho do cru, abrangendo o período compreendido entre janeiro de 2022 e abril de 2025. Após a recolha, procedeu-se à triagem e validação dos dados, etapa que revelou algumas limitações na qualidade da informação disponível. Verificou-se que aproximadamente 30% das paragens associadas ao corpo do moinho estavam classificadas sob o motivo de paragem genérico “Outros”. Especificamente, de um total de 27 paragens registadas para este subsistema, 8 encontravam-se classificadas com este motivo de paragem. De forma global, das 151 paragens incidentais registadas no moinho do cru durante o período em análise, 69 (cerca de 45%) estavam igualmente classificadas com o motivo de paragem “Outros”. Esta elevada percentagem resultou essencialmente de duas causas principais: a inexistência de determinados motivos de paragem no catálogo

disponível no software de registo e as dificuldades encontradas pelas equipas na determinação da causa raiz de algumas ocorrências, o que dificultou a análise e a compreensão dos modos de falha.

Dada esta situação foi necessário realizar uma análise mais detalhada dos comentários descritivos dessas paragens. Com a presente análise foi possível identificar os modos de falha associados a cada ocorrência, possibilitando assim a reclassificação dos dados e assegurando uma base mais fiável para o desenvolvimento da análise FMECA.

Após a tiragem de dados e a reclassificação de algumas paragens procedeu-se à execução da análise FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis). Para tal foi elaborado um formulário, como mostra a Figura 5.4, seguindo a norma IEC 60812:80, com algumas alterações.

Análise FMECA											
Sistema / Equipamento	Componente / Subparte	Função	Modo de Falha	Causa(s)	Efeito Local	Efeito Global / Final	Severidade (S)	Ocorrência (O)	Detectabilidade (D)	RPN	Ações de Mitigação

Figura 5.4 Formulário para Desenvolvimento da FMECA

O preenchimento do formulário, depois da informação recolhida e organizada, foi realizado de forma sistemática. Inicialmente, os dados foram estruturados por subparte do equipamento e modos de falhas identificados, sendo que esta identificação foi complementada com a descrição da função desempenhada por cada subparte do equipamento, permitindo contextualizar o impacto da falha no sistema global. Para cada modo de falha foram identificadas as possíveis causas, bem como, os efeitos provocados, tanto a nível local, como no desempenho operacional do moinho de cru (Figura 5.5).

Gestão da Manutenção dos Ativos Físicos na CIMPOR

Análise FMECA						
Sistema / Equipamento	Componente / Subparte	Função	Modo de Falha	Causa(s)	Efeito Local	Efeito Global / Final
Moinho (SE12) do Curo	Cilindro Hidráulico	Garantir a pressão nas galgas necessária para a moagem do cru	Tirante Partido	Fadiga do componente	Desequilíbrio de pressão nas galgas	Paragem do Moinho
			Falha detetores posição cilindros	Desequilíbrio de pressão nos cilindros	Galgas fora de nível	Risco de paragem para repor as condições normais de funcionamento das galgas
			Parafusos da base do cilindro partido	Fadiga do componente	Aumento de vibrações	Risco de paragem de moinho
	Aro de retenção e placas de arrasto	Aro que retem o material no prato durante a moagem	Aranha de fixação da forra da galga partida	Desgaste	Queda da forra que danificou o aro de retenção e as placas inferiores	Paragem do Moinho devido ao dano estrutural no moinho
	Galgas	Moer o material proveniente da pedreira	Nível de óleo baixo	Vedantes danificados	Perda de lubrificação	Risco de paragem de moinho por nível de óleo baixo
				Sonda instalada sem capacidade de medida	Leitura de sensor incorreta	Informação errada de nível de óleo
				Tampão desapertado	Perda de lubrificação	Risco de paragem de moinho por nível de óleo baixo
	Ventilador de vedação Galgas	Fornecer pressão de ar constante para vedação da galga	Perda de pressão de ar na linha de vedação	Tubagem danificada (Rota)	Perda de pressão de ar na linha de vedação	Falha na vedação das galgas
				Quebra de parafuso da fixação de tubagem	Queda da tubagem de vedação das galgas e por sua vez queda de pressão	Falha na vedação das galgas
	Sebsor de vibração	Medição de vibração	Alerta de vibrações	Possível falta de material no prato do moinho	Aumento de vibrações detetadas no sistema	Risco de paragem de moinho derivado as vibrações elevadas
				Fio do sensor desapertado	Vibrações elevadas	Paragem por vibrações elevadas
	Forras de proteção	Proteger a chapa base de desgaste, de modo a minimizar o desgaste	Forra inferior caiu (Parte inferior as placas de arrasto)	Quebra da soldadura que suportava as forras	Ruido anormal à frequência de uma rotação na zona da calda para o elevador SE14	Paragem do Moinho
	Carta Interbus	Carta referente à camada	Falha de comunicação	Carta Interbus danificada	Perda de comunicação	Paragem do moinho

Figura 5.5 Primeira Fase da Análise FMECA Identificação dos Modos de Falha

Concluída a identificação dos modos de falhas encontrados passou-se à próxima fase da análise de criticidade, através da classificação dos três parâmetros fundamentais da análise FMECA: Severidade (S), Ocorrência (O) e Detetabilidade (D).

Embora a norma IEC 60812:2018 recomende, normalmente, a utilização de uma escala de 1 a 10 para a atribuição de valores a cada parâmetro, nesta análise foi adotada uma escala de 1 a 4. Esta decisão teve como objetivo simplificar a análise e garantir maior consistência na classificação, face à natureza dos dados disponíveis e à complexidade do sistema analisado (Figura 5.6).

LEGENDA		
Nível	Descrição	
Severidade		
1	Minimo	Impacto insignificante na função sem efeito na segurança
2	Ligeiro	Redução mínima no desempenho ou qualidade, efeitos facilmente toleráveis
3	Moderado	Redução significativa no desempenho, pode afetar a funcionalidade.
4	Alto	Falha grave pode comprometer a segurança, causar paragem do sistema
Ocorrência		
1	Rara	Menos que 1 ocorrência por ano
2	Ocasionalmente	Cerca de 1 ocorrência por ano
3	Frequente	Várias vezes ao ano
4	Muito Frequente	Mensal ou mais frequente
Detetabilidade		
1	Muito Elevada	Muita alta probabilidade de detetar a falha
2	Elevada	Alta probabilidade de detetar a falha
3	Baixa	Existe alguma possibilidade de ser detetada a falha
4	Muito Baixa	Baixa probabilidade de ser detetada a falha

Figura 5.6 Legenda para a Classificação com Escala 1 a 4

A classificação dos parâmetros para cada um dos modos de falha identificados foi realizada com o apoio de um técnico de manutenção do departamento de inspeção e preparação do Centro de Produção de Souselas. Esta colaboração foi fundamental para garantir a coerência das classificações atribuídas, uma vez que o técnico dispõe de um conhecimento aprofundado sobre o equipamento e o seu funcionamento, bem como de falhas anteriores. Este processo permitiu assegurar que a análise fosse representativa da realidade operacional do equipamento, reforçando os resultados obtidos e da posterior priorização de modos de falha com base no Número de Prioridade de Risco (RPN).

RPN	Código de cores	Descrição
0-16		Baixo risco
17-32		Risco moderado
33-48		Risco alto
49-64		Risco crítico

Figura 5.7 Legenda com Valor e Código de Cores para Interpretação do RPN

Por fim, depois de concluída a análise FMECA, foi possível identificar quais os modos de falhas mais críticos referentes ao corpo do moinho, tendo como base os valores calculados do RPN e, através do seu valor e de um esquema de cores, tornou possível demonstrar a criticidade dos diversos modos de falha.

A análise evidenciou que determinados modos de falha, embora apresentem baixa frequência de ocorrência, caracterizam-se por uma elevada severidade e reduzida detetabilidade. Esta situação resulta, sobretudo, a grande dimensão e complexidade dos equipamentos, que limitam o acesso aos componentes e tornam as intervenções corretivas mais complexas e demoradas. Consequentemente, os processos de deteção e diagnóstico de falhas tornam-se mais exigentes.

Concluiu-se que o modo de falha mais crítico corresponde à quebra do tirante, provocada pelo desgaste progressivo ou fadiga do componente, o que implica a paragem imediata do moinho.

Este resultado demonstra a importância de estudar estratégias de monitorização e intensificar as inspeções de rotina de modo que seja possível antecipar a degradação do componente. Desta forma, pretende-se que a substituição dos tirantes deixe de ocorrer de forma reativa e imprevista, passando a integrar o plano de manutenção preventiva, com base no estado de condição, assim, esta abordagem permite minimizar o impacto das falhas, reduzir os tempos de paragem não planeada e aumentar a disponibilidade e fiabilidade do equipamento.

O segundo modo de falha com maior relevância, considerando a sua ocorrência, é o nível de óleo baixo nas galgas, resultante de fuga nos vedantes. Apesar deste modo de falha apresentar maior detetabilidade, a sua elevada ocorrência faz com que este seja prioritário para a gestão da manutenção, ou seja, sempre que é identificado um nível de óleo inferior ao recomendado, é realizada a reposição, permitindo que o moinho continue em operação até à próxima paragem programada. No entanto, esta

solução temporária não representa uma correção definitiva, implicando custos associados, tanto à mão de obra necessária para o reabastecimento como ao consumo de óleo.

Este procedimento é justificado pelo facto de que para substituir o par de galgas com fuga pelo de substituição exige uma paragem prolongada, o que leva à tentativa de adiar ao máximo essa intervenção até coincidir com uma paragem de manutenção programada.

Dada a sua relevância, este modo de falha foi alvo de uma análise mais aprofundada, através da construção de um diagrama de *Ishikawa*, com o objetivo compreender as suas possíveis causas e identificar medidas eficazes de mitigação do problema.

A análise FMECA revelou-se, assim, uma ferramenta estratégica na tomada de decisões operacionais e na melhoria contínua contribuindo para a melhoria da disponibilidade e da fiabilidade do equipamento (Figura 5.8).

Análise FMECA											
Sistema / Equipamento	Componente / Subparte	Função	Modo de Falha	Causa(s)	Efeito Local	Efeito Global / Final	Severidade (S)	Ocorrência (O)	Detectabilidade (D)	RPN	Ações de Mitigação
Moinho (SE12) do Cru	Cilindro Hidráulico	Garantir a pressão nas galgas necessária para a moagem do cru	Tirante Partido	Fadiga do componente	Desequilíbrio de pressão nas galgas	Paragem do Moinho	4	3	4	48	Substituição do tirante
			Falha detetores posição cilindros	Desequilíbrio de pressão nos cilindros	Galgas fora de nível	Risco de paragem para repor as condições normais de funcionamento das galgas	3	2	3	18	Regularização das pressões dos cilindros
			Parafusos da base do cilindro partido	Fadiga do componente	Aumento de vibrações	Risco de paragem de moinho	2	2	4	16	Substituição dos parafusos partidos
	Galgas	Moer o material proveniente da pedraira	Nível de óleo baixo	Vedantes danificados	Perda de lubrificação	Risco de paragem de moinho por nível de óleo baixo	4	3	3	36	Reposição do nível de óleo e mais tarde reparação da galga
				Sonda instalada sem capacidade de medida	Leitura de sensor incorreta	Informação errada de nível de óleo	4	1	3	12	Substituição da sonda por uma com maior capacidade de medida
				Tampão desapertado	Perda de lubrificação	Risco de paragem de moinho por nível de óleo baixo	2	1	2	4	Reaperto do tampão
	Aro de retenção e placas de arrasto	Aro que retem o material no prato durante a moagem	Aranha de fixação da forra da galga partida	Desgaste	Queda da forra que danificou o aro de retenção e as placas inferiores	Paragem do Moinho devido ao dano estrutural no moinho	4	2	4	32	Substituição de galga norte, substituição de todo o aro de retenção, saia do moinho, placas de arrasto, reparação do corpo do moinho.
	Ventilador de vedação Galgas	Fornecer pressão de ar constante para vedação da galga	Perda de pressão de ar na linha de vedação	Tubagem danificada (Rota)	Perda de pressão de ar na linha de vedação	Falha na vedação das galgas	3	2	4	24	Reparação da tubagem
				Quebra de parafuso da fixação de tubagem	Queda da tubagem de vedação das galgas e por sua vez queda de pressão	Falha na vedação das galgas	2	1	4	8	Substituição dos parafusos partidos e Lubrificação das rótulas
	Sebsor de vibração	Medição de vibração	Alerta de vibrações	Possível falta de material no prato do moinho	Aumento de vibrações detetadas no sistema	Risco de paragem de moinho derivado as vibrações elevadas	3	4	1	12	Rearraque
				Fio do sensor desapertado	Vibrações elevadas	Paragem por vibrações elevadas	1	1	3	3	Reaperto do fio
	Forras de proteção	Proteger a chapa base de desgaste, de modo a minimizar o desgaste	Forra inferior caiu (Parte inferior as placas de arrasto)	Quebra da soldadura que suportava as forras	Ruído anormal à frequência de uma rotação na zona da caída para o elevador SE14	Paragem do Moinho	2	2	3	12	Foi reparada a soldadura da forra
	Carta Interbus	Carta referente á camada	Falha de comunicação	Carta Interbus danificada	Perda de comunicação	Paragem do moinho	2	1	4	8	Substituição da carta
	Bomba Óleo 1 Baixa Pressão	Lubrificação	Baixo nível de lubrificação	Filtros de óleo da bomba de baixa pressão colmatados	Falta de óleo	Risco de falha mecânica	2	1	4	8	Substituição de filtros
	Detetores de posição dos cilindros hidráulicos	Medem a posição dos cilindros para garantir a correta posição das galgas	Suporte dos detetores de posição partida	Fadiga do componente	Galgas fora de nível	Risco de paragem para voltar nivelar as galgas	1	2	3	6	Reparação do suporte
	Central Hidráulica Cilindros M. Cru 3	Controlo dos cilindros hidráulicos	Cilindro isolado	válvula de admissão de óleo fechada	Falta de pressão no cilindro	Falha do cilindro	2	1	2	4	Repor as condições para funcionamento (abertura da válvula)
	Tubagem de água	Alimentação de água ao moinho	Fuga de água em tubagem	Acessório defeituoso	Fuga de água		1	1	3	3	Desmontar acessório, analisada a sua condição, montagem e reaperto da união para eliminar fuga de água

Figura 5.8 Análise FMECA Concluída

5.2.3 Diagrama de Ishikawa: Nível de Óleo Baixo nas Galgas

Após a identificação dos modos de falhas referentes ao corpo do moinho, destacou-se o modo de falha “nível de óleo das galgas baixo”, devido à sua recorrência. Esta recorrência justificou a realização de uma análise mais aprofundada, através da elaboração de um diagrama de Ishikawa ou também conhecido por diagrama de espinha de peixe.

Este método permite organizar, de forma estruturada, os fatores que podem estar na origem da falha, agrupando-os em categorias, tais como: método, mão de obra, máquina, manutenção, medição e materiais, o objetivo é identificar as possíveis causas que contribuem para este modo de falha.

Pelos dados históricos, o modo de falha de nível de óleo baixo nas galgas é atribuído principalmente a fugas nos vedantes dos rolamentos e noutras situações á falha de aperto do tampão, afetando diretamente a retenção de óleo nas galgas. Porém, uma análise aprofundada verificou que existiam outras possíveis causas para este modo de falha como, por exemplo:

- Método: Falha na verificação do aperto correto do tampão;
- Máquina: Tampão desapertado, vedantes dos rolamentos danificados;
- Material: Baixa qualidade dos vedantes dos rolamentos;
- Medição: Sonda, leitura incorreta;
- Manutenção: Falha de aperto do tampão;
- Mão de obra: Aperto incorreto do tampão.

O diagrama resultante desta análise (Figura 5.9) mostra de forma clara as possíveis causas raízes associadas ao modo de falha, servindo como apoio para a definição de ações corretivas e preventivas mais eficazes.

DIAGRAMA DE ISHIKAWA

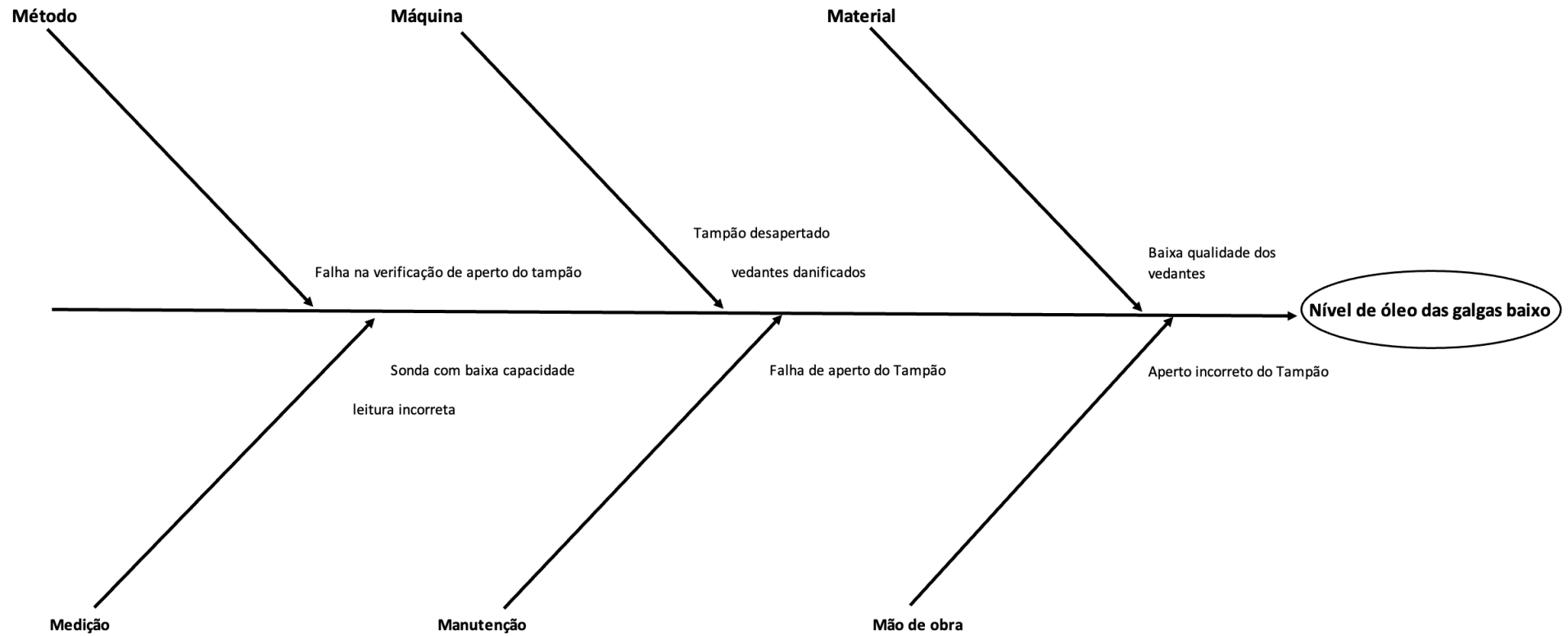


Figura 5.9 Diagrama de Ishikawa: Nível de Óleo das Galgas Baixo

5.2.4 Análise de Árvore de Falhas ao Corpo do Moinho

Assim como o diagrama de *Ishikawa*, a análise de árvore de falhas (FTA) foi desenvolvida como complemento à análise FMECA realizada com foco específico no corpo do moinho.

Esta ferramenta permitiu aprofundar a investigação, ao quantificar a probabilidade de ocorrência dos modos de falha previamente identificados na FMECA, através de uma estrutura lógica em forma de árvore. Esta abordagem revelou-se particularmente útil para compreender quais são, de facto, os eventos com maior peso estatístico na ocorrência de uma paragem do moinho.

É importante destacar que esta análise foi construída com base em dados de histórico de paragens do moinho, registadas entre janeiro de 2022 a abril de 2025. Ao contrário de abordagens teóricas ou baseadas em estimativas, esta análise assentou em factos e registos concretos, permitindo quantificar com maior precisão as causas que mais contribuíram para falhas no sistema.

Através da análise de árvore de falhas foi possível identificar de forma clara que a cadeia de falha com maior valor de probabilidade de ocorrência está associada ao nível de óleo baixo das galgas, consequência de fugas de óleo provocadas por vedantes danificados. Este modo de falha, já destacado como crítico na análise FMECA e incluído no diagrama de *Ishikawa* como uma das causas principais, surge agora evidenciado com dados concretos, obtidos a partir de históricos de paragens.

A convergência dos resultados obtidos através das abordagens qualitativa (diagrama de *Ishikawa*), semi-quantitativa (análise FMECA) e quantitativa (análise FTA, Figura 5.10) valida de forma evidente a consistência das conclusões deste estudo. A evidência recolhida aponta para a necessidade de reforçar a monitorização e a prevenção de falhas derivadas a fugas de óleo nas galgas, cuja contribuição para as paragens do moinho é significativa.

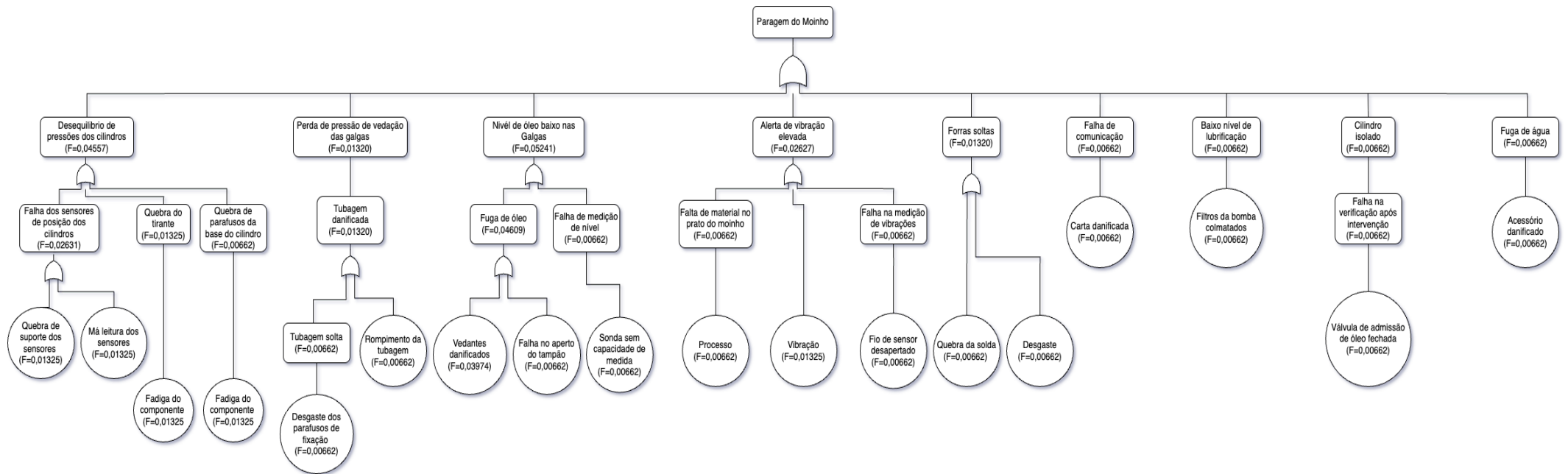


Figura 5.10 Árvore de Falhas: Corpo do Moinho

6 CASO DE ESTUDO: ANÁLISE DE FIABILIDADE UTILIZANDO DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL E LOGNORMAL

A análise de fiabilidade é uma ferramenta essencial para compreender o comportamento de falhas dos equipamentos, componentes e sistema. Entre as diversas distribuições estatística aplicadas a este tipo de estudos, a distribuição Weibull foi a que se destacou pela sua flexibilidade de se ajustar a diferentes padrões de falha ao longo do ciclo de vida do ativo.

Este capítulo apresenta o caso de estudo desenvolvido durante o decorrer do estágio na empresa Cimpor Global Holdings, especificamente no moinho do cru do centro de produção de Souselas. O objetivo principal consiste em avaliar a fiabilidade do equipamento em análise, utilizando a distribuição de Weibull e lognormal.

A análise desenvolvida neste estudo teve por base o histórico de indicadores de desempenho registados entre janeiro de 2022 e abril de 2025. Considerando este período, procedeu-se a uma análise de série temporal com base em dados mensais, com o objetivo de identificar tendências, variações sazonais e padrões de comportamento dos indicadores de desempenho ao longo do tempo.

6.1 Análise Temporal

A análise série temporal dos indicadores (Figura 6.1), realizada no período mencionado anteriormente, evidenciou a existência de variações ao longo do período em estudo.

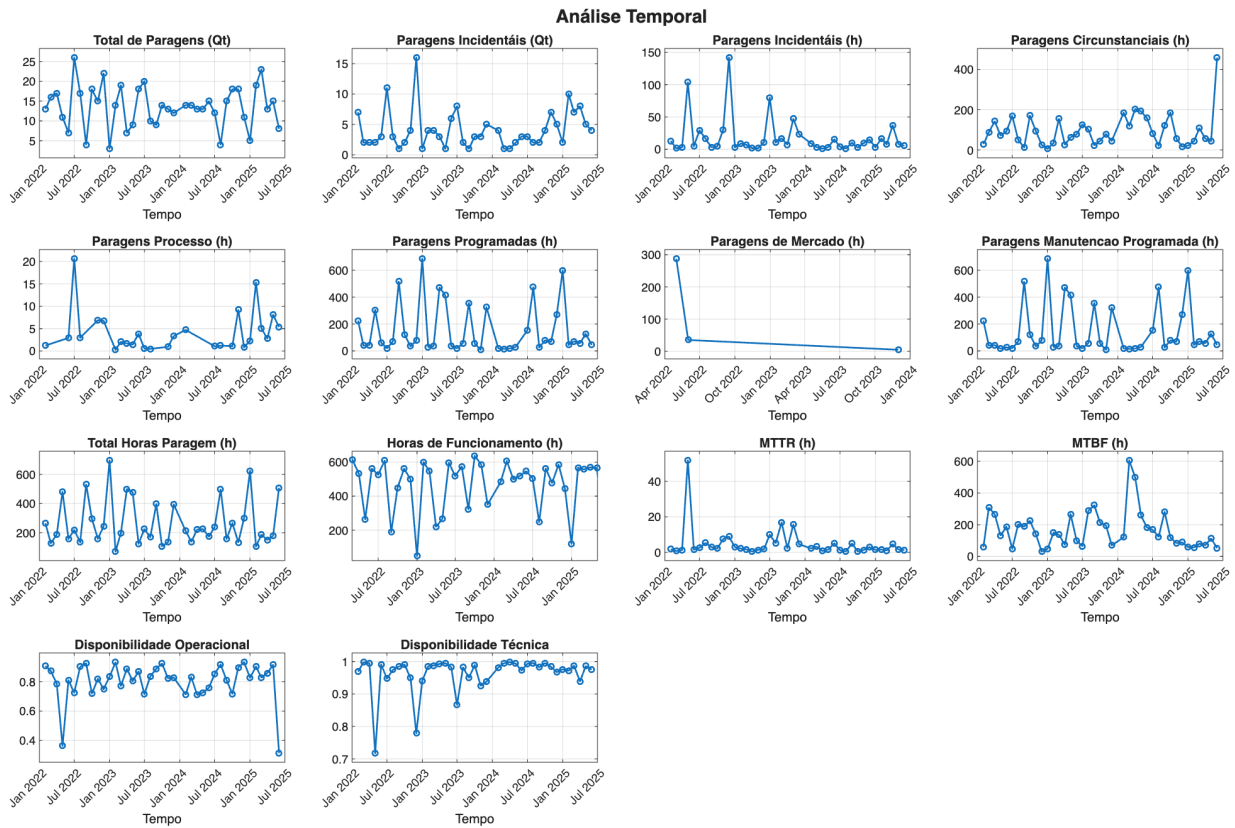


Figura 6.1 Análise Série Temporal (Fonte: Matlab)

O número paragens incidentais apresenta uma redução entre 2022 e 2023 (Figura 6.2), mas voltou a apresentar uma tendência crescente em 2024. Relativamente ao indicador MTTR, identificam-se vários picos isolados que não resultam de um aumento na frequência de falhas, mas sim da duração excecionalmente elevada de determinadas intervenções corretivas. Um exemplo particularmente relevante ocorre em maio de 2022, mês em que apenas duas paragens foram registadas, mas uma delas implicou uma reparação de aproximadamente 102 horas, influenciando significativamente a média mensal do MTTR (Figura 6.3). Esta situação reflete-se também na disponibilidade do ativo, o qual regista quedas acentuadas mesmos períodos de inatividade do ativo para manutenção.

Gestão da Manutenção dos Ativos Físicos na CIMPOR

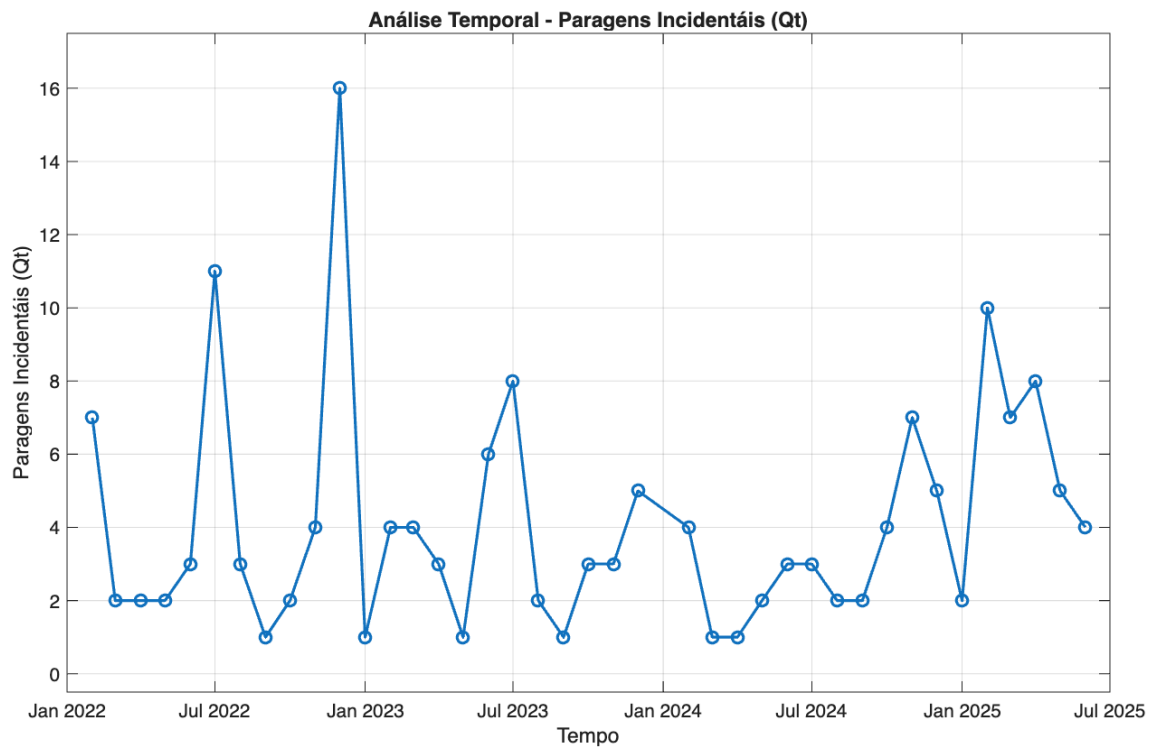


Figura 6.2 Gráfico de Quantidade de Paragens Incidentais (Fonte: Matlab)

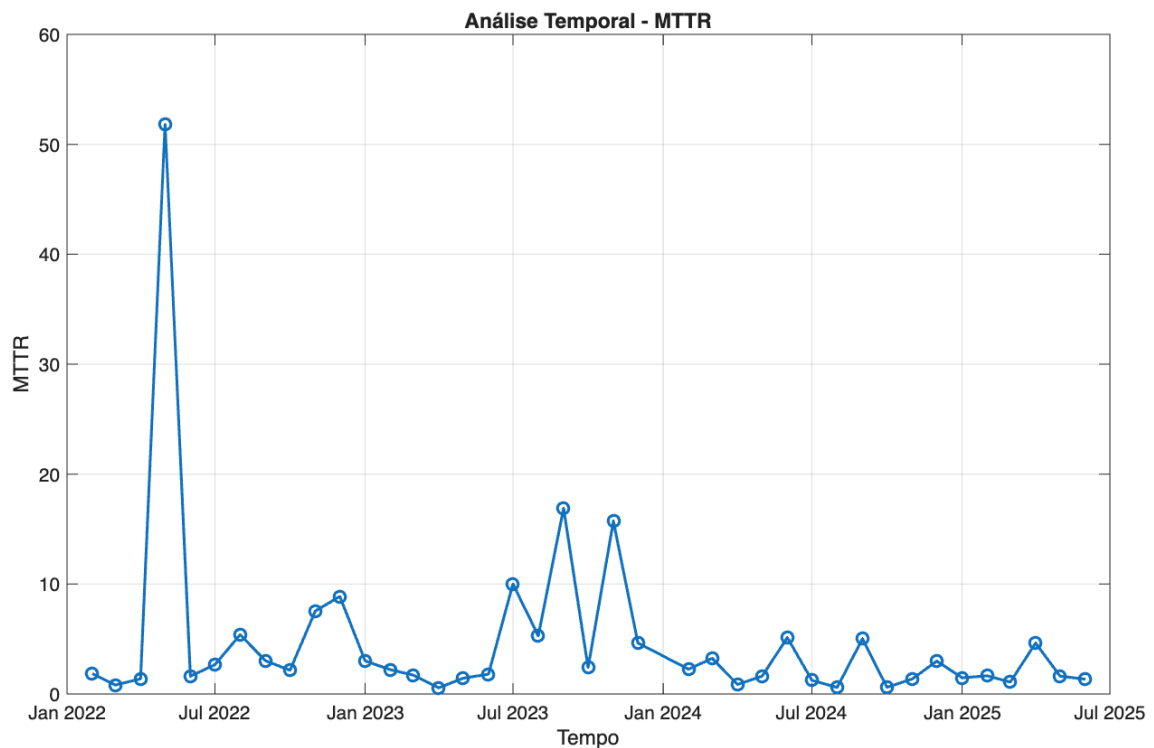


Figura 6.3 Gráfico do MTTR (Fonte: Matlab)

O indicador MTBF mostra oscilações significativas, onde se pode observar períodos de maior estabilidade intercalados com fases de falhas mais frequentes, o que demonstra a necessidade de consolidar estratégias de manutenção preventiva e de otimização operacional (Figura 6.4).

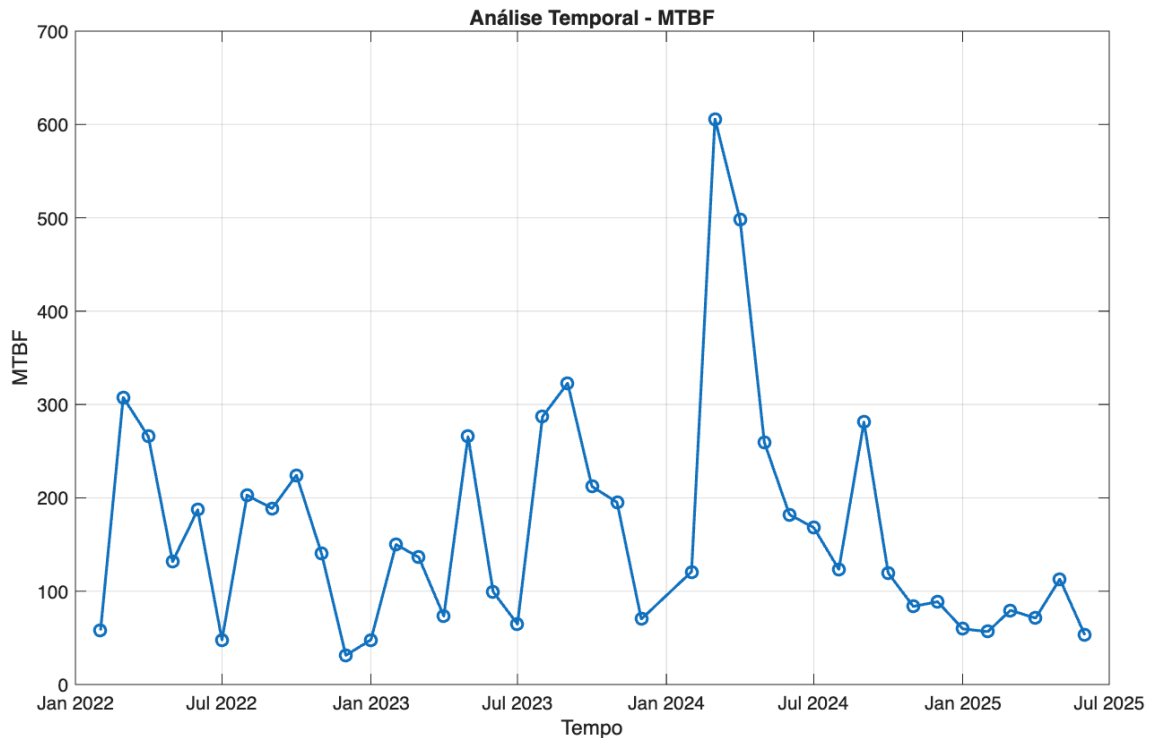


Figura 6.4 Gráfico do MTBF (Fonte: Matlab)

6.2 Escolha da Distribuição Estatística

A escolha da distribuição estatística é essencial para uma análise adequada dos dados.

Neste estudo a seleção da distribuição foi baseada em 2 pontos:

- Análise gráfica, onde se compara o histograma dos dados com a função densidade de probabilidade de modo a visualizar se é ajustada aos dados reais (Figura 6.5)

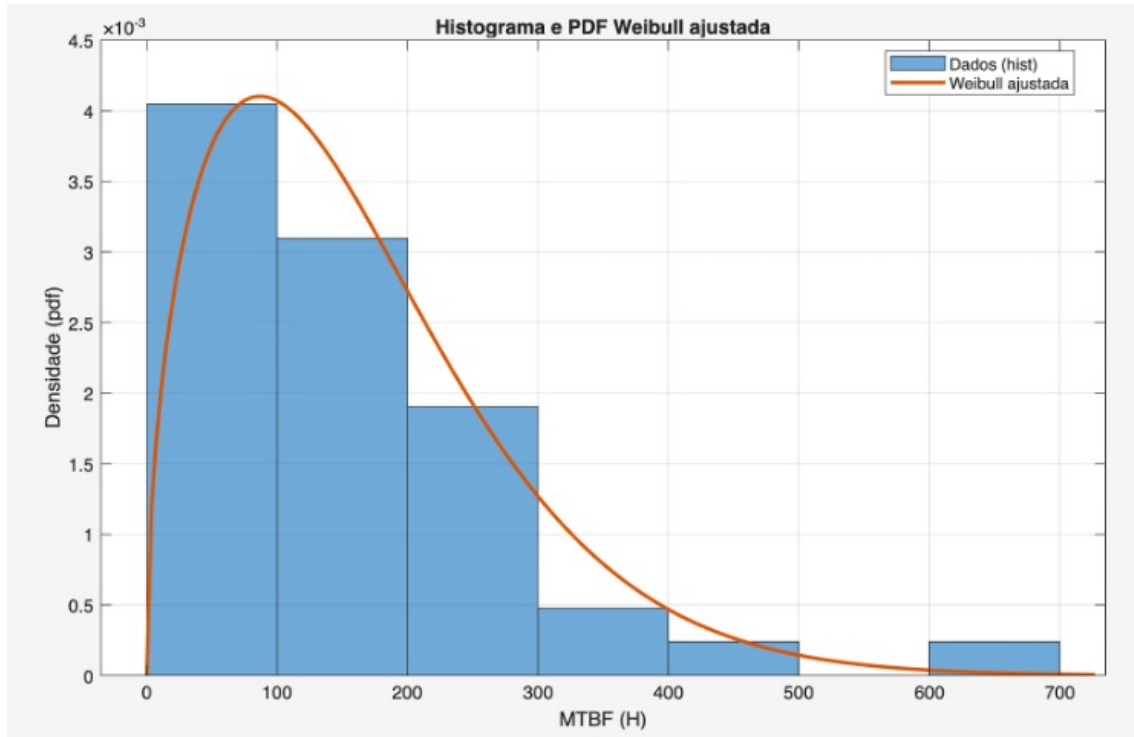


Figura 6.5 Histograma e PDF Weibull Ajustada (Fonte: Matlab)

- O coeficiente de correlação foi utilizado para medir o grau de proximidade entre os dados empíricos e a linha de tendência ajustada pelo modelo estatístico. Valores próximos de 1 indicam que os pontos observados seguem de muito perto a distribuição teórica, confirmando a qualidade do ajuste (Figura 6.6).

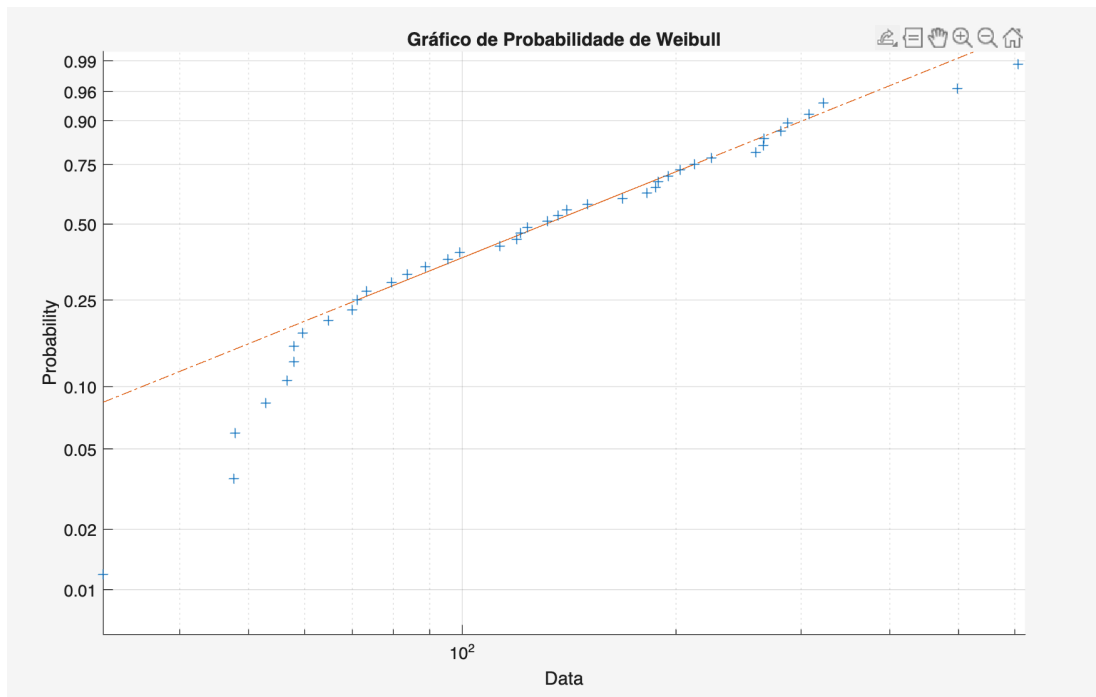


Figura 6.6 Gráfico de Probabilidade de Weibull para os Dados de MTBF e Linha de Tendência (Fonte: Matlab)

No início da análise foram testadas várias distribuições, nomeadamente Weibull, Lognormal e Beta, com recurso também a métodos de apoio baseados em inteligência artificial para comparação preliminar.

Contudo, a distribuição de Weibull destacou-se pela sua flexibilidade, pela robustez dos resultados e pela interpretação prática dos seus parâmetros, sendo a escolhida para a análise detalhada dos indicadores MTBF, MTTR e Disponibilidade.

6.3 Resultados da Análise de Fiabilidade

6.3.1 MTBF (Mean Time Between Failures)

O Indicador de MTBF (Mean Time Between Failures) representa o tempo médio entre falhas e constitui um dos indicadores fundamentais na avaliação da fiabilidade de ativos industriais, este indicador permite compreender a variabilidade do comportamento dos equipamentos, identificar padrões de falha e apoiar a definição de estratégias de manutenção adequadas.

A análise iniciou-se por estimar os parâmetros da distribuição Weibull e da Lognormal. Foram considerados 42 registos históricos de tempos entre falhas, compreendidos entre janeiro de 2022 e abril de 2025. O conjunto de dados apresenta um valor mínimo de 31,23 horas, máximo de 605,89 horas, média de 162,52 horas e mediana de 127,55 horas.

A estimação dos parâmetros foi realizada com recurso a ferramentas de inteligência artificial e MATLAB, aplicando a distribuição Weibull como modelo base. O ajuste forneceu os seguintes parâmetros.

O Parâmetro de forma (β) é igual a 1,497, significa que como o valor de $\beta > 1$ indica que a taxa de falha é crescente ao longo do tempo, refletindo um processo associado ao desgaste natural do equipamento. O Parâmetro de escala (η), também chamado de tempo característico é igual a 181,5 h o que indica que o MTBF do equipamento tende a situar-se em torno de 181,5 h, funcionando como um valor de referência típico para a análise de fiabilidade.

A função densidade de probabilidade (PDF) foi construída a partir do histograma dos dados empíricos, sobrepondo-se as curvas ajustadas das distribuições Weibull e Lognormal (Figura 6.7). Esta representação permitiu uma primeira avaliação da qualidade do ajuste, evidenciando que ambas as distribuições seguem adequadamente o comportamento dos dados.

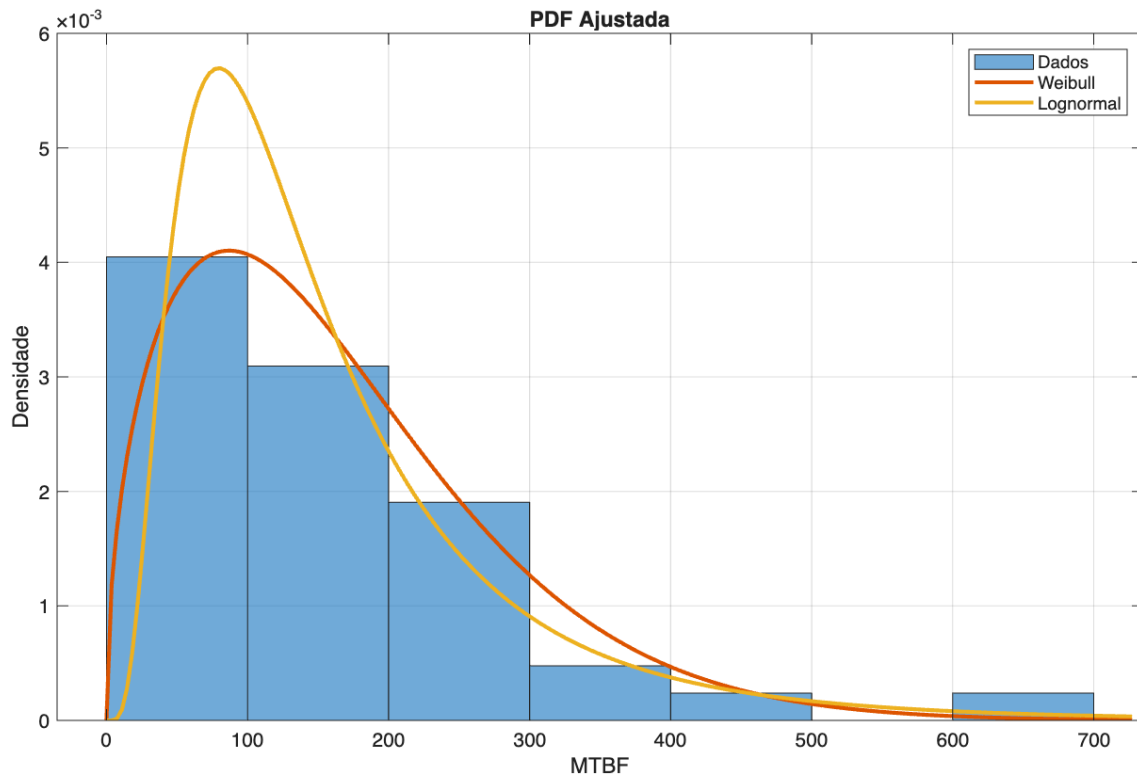


Figura 6.7 Função Densidade de Probabilidade (PDF) Ajustada aos Dados do MTBF (Fonte: Matlab)

Em seguida foi analisada a função de distribuição acumulada (CDF), comparando-se os valores empíricos com as distribuições ajustadas (Figura 6.8). A proximidade entre as curvas teóricas e a CDF empírica confirma o ajuste dos modelos e permite validar graficamente a consistência da modelação.

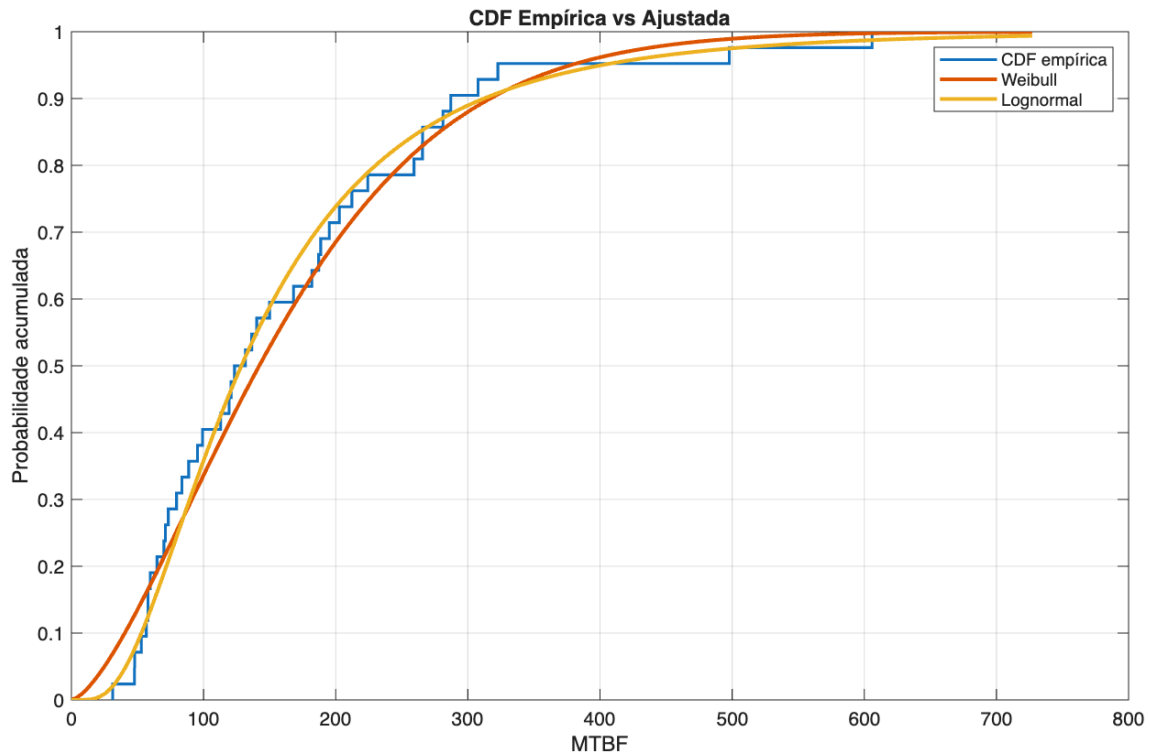


Figura 6.8 Comparação entre a CDF Empírica e as Distribuições Ajustadas MTBF (fonte: Matlab)

Foram elaborados gráficos de probabilidade (Figura 6.9), que consistem em representar os dados no sistema de eixos transformado de cada distribuição. A linearidade dos pontos em relação à linha de tendência confirma a qualidade do ajuste, permitindo ainda determinar graficamente os parâmetros de forma (β) e de escala (η) da distribuição de Weibull. Paralelamente, foi calculado o coeficiente de correlação, que apresentou um valor de 0,976 para a distribuição de Weibull e de 0,991 para a distribuição Lognormal. Embora o resultado da Lognormal indique um ligeiro melhor ajuste, a diferença entre os dois modelos não é estatisticamente significativa. Além disso, considerando a dimensão reduzida da amostra, é razoável assumir que ambas as distribuições são adequadas para descrever os dados, sendo expectável que, com um volume maior de observações, a distribuição de Weibull se revele a mais representativa do comportamento do sistema.

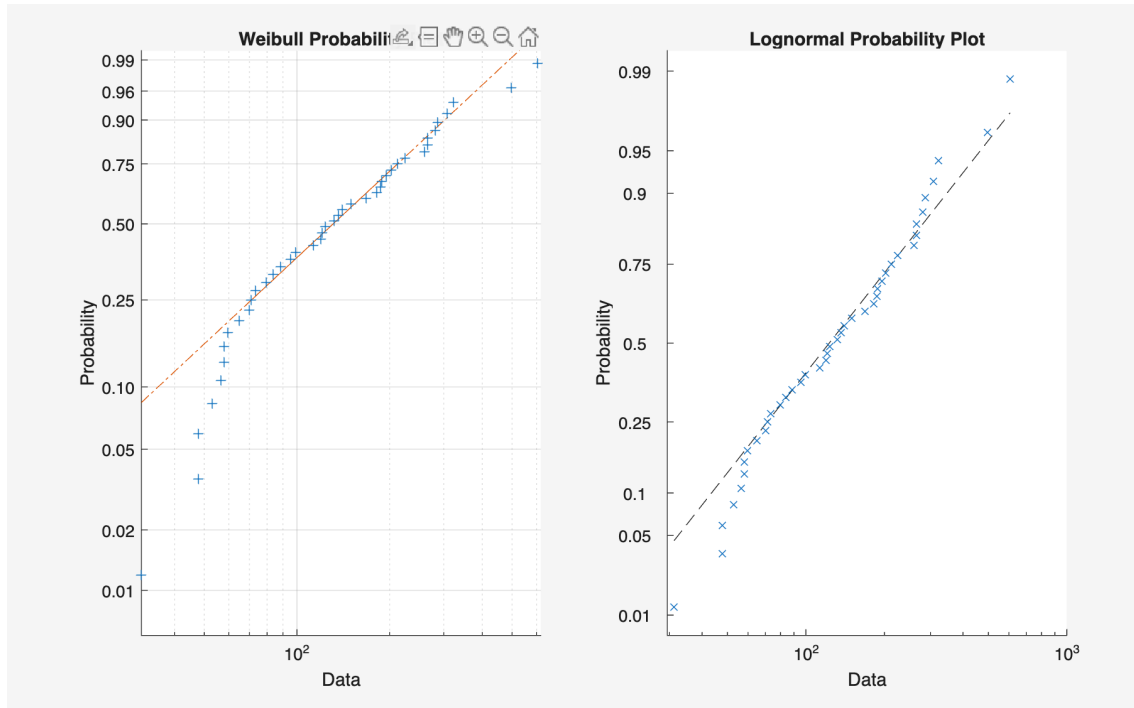


Figura 6.9 Gráficos de Probabilidade para o Ajuste dos Dados de MTBF (Fonte: Matlab)

Na avaliação quantitativa do ajuste foram considerados diferentes critérios estatísticos cujos resultados estão resumidos na Tabela 6-1. De forma geral, ambas as distribuições apresentaram desempenho satisfatório, com a Lognormal a evidenciar ligeiramente melhores indicadores.

Tabela 6-1 Métricas de Qualidade do Ajuste das Distribuições Weibull e Lognormal para os dados de MTBF (Fonte Excel)

	Log-verossimilhança (logL)	Critério de Informação de Akaike (AIC)	Critério de Informação Bayesiano (BIC)	Estatística Teste de Kolmogorov-Smirnov (KSD)	Teste de Kolmogorov-Smirnov (KS p-valor)	Distância KS empírica	Erro Quadrático Médio da CDF (RMSE_CDF)	Estatística de Anderson-Darling (AD)	Coefficiente de determinação (R^2)	Coefficiente de correlação de Pearson (R)
Weibull	-250,72	505,44	508,91	0,10282	0,72766	0,079013	0,047228	0,60661	0,95251	0,97596
Log-normal	-247,61	499,22	502,69	0,077504	0,94557	0,077504	0,035462	0,30567	0,98265	0,99129

A título complementar, foi representada a taxa de falha mensal (Hazard Rate) associada ao MTBF (Figura 6.10). A análise baseou-se na aproximação $h(t)=1/\text{MTBF}$ permitindo observar a evolução temporal da intensidade de falhas. Para reduzir a variabilidade pontual foi incluída uma média móvel de 3 meses, possibilitando a identificação de tendências globais.

Além disso, foi calculada a mediana da taxa de falha mensal, que se situou em $h(t)=0,00919$ falhas/hora. Este valor significa que metade dos meses têm uma taxa de risco inferior a esse valor.

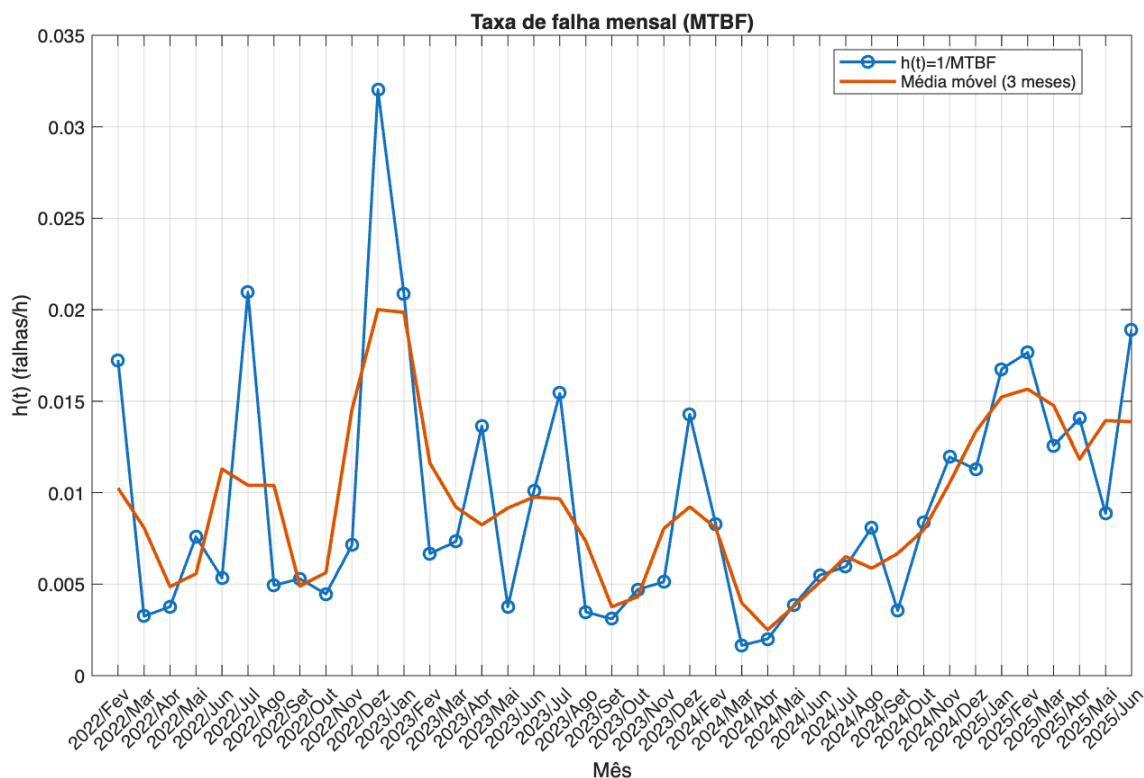


Figura 6.10 Taxa de Falha Mensal Hazard Rate (Fonte: Matlab)

Em conclusão, a análise do MTBF evidenciou que tanto a distribuição Weibull como a Lognormal traduzem adequadamente os dados, com ligeira vantagem para a Lognormal. Contudo, a Weibull mantém-se uma referência na fiabilidade pela interpretação prática dos seus parâmetros. A avaliação da taxa de falha mensal e da sua mediana reforçou a compreensão da variabilidade do risco de falha ao longo do tempo, apoiando a definição de estratégias de manutenção preventiva e contribuindo para a melhoria da disponibilidade operacional do equipamento. Importa ainda referir que, dada a reduzida dimensão da amostra, a diferença entre as duas distribuições não é estatisticamente significativa, pelo que é plausível admitir que, com um volume maior de dados, a tendência poderia favorecer a distribuição de Weibull como modelo predominante.

6.3.2 MTTR (Mean Time To Repair)

O MTTR (Mean Time To Repair) representa o tempo médio necessário para realizar a reparação de ativo após a ocorrência de uma falha. Este indicador é de grande relevância para a avaliação da manutibilidade, uma vez que permite medir a eficiência das ações de manutenção, influenciando diretamente a disponibilidade operacional dos equipamentos.

Na análise foram considerados 40 registos históricos de tempos médios de reparação entre fevereiro de 2022 e junho de 2025. Os dados apresentam um valor mínimo de 0,56 horas, um máximo de 51,8 horas, uma média de 4,74 horas e uma mediana de 2,18 horas, evidenciando elevada variabilidade.

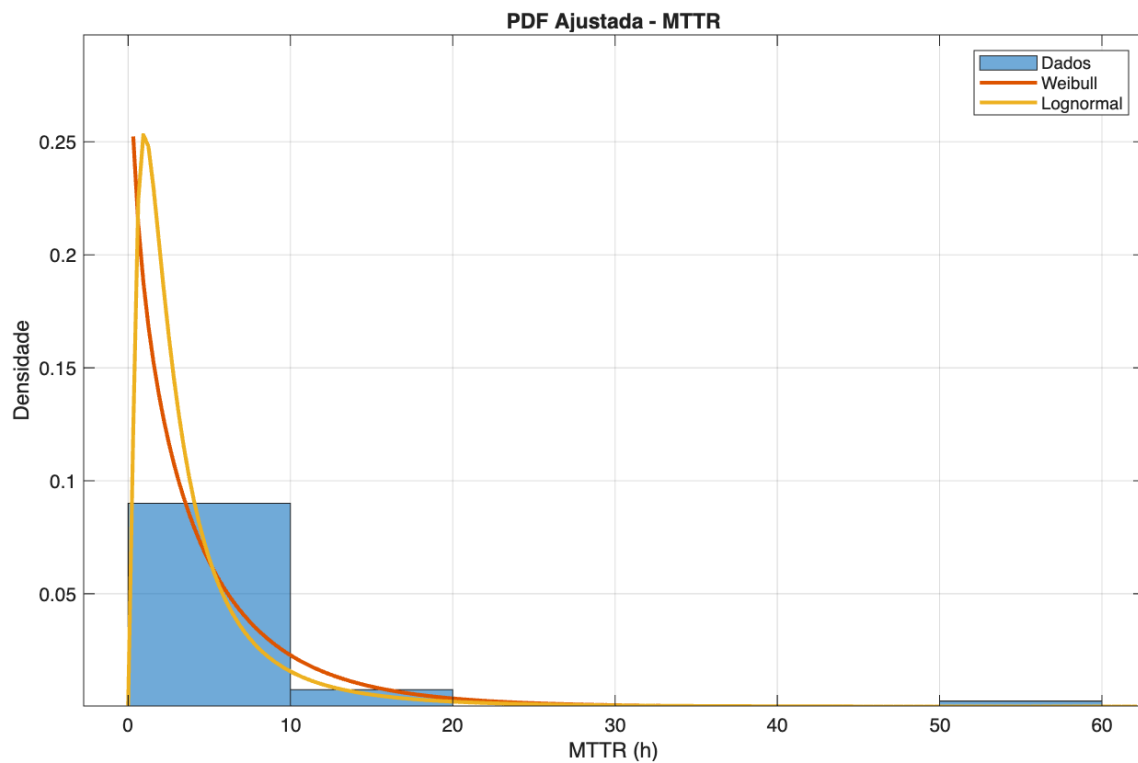


Figura 6.11 Função Densidade de Probabilidade (PDF) Ajustada aos Dados do MTTR (Fonte: Matlab)

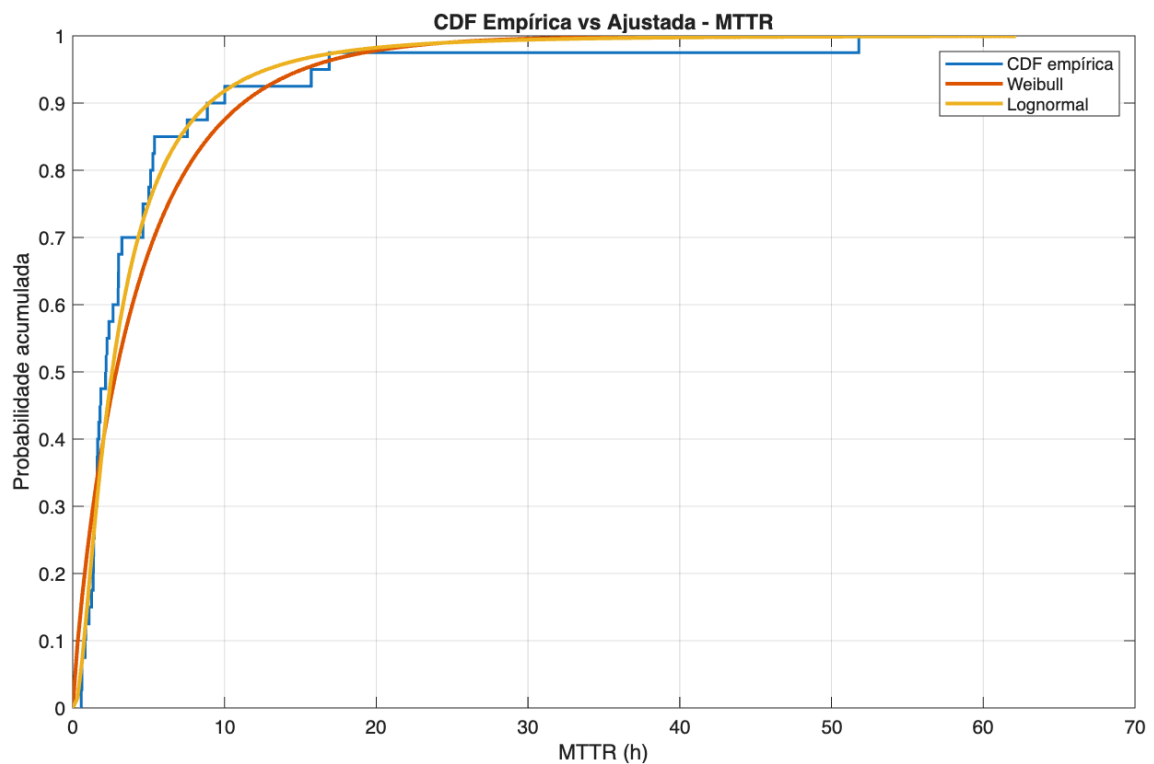


Figura 6.12 Comparação entre a CDF Empírica e as Distribuições Ajustadas MTTR (fonte: Matlab)

A Figura 6.12 mostra a comparação entre a CDF empírica e as distribuições ajustadas, permitindo observar a proximidade entre os valores teóricos e experimentais. Ambas as distribuições evidenciam um bom nível de aderência aos dados, descrevendo adequadamente o comportamento assimétrico típico dos tempos de reparação.

A avaliação dos coeficientes de correlação confirma a qualidade do ajuste, com valores de $R = 0,871$ para a distribuição de Weibull e $R = 0,931$ para a distribuição Lognormal. A linearidade dos pontos em torno da linha de tendência confirma visualmente a adequação dos modelos e reforça os resultados obtidos pelos testes estatísticos conforme mostra a Figura 6.13.

A distribuição de Weibull ajustada aos valores do MTTR apresentou parâmetros de escala $\eta = 4,34$ e forma $\beta = 0,88$. O parâmetro de escala representa o tempo de reparação característico, o que indica que neste período a maior percentagem das reparações foram concluídas com duração abaixo de 4,34 horas.

O valor de β inferior a 1 indica uma tendência de decréscimo na taxa de reparação, sugerindo que, no início do período analisado, ocorreram reparações mais prolongadas, possivelmente associadas a falhas críticas.

Com o passar do tempo, verifica-se uma melhoria gradual na eficiência das intervenções, refletindo um possível aperfeiçoamento das praticas de manutenção e gestão mais eficaz de recurso

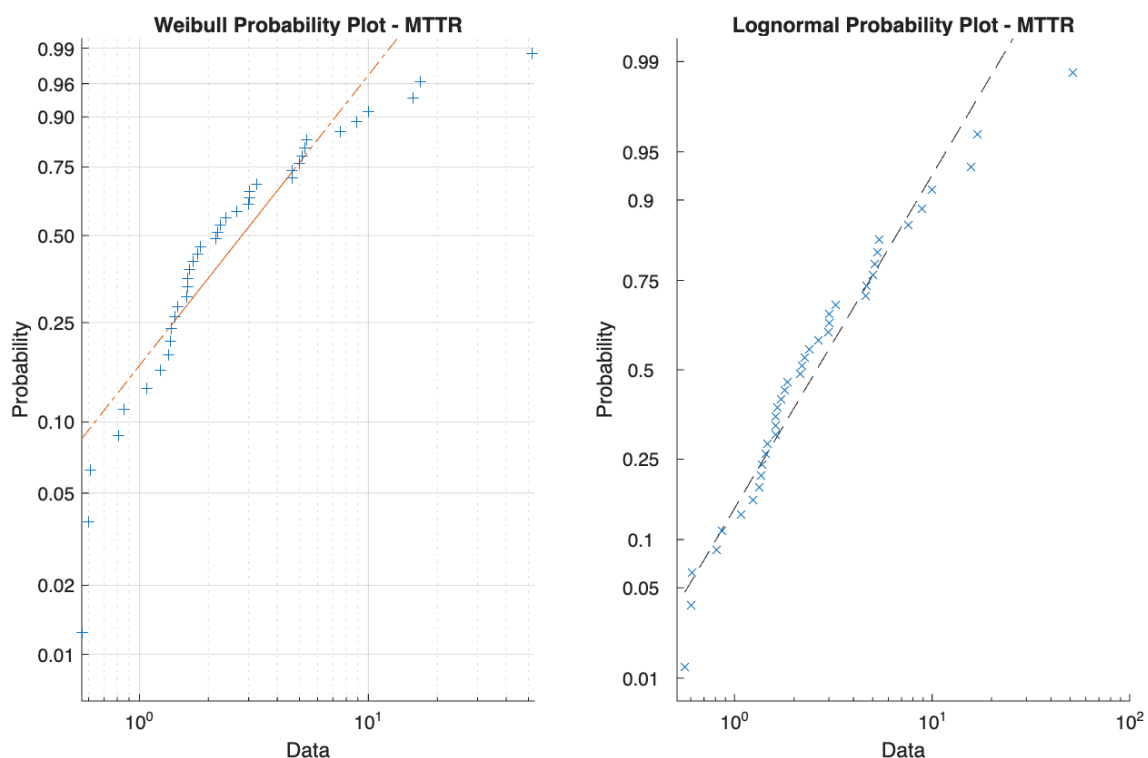


Figura 6.13 Gráficos de Probabilidade para o Ajuste dos Dados de MTTR (Fonte: Matlab)

Na avaliação quantitativa do ajuste foram considerados diferentes critérios estatísticos cujos resultados estão resumidos na Tabela 6-2.

Gestão da Manutenção dos Ativos Físicos na CIMPOR

De forma geral, ambas as distribuições apresentaram desempenho satisfatório, com a Lognormal a evidenciar ligeiramente melhores indicadores. No entanto, a diferença entre os modelos é pouco significativa e, considerando o tamanho reduzido da amostra, já referido na análise do MTBF, considera-se que ambas as distribuições são adequadas para representar o comportamento do MTTR, de modo que podemos concluir que, com um volume maior de dados, a distribuição de Weibull, pela sua flexibilidade na modelação de fenómenos de manutenção, se venha a revelar mais representativa do comportamento real do ativo.

Tabela 6-2 Métricas de Qualidade do Ajuste das Distribuições Weibull e Lognormal para os Dados de MTTR (Fonte: Excel)

	Log-verossimilhança (logL)	Critério de Informação de Akaike (AIC)	Critério de Informação Bayesiano (BIC)	Estatística Teste de Kolmogorov-Smirnov (KSD)	Teste de Kolmogorov-Smirnov (KS p-valor)	Distância KS empírica	Erro Quadrático Médio da CDF (RMSE_CDF)	Estatística de Anderson-Darling (AD)	Coefficiente de determinação (R^2)	Coefficiente de correlação de Pearson (R)
Weibull	-101.39	206.78	210.16	0.16137	0.22317	0.16137	0.095248	0.3210	0,77106	0,8781
Log-normal	-93.152	190.30	193.68	0.11247	0.65106	0.11247	0.060443	1.1475	0,86666	0,93095

A representação gráfica da taxa de reparação mensal $\mu(t) = 1/\text{MTTR}$ e da sua média móvel de três meses permitiu visualizar a evolução temporal da capacidade de reparação dos ativos. A mediana da taxa de reparação apresentou o valor de 0.45875 reparações/hora, o que corresponde a um tempo médio de reparação típico de, aproximadamente, 2,2 horas.

Considerando a média móvel de três meses, o valor da mediana aumentou para 0.54055 reparações/hora (equivalente a cerca de 1,85 horas por reparação), refletindo a melhoria global na capacidade de resposta e a estabilização do desempenho de manutenção ao longo do tempo.

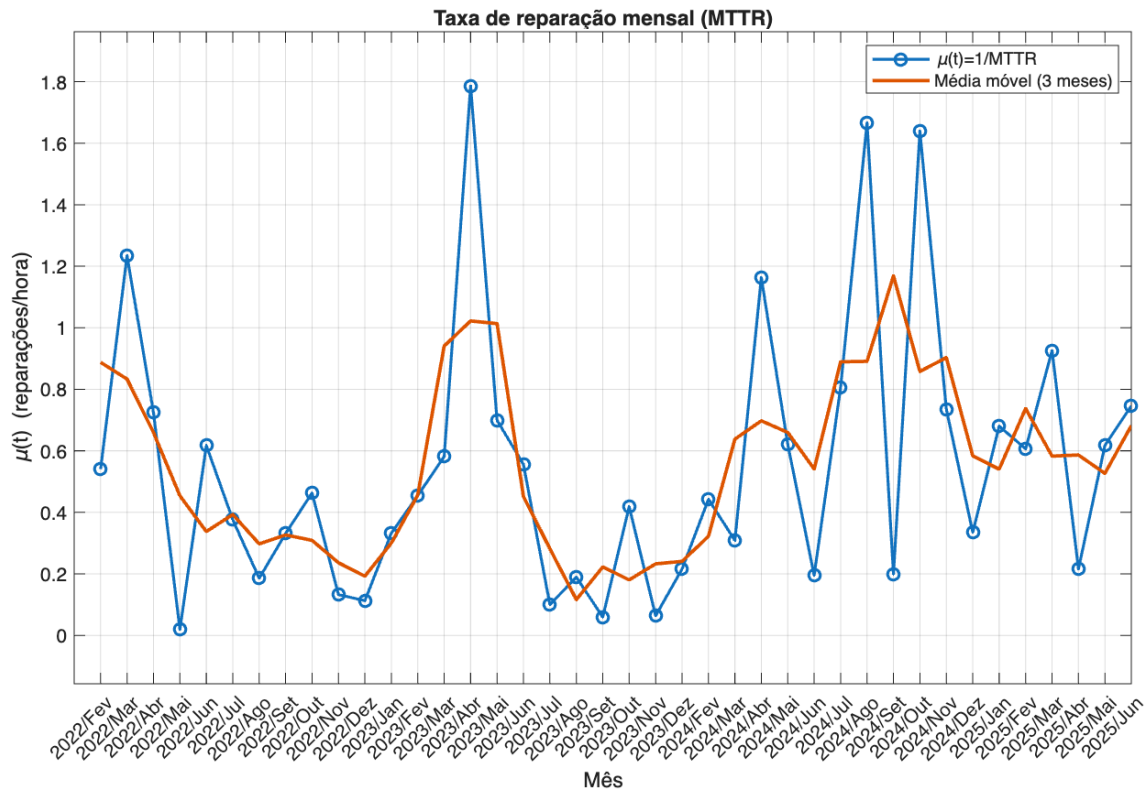


Figura 6.14 Taxa de Reparação Mensal (Fonte: Matlab)

Em conclusão, a análise do MTTR evidenciou que as distribuições de Weibull e Lognormal descrevem adequadamente o comportamento dos tempos médios de reparação, com ligeira vantagem para a Lognormal em termos de qualidade de ajuste. Ainda assim, a distribuição de Weibull mantém especial relevância na análise da manutibilidade, pela sua capacidade de modelar diferentes comportamentos de taxa de reparação.

A avaliação da taxa de reparação mensal e da respetiva média móvel de três meses permitiu identificar variações sazonais na eficiência das intervenções de manutenção, bem como períodos de melhoria gradual da capacidade de resposta das equipas.

6.3.3 Disponibilidade Operacional

A disponibilidade operacional representa a probabilidade de um ativo se encontrar funcional num determinado instante, sendo um indicador-chave do OEE do ativo.

Na análise foram considerados 40 registos históricos de disponibilidade operacional entre fevereiro de 2022 e junho de 2025. O conjunto de dados apresenta um valor mínimo de 31,30 %, máximo de 93,27%, média de 80,50% e mediana de 82,78%.

Inicialmente foram testados os ajustes das distribuições Weibull e Lognormal aos valores mensais de disponibilidade operacional. As Figuras 6.15, 6.16 e 6.17 apresentam as funções densidade de probabilidade (PDF) e distribuição acumulada

(CDF) ajustadas e gráfico de probabilidade com linha de tendência, evidenciando que a distribuição Weibull traduzia melhor o comportamento dos dados.

A distribuição de Weibull ajustada aos valores mensais de disponibilidade operacional apresentou parâmetros de escala $\eta = 84,88$ e forma $\beta = 9,74$. O parâmetro de escala representa o valor típico de disponibilidade operacional, este valor indica que a maior parte dos meses analisados apresentou disponibilidades próximas de 85%, refletindo o desempenho médio e típico do sistema, enquanto o parâmetro de forma superior a 1 indica uma menor variabilidade e uma tendência de estabilização do sistema.

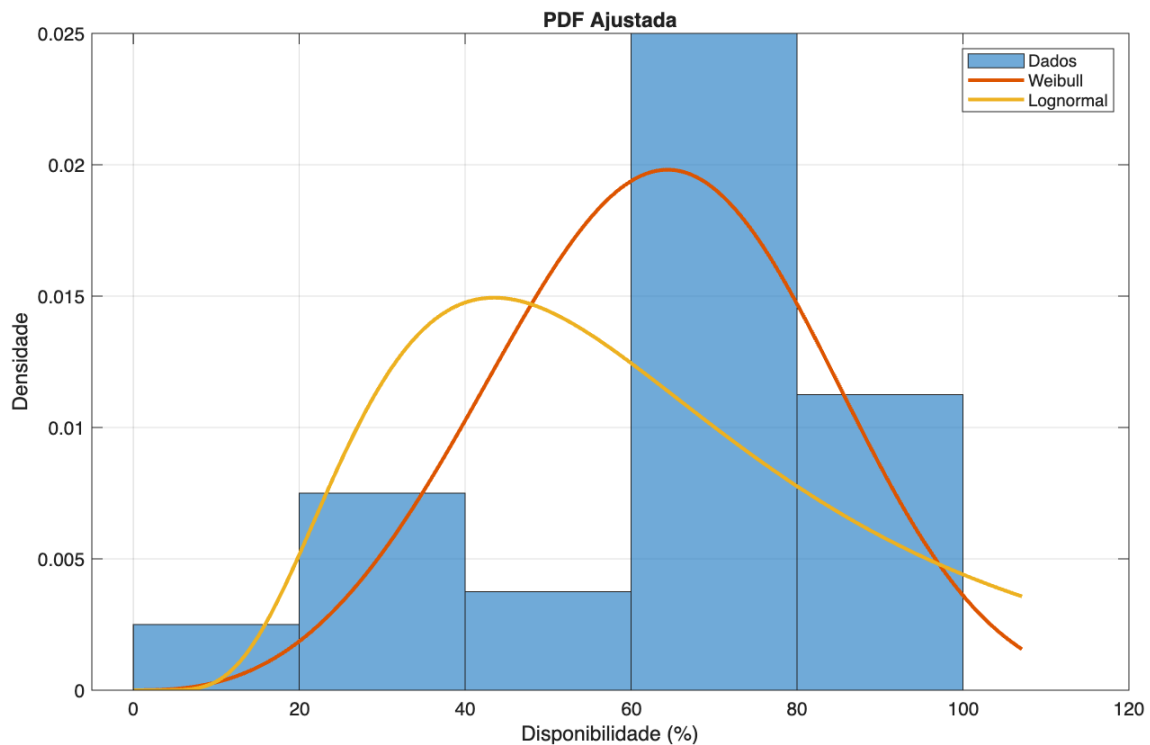


Figura 6.15 Função Densidade de Probabilidade (PDF) Ajustada aos Dados de Disponibilidade Operacional (Fonte: Matlab)

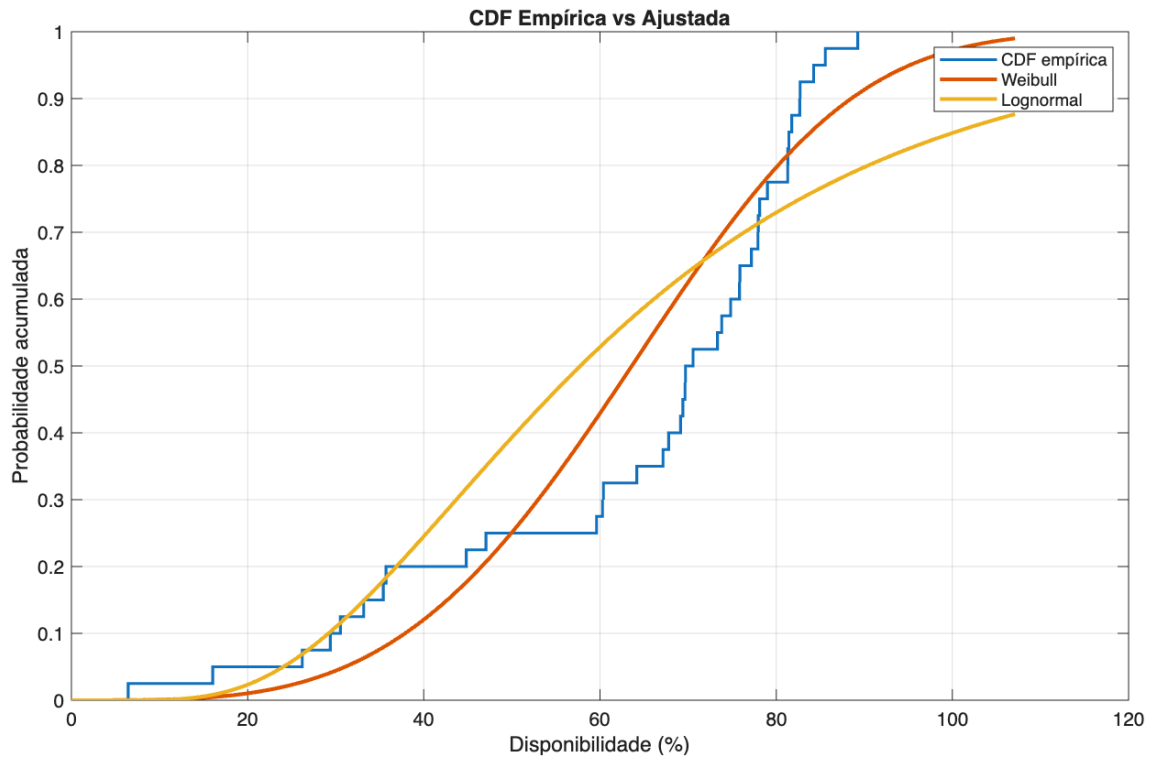


Figura 6.16 Comparação entre a CDF Empírica e as Distribuições de Weibull e Lognormal para o Indicador de Disponibilidade Operacional (Fonte: Matlab)

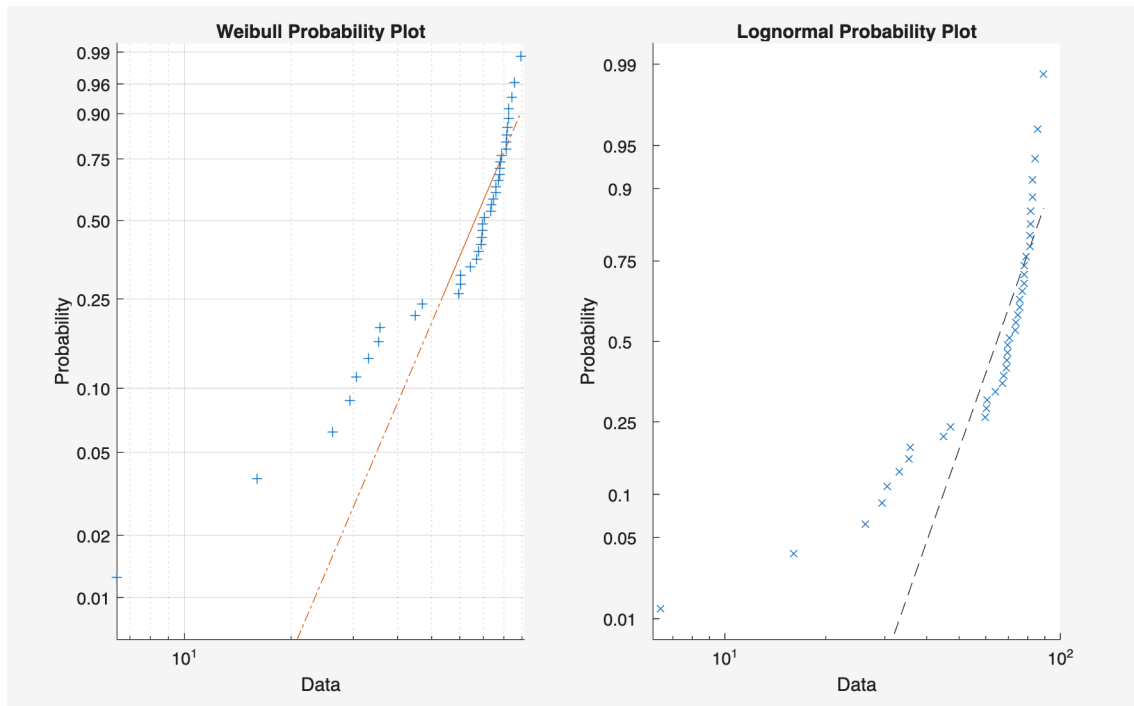


Figura 6.17 Gráficos de Probabilidade para o Ajuste dos Dados de Disponibilidade Operacional (Fonte: Matlab)

Os testes estatísticos, resumidos na Tabela 6-3, confirmaram uma melhor aderência da distribuição de Weibull, que apresentou coeficiente de correlação com o valor de 0,906 superior ao da Lognormal com o valor de 0,800.

Assim, a distribuição de Weibull foi inicialmente considerada a distribuição mais representativa da variabilidade observada nos dados de disponibilidade operacional.

Tabela 6-3 Métricas de qualidade do Ajuste das Distribuições Weibull e Lognormal para os Dados de Disponibilidade Operacional (Fonte: Excel)

	Log-verossimilhança (logL)	Critério de Informação de Akaike (AIC)	Critério de Informação Bayesiano (BIC)	Estatística Teste de Kolmogorov-Smirnov (KS D)	Teste de Kolmogorov-Smirnov (KS p-valor)	Distância KS empírica	Erro Quadrático Médio da CDF (RMSE_CDF)	Estatística de Anderson-Darling (AD)	Coeficiente de determinação (R^2)	Coeficiente de correlação de Pearson (R)
Weibull	-151.6	307.2	310.58	0.12105	0.55998	0.096045	0.047397	1.152	0,82083	0,90599
Log-normal	-169.9	343.81	347.18	0.25938	0.0073177	0.23438	0.13254	4.471	0,63881	0,79926

Contudo, dado que a disponibilidade operacional é uma variável limitada entre 0 e 1, foi realizada uma nova análise utilizando também a distribuição Beta, cuja forma e domínio se ajustam naturalmente a este tipo de indicador.

As Figuras 6.18, 6.19 e 6.20 apresentam os resultados deste novo ajuste, incluindo a função densidade (PDF), a função de distribuição acumulada (CDF) e o gráfico de probabilidade Beta.

Através do coeficiente de correlação ($R=0,8532$) e da análise visual, a distribuição Beta demonstra uma correlação bastante satisfatória entre os valores empíricos e teóricos. No entanto a distribuição Weibull destaca-se com melhor correlação de 0,906 que indica que a Weibull modela os dados com maior fidelidade, mostrando de forma mais eficaz o comportamento observado na amostra.

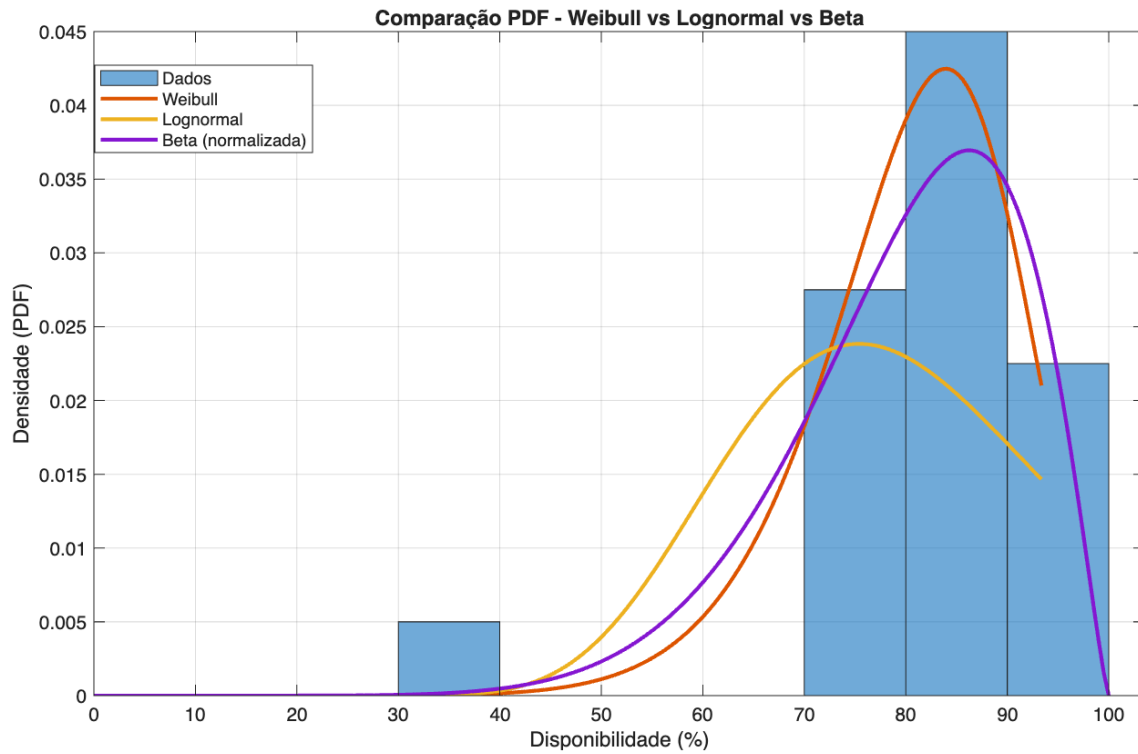


Figura 6.18 Função Densidade de Probabilidade (PDF) Ajustada aos Dados de Disponibilidade Operacional pela Distribuição Beta (Fonte: Matlab)

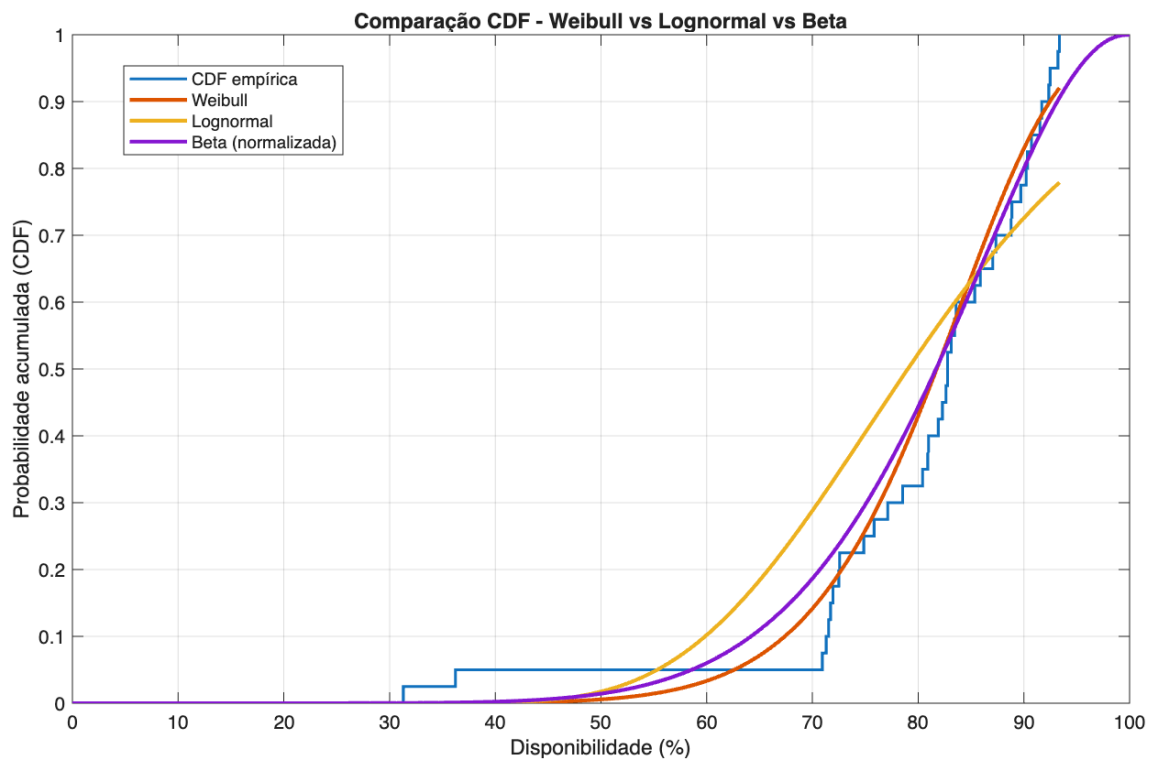


Figura 6.19 Comparação entre a CDF Empírica e as Distribuições Weibull, Lognormal e Beta para o Indicador de Disponibilidade Operacional (Fonte: Matlab)

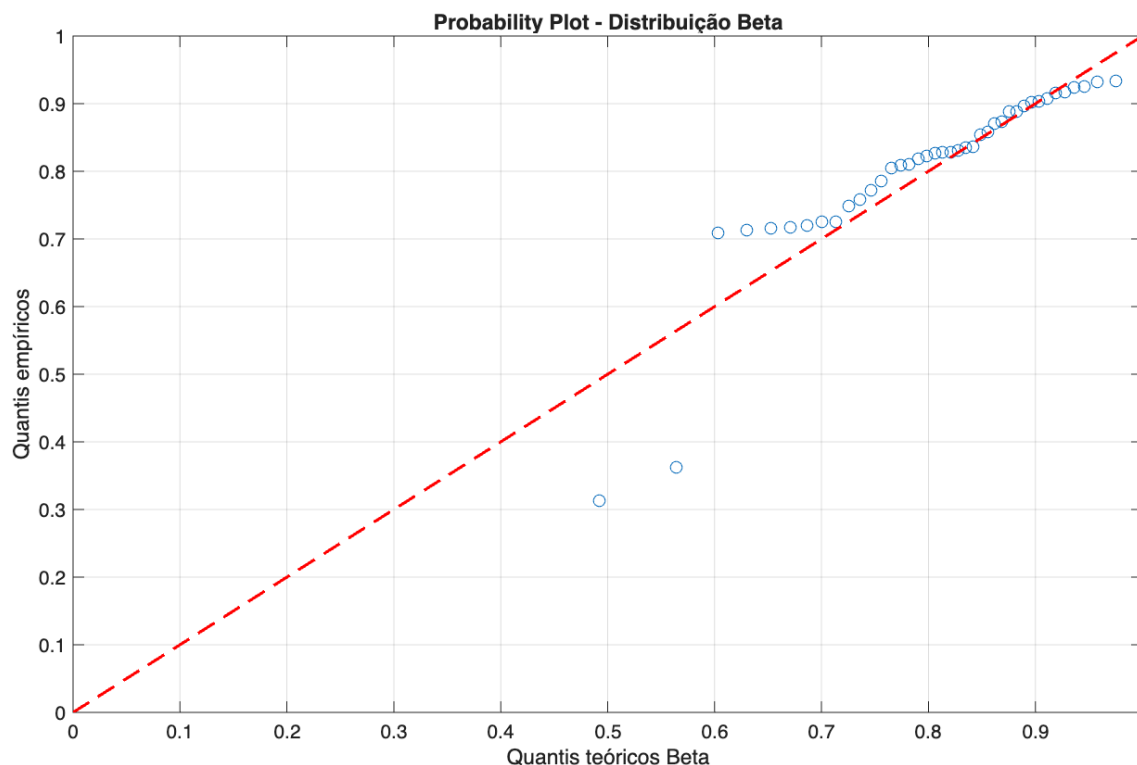


Figura 6.20 Gráficos de Probabilidade para o Ajuste dos Dados Disponibilidade Operacional pela Distribuição Beta (Fonte: Matlab)

A Figura 6.21 apresenta a evolução mensal da disponibilidade operacional e a respetiva média móvel de três meses, evidenciando oscilações associadas a paragens incidentais e circunstanciais, seguidas por fases de recuperação gradual.

A análise mostra uma disponibilidade média mensal de 85%, valor que reflete o impacto de períodos de indisponibilidade pontual. Ao considerar a média móvel de três meses, observa-se uma tendência de estabilização e ligeira melhoria da disponibilidade, demonstrando maior consistência operacional e eficácia crescente das ações de manutenção ao longo do tempo.

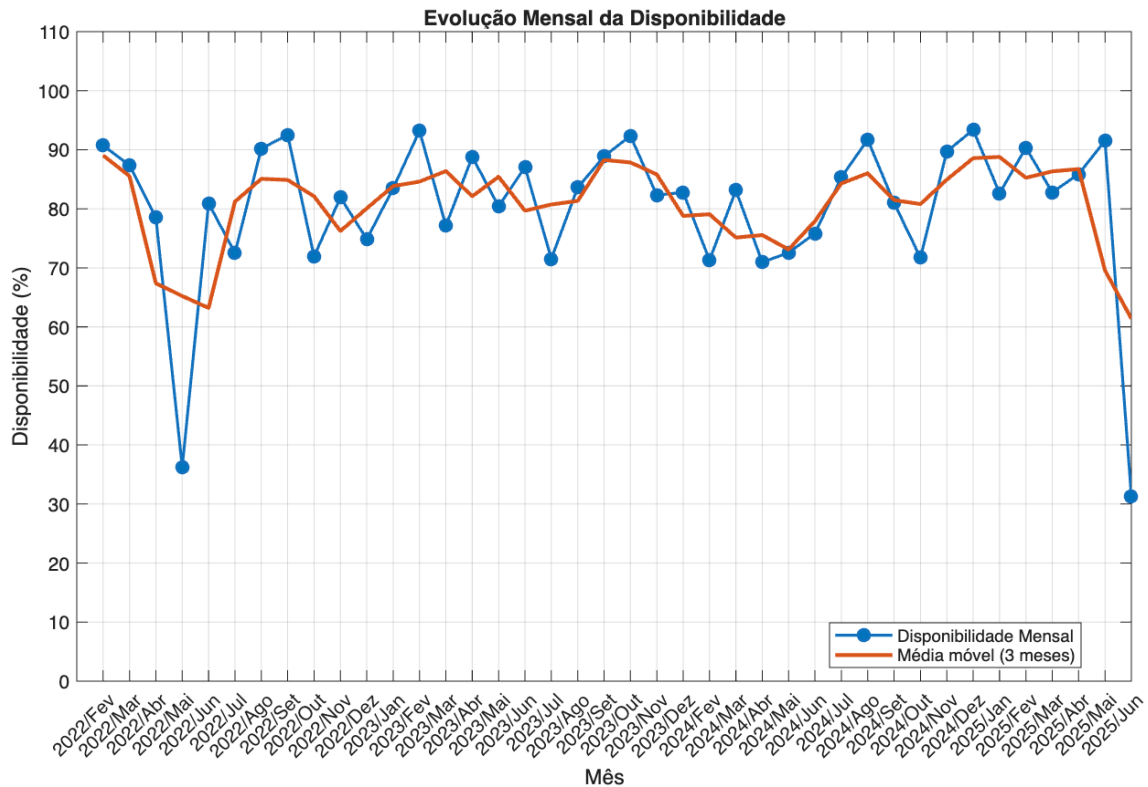


Figura 6.21 Evolução Mensal da Disponibilidade Operacional (Fonte: Matlab)

6.3.4 Disponibilidade Técnica

A disponibilidade técnica representa a probabilidade de um ativo se encontrar funcional num determinado instante, excluindo tempos de paragens circunstanciais.

Na análise foram considerados 40 registos históricos de valores de disponibilidade técnica entre fevereiro de 2022 e junho de 2025. O conjunto de dados apresenta um valor mínimo de 71,77 %, máximo de 99,83%, média de 96,30% e mediana de 98,23%.

Inicialmente foram testados os ajustes das distribuições Weibull e Lognormal aos valores mensais de disponibilidade. As Figuras 6.22, 6.23 e 6.24 apresentam as funções densidade de probabilidade (PDF) e distribuição acumulada (CDF) ajustadas e gráfico de probabilidade com linha de tendência, evidenciando que a distribuição Weibull é a que traduz melhor o comportamento dos dados.

A distribuição de Weibull ajustada aos valores mensais de disponibilidade apresentou parâmetros de escala $\eta = 98,06$ e forma $\beta = 38,37$. O parâmetro de escala representa o valor típico de disponibilidade, este valor indica que a maior parte dos meses analisados apresentou disponibilidades operacionais próximas de 98%, enquanto o parâmetro de forma superior a 1 indica uma menor variabilidade e uma tendência de estabilização do sistema.

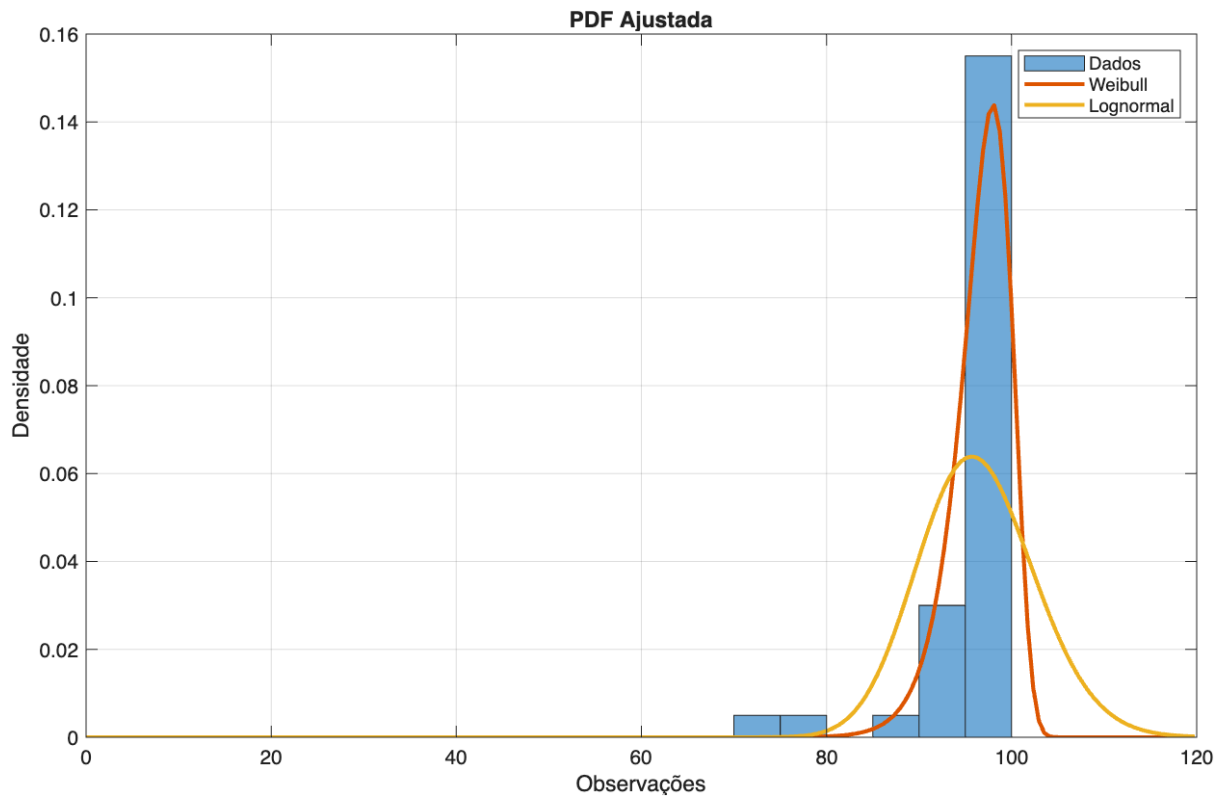


Figura 6.22 Função Densidade de Probabilidade (PDF) Ajustada aos Dados de Disponibilidade Técnica (Fonte: Matlab)

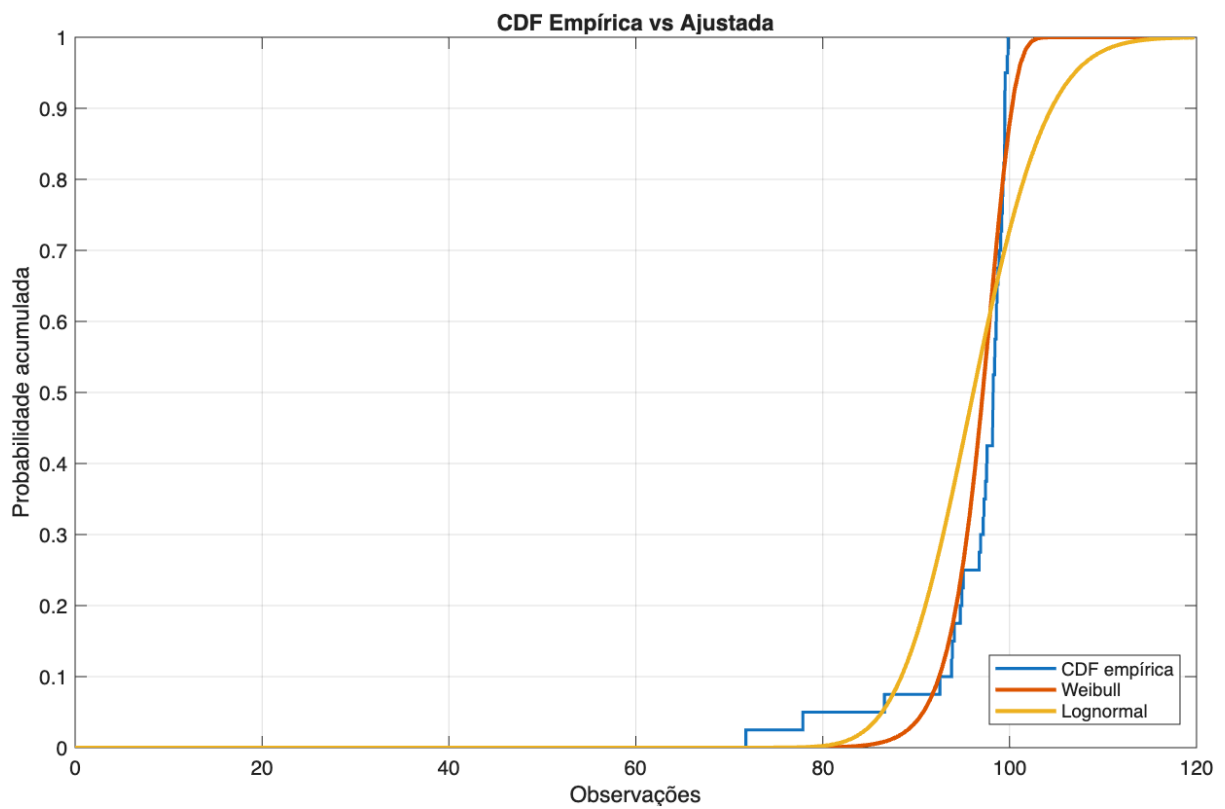


Figura 6.23 Comparação entre a CDF Empírica e as Distribuições de Weibull e Lognormal para o Indicador de Disponibilidade Técnica (Fonte: Matlab)

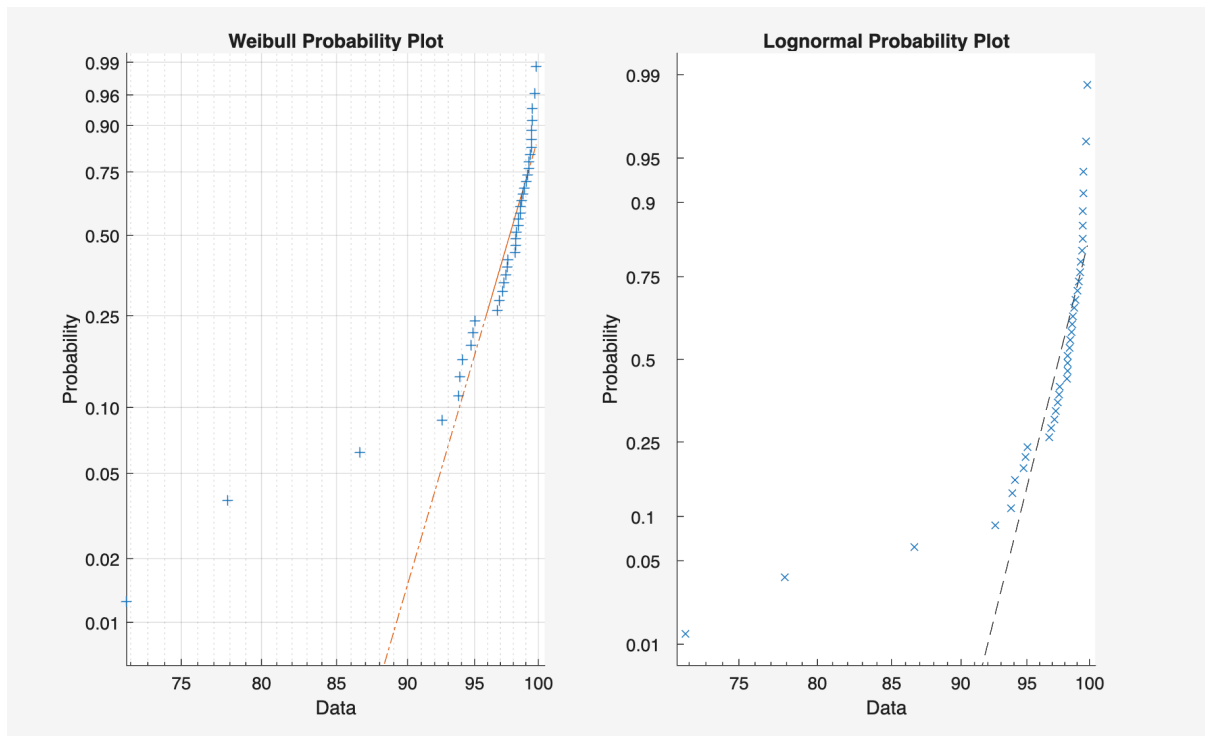


Figura 6.24 Gráficos de Probabilidade para o Ajuste dos Dados de Disponibilidade Técnica (Fonte: Matlab)

Os testes estatísticos, resumidos na Tabela 6-4, confirmaram uma melhor aderência da distribuição de Weibull, que apresentou um coeficiente de correlação de 0,856 superior ao da Lognormal, com o valor de 0,727.

Assim, a distribuição de Weibull foi inicialmente considerada a distribuição mais representativa da variabilidade observada nos dados da disponibilidade.

Tabela 6-4 Métricas de qualidade do ajuste das distribuições Weibull e Lognormal para os dados de Disponibilidade Técnica (Fonte: Excel)

	Log-verossimilhança (logL)	Critério de Informação de Akaike (AIC)	Critério de Informação Bayesiano (BIC)	Estatística Teste de Kolmogorov-Smirnov (KS D)	Teste de Kolmogorov-Smirnov (KS p-valor)	Distância KS empírica	Erro Quadrático Médio da CDF (RMSE_CDF)	Estatística de Anderson-Darling (AD)	Coeficiente de determinação (R^2)	Coeficiente de correlação de Pearson (R)
Weibull	76.702	-149.4	-146.03	0.22303	0.031457	0.19803	0.10512	3.093	0.73262	0.85593
Log-normal	54.6	-105.2	-101.82	0.2898	0.0018082	0.27999	0.16774	6.2815	0.52891	0.72726

Como já referido, dado que a disponibilidade é uma variável limitada entre 0 e 1, foi realizada uma nova análise utilizando também a distribuição Beta, cuja forma e domínio se ajustam naturalmente a este tipo de indicador.

As Figuras 6.25, 6.26 e 6.27 apresentam os resultados deste novo ajuste, incluindo a função densidade (PDF), a função de distribuição acumulada (CDF) e o gráfico de probabilidade Beta.

Com base no coeficiente de correlação obtido ($R = 0,9301$) e na avaliação visual dos ajustes, a distribuição Beta apresenta a melhor correspondência entre os valores empíricos e os valores teóricos. Entre as distribuições analisadas, esta é a que

apresenta a maior correlação, evidenciando um ajuste mais fiel ao comportamento observado na amostra e representando de forma mais eficaz os dados.

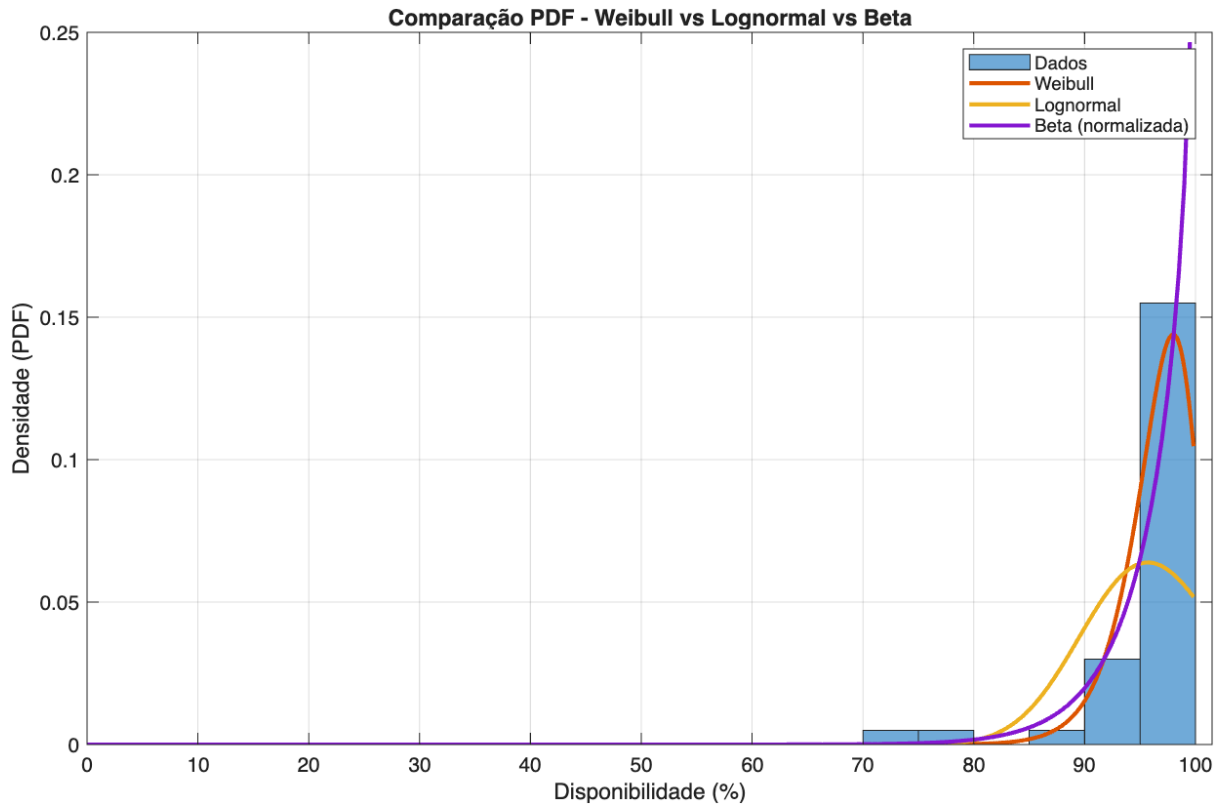


Figura 6.25 Função Densidade de Probabilidade (PDF) Ajustada aos Dados de Disponibilidade Técnica pela Distribuição Beta (Fonte: Matlab)

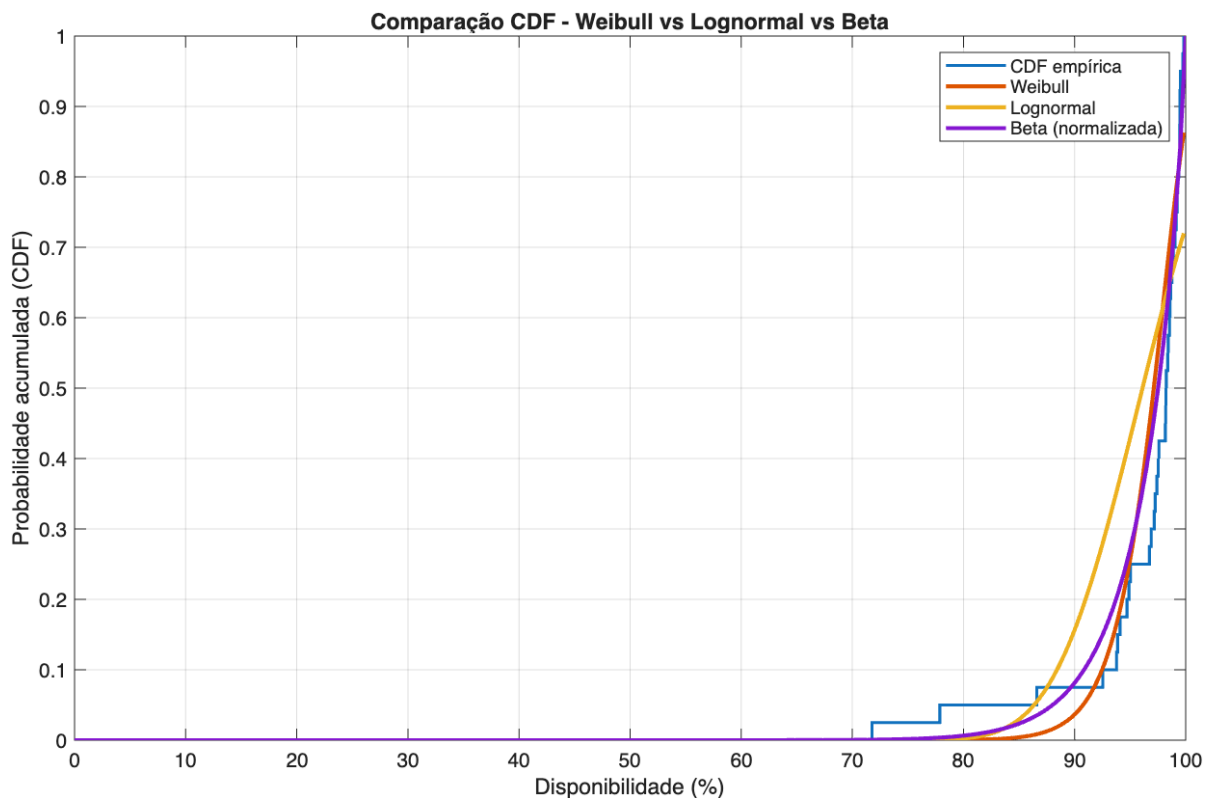


Figura 6.26 Comparação entre a CDF Empírica e as Distribuições Weibull, Lognormal e Beta para o Indicador de Disponibilidade Técnica (Fonte: Matlab)

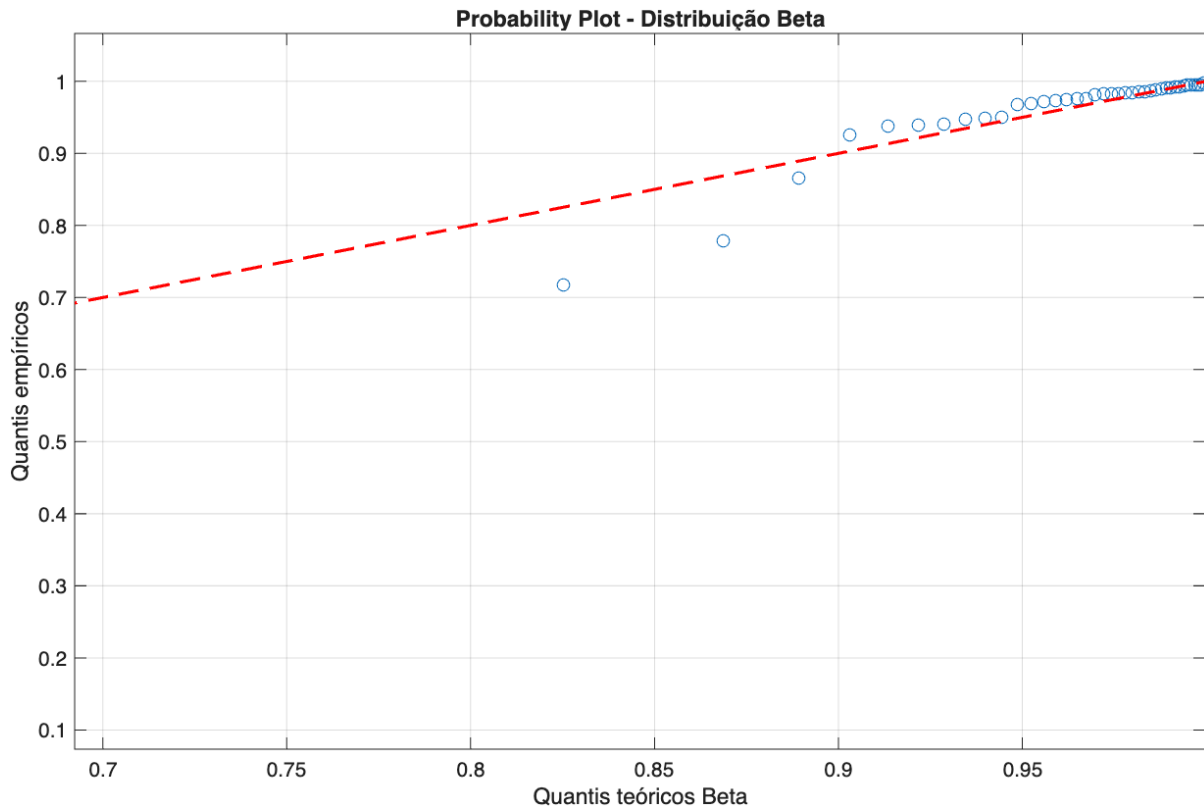


Figura 6.27 Gráficos de Probabilidade para o Ajuste dos Dados Disponibilidade Técnica pela Distribuição Beta (Fonte: Matlab)

A Figura 6.28 apresenta a evolução mensal da disponibilidade técnica e a respetiva média móvel de três meses, evidenciando oscilações associadas a paragens incidentais, como, por exemplo, os meses de maio de 2022, dezembro 2022 e julho de 2023, nos quais ocorreram paragens incidentais que exigiram tempos de resolução superiores ao habitual.

A análise mostra uma disponibilidade técnica média mensal de 98%, valor que reflete o impacto de períodos de indisponibilidade pontual. Ao considerar a média móvel de três meses, observa-se uma tendência de estabilização, demonstrando maior consistência operacional e eficácia crescente das ações de manutenção ao longo do tempo.

Gestão da Manutenção dos Ativos Físicos na CIMPOR

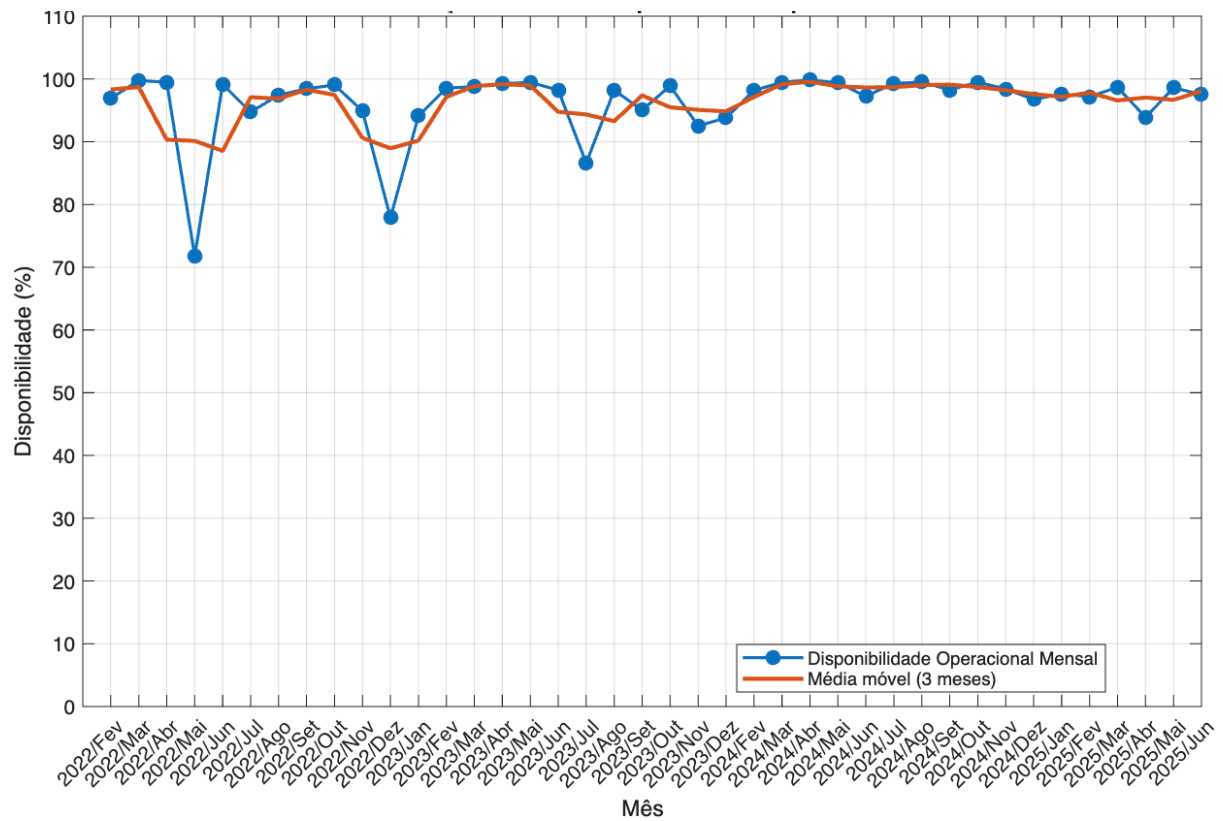


Figura 6.28 Evolução Mensal da Disponibilidade Técnica (Fonte: Matlab)

7 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1 Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas ao longo do estágio realizado na Cimpor Global Holdings, no âmbito do Mestrado em Engenharia e Gestão de Ativos Físicos, com base nas atividades desenvolvidas e nos objetivos inicialmente propostos.

Durante o decorrer do estágio, houve a oportunidade de colaborar ativamente na análise das causas-raiz de falhas ocorridas, aplicando metodologias de base científica e promovendo ações de melhoria contínua.

O autor colaborou ativamente na melhoria do desempenho da equipa de fiabilidade, contribuindo para o desenvolvimento do ficheiro de análise dos 5 Porquês e prestando suporte aos centros de produção na implementação dessa ferramenta e da respetiva metodologia nas reuniões de fiabilidade, promovendo a melhoria contínua e a padronização do processo de análise das causas-raiz de falhas.

O estágio proporcionou igualmente contacto direto com ferramentas digitais avançadas, demonstrando o potencial da transformação digital e da Indústria 4.0 na manutenção industrial.

Esta aposta na integração tecnológica reforçou o compromisso da organização em melhorar a capacidade de antecipar falhas, otimizar recursos e aumentar a fiabilidade e disponibilidade dos ativos.

Na vertente técnico-científica, as análises desenvolvidas nos capítulos 5 e 6 foram determinantes para a consolidação dos resultados.

No caso de estudo do Moinho do Cru, a análise FMECA (Failure Mode and Effects and Criticality Analysis) identificou o nível de óleo baixo nas galgas, como o modo de falha mais crítico, resultante de fugas no sistema de lubrificação e desgaste prematuro de vedantes. Este resultado foi confirmado através do Diagrama de Ishikawa e da Árvore de Falhas (FTA), demonstrando a coerência entre as metodologias aplicadas.

Com base nestas conclusões foram sugeridas ações preventivas, a melhoria dos planos de inspeção, a melhoria na classificação de falhas no sistema de informação, e o reforço da formação técnica das equipas de manutenção.

A análise de fiabilidade, recorrendo às distribuições de Weibull, Lognormal e Beta, complementou o diagnóstico de fiabilidade do moinho de cru, permitindo quantificar o comportamento do ativo. Os resultados obtidos evidenciaram um MTBF (Mean Time Between Failures) médio de 166,81 horas, um MTTR (Mean Time To Repair) médio de 4,74 horas.

De forma complementar foi ainda realizada a análise da disponibilidade técnica do ativo. A disponibilidade técnica mede a proporção do tempo de produção planeado durante o qual o equipamento está disponível para operar, excluindo as paragens circunstanciais e paragens programadas, para permitir evidenciar o impacto direto das paragens incidentais no seu desempenho.

A análise dos parâmetros da distribuição de Weibull, nomeadamente o parâmetro de escala (η) e o parâmetro forma (β), permitiu compreender de forma aprofundada o posicionamento do ativo no seu ciclo de vida.

O valor obtido de $\beta = 1,497$, superior a 1, demonstra que o equipamento se encontra numa fase clara de desgaste progressivo, característica da terceira etapa do ciclo de vida de um ativo. Na literatura de fiabilidade, o parâmetro β é amplamente reconhecido como o parâmetro que melhor caracteriza o regime de falhas do ativo:

- Quando $\beta < 1$, predominam falhas infantis associadas a problemas de conceção, montagem ou arranque.
- Quando $\beta = 1$, a taxa de falhas é constante ao longo do tempo, típica da vida útil estável.
- Quando $\beta > 1$, significa que o ativo está sujeito a um incremento acelerado da taxa de falhas, associado a fenómenos de fadiga, desgaste mecânico, degradação de materiais e deterioração das condições de operação.

Por sua vez, o parâmetro $\eta = 181,5$ horas, denominado tempo característico, constitui uma referência temporal essencial do ciclo de vida do ativo. Este valor corresponde, por definição, ao ponto em que a probabilidade acumulada de falha atinge 63,2%, segundo a distribuição de Weibull.

Com um parâmetro de forma (β) de 1,497 e um parâmetro de escala (η) de 181,5 horas, conclui-se que a taxa de falhas do Moinho do Cru aumenta ao longo do tempo, característico de uma ocorrência de falhas por envelhecimento do ativo. Por outro lado, aproximadamente 63,2% dos Moinhos de Cru semelhantes terão falhado antes das 181,5 horas de operação.

No contexto da gestão da manutenção dos ativos físicos, η representa o nível de desgaste do ativo, indicando o intervalo típico em que as falhas se tornam mais prováveis e que serve de base ao planeamento da manutenção, pois define o horizonte temporal em que as ações preventivas, designadamente na vertente de condição, devem ocorrer para evitar a entrada num regime de falhas aceleradas.

Assim, enquanto β identifica a fase do ciclo de vida do ativo, η indica o *timing* operacional no qual essa fase tem impacto direto na disponibilidade, em termos práticos, uma redução em η significa que o equipamento tende a falhar com maior frequência, resultando em menor disponibilidade operacional, enquanto um aumento do η indica que as falhas ocorrerão em intervalos mais longos, contribuindo para uma maior disponibilidade.

A combinação destes dois parâmetros evidencia que o moinho já apresenta sinais consistentes de desgaste progressivo, sugerindo uma maior propensão para a ocorrência de avarias, reforçando a necessidade de melhorar as estratégias de manutenção planeada, designadamente de condição e/ou preditivas.

É nesta altura da vida de um ativo que se torna particularmente relevante fazer a análise do ciclo de vida do investimento para que seja possível determinar quando deve ser feita uma intervenção de manutenção de nível 5 ou retirar o ativo de funcionamento e proceder à sua substituição. Ao longo do estágio, o autor desenvolveu competências técnicas, analíticas e interpessoais fundamentais para enfrentar desafios com esta complexidade, em contexto industrial.

Esta experiência resultou numa aprendizagem enriquecedora, complementando os conhecimentos teóricos adquiridos no mestrado e contribuindo significativamente para a formação profissional na área da gestão de manutenção dos ativos físicos.

Em síntese, o presente trabalho demonstrou a importância da gestão da manutenção dos ativos físicos como elemento central para a eficiência, segurança e sustentabilidade da indústria cimenteira.

A aplicação de metodologias, como a FMECA, a análise de fiabilidade e a utilização de ferramentas digitais provou que é possível evoluir de uma manutenção reativa para uma manutenção preditiva sustentada em dados.

Em síntese, esta experiência na Cimpor revelou-se extremamente enriquecedora, permitindo aplicar conhecimentos teóricos em contexto real, e compreender a complexidade da gestão da manutenção dos ativos físicos numa grande organização industrial.

7.2 Propostas para Desenvolvimentos Futuros

A expansão da manutenção preditiva constitui um passo essencial para o aumento da fiabilidade e da disponibilidade dos ativos críticos da Cimpor. Através do reforço da instrumentação com sensores IoT (Internet of Things), da recolha contínua de dados de operação e da utilização de plataformas analíticas baseadas em inteligência artificial, será possível detetar padrões anómalos e prever falhas com maior antecedência. Esta abordagem permitirá otimizar os planos de manutenção, reduzir paragens não planeadas e maximizar o ciclo de vida dos equipamentos.

Em paralelo, o reforço da cultura de fiabilidade deverá assentar na formação técnica das equipas de manutenção e na divulgação de boas práticas entre os diferentes centros de produção. A formação contínua, aliada à partilha de casos de estudo e à valorização da análise de dados, fomentará uma atuação mais proactiva e colaborativa, orientada para a melhoria contínua.

Adicionalmente, é fundamental reforçar a importância de uma melhor classificação das paragens e falhas, garantindo a qualidade e consistência dos dados registados.

Gestão da Manutenção dos Ativos Físicos na CIMPOR

Uma classificação rigorosa permitirá reforçar a robustez das análises estatísticas, identificar com precisão as causas de indisponibilidade dos equipamentos e suportar decisões de manutenção mais informadas e eficazes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bennett, M., McDermott, R., & Beauregard, M. (2017). The basics of FMEA. In Productivity Press eBooks. <https://doi.org/10.1201/b16656>
- Billinton, R., & Allan, R. N. (1992). Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and techniques (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0685-4>
- Choudhary, D., Tripathi, M., & Shankar, R. (2019). Reliability, Availability and Maintainability Analysis of a Cement Plant: a Case Study. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 36(3), 298–313. <https://doi.org/10.1108/ijqrm-10-2017-0215>
- Elmahdy, E. E. (2017). Modelling Reliability Data with Finite Weibull or Lognormal Mixture Distributions. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 11(4), 1081–1089. <https://doi.org/10.18576/amis/110414>
- Ericson, C. A. (2011). Fault Tree Analysis Primer. ISBN-10: 1466446102 e ISBN-13: 9781466446106
- Farinha, J. M. T. (2011). Maintenance - A Terologia e as Novas Ferramentas de Gestão. Lisbon: 1st Edition, Monitor - Projecto e Edições, Lda. ISBN 9789729413827.
- Farinha, J. M. T. (2018). Asset Maintenance Engineering Methodologies. In CRC Press eBooks. <https://doi.org/10.1201/9781315232867>
- Fernades A. M. P.(2022). Implementação de Metodologia Lean na Gestão da Manutenção. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa. https://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/17556/1/AndreFernandes_44045_MEGI.pdf, acedido a 2025/6/10
- Gotor, T., & Labib, A. W. (2025b). A Hybrid Model for Designers to Learn from Failures: A Case of a High Potential Fire Incident at an Underground Hard Rock Mine. *Applied Sciences*, 15(8), 4577. <https://doi.org/10.3390/app15084577>
- Guo, Y., Gao, H., Cai, Z., Zhang, S., & Hu, F. (2018). Continuous Improvement of Industrial Engineering Education Based on PDCA Method and Structural Importance. 2021 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 311–315. <https://doi.org/10.1109/ieem.2018.8607498>
- IEC 60812:2018 - Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA) (3rd ed.). International Electrotechnical Commission. www.iec.ch.
- IEC 61078:2016 – Reliability block diagrams. International Electrotechnical Commission. www.iec.ch.
- IEC 61025:2006 – Fault tree analysis (FTA). International Electrotechnical Commission. www.iec.ch.
- Lynch, A. J., & Rowland, C. A. (2005). The History of Grinding. ISBN, 0873352386, 9780873352383. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BB17444815>
- Nguyen, V., Nguyen, N., Schumacher, B., & Tran, T. (2020). Practical Application of Plan–Do–Check–Act Cycle for Quality Improvement of Sustainable Packaging: a Case Study. *Applied Sciences*, 10(18), 6332. <https://doi.org/10.3390/app10186332>
- NP EN 197-1:2012: Cimento — Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. Instituto Português da Qualidade .www.ipq.pt
- NP EN 15341:2009 - Manutenção: Indicadores de Desempenho da Manutenção (KPI). Instituto Português da Qualidade. www.ipq.pt
- NP EN ISO 9001:2015 - Sistemas de Gestão da Qualidade: Requisitos. Instituto Português da Qualidade .www.ipq.pt
- NP EN 13306:2021 - Manutenção: Terminologia de Manutenção. Instituto Português da Qualidade. www.ipq.pt

- Ohno Taiichi. (1988). *Toyota Production System: Beyond Large-scale Production*. Productivity press. ISBN 0915299143, 9780915299140
- Paterson, J. C. (2023). *Beyond the Five Whys: Root Cause Analysis and Systems Thinking*. John Wiley & Sons. ISBN-10: 1394191057 e ISBN-13: 978-1394191055
- Perry, W., & Mehlretter, N. (2018). Applying Root Cause Analysis to Compressed Air: How to Solve Common Compressed Air System Problems with the 5-Whys. *Energy Engineering*, 115(4), 56–62. <https://doi.org/10.1080/01998595.2018.12016673>
- Pietrzak, M., & Paliszkiwicz, J. (2015). Framework of Strategic Learning: the PDCA Cycle. *Management Science*, 10(2), 149–161. <https://EconPapers.repec.org/RePEc:mgt:yournmg:v:10:y:2015:i:2:p:149-161>
- Pinto, J. P. (2009). *Pensamento Lean: A Filosofia das Organizações Vencedoras*. Lisboa: Lidel. ISBN: 9789897520327
- Qasaimeh, A., & Kosiba, E. (2025). Reliability Modeling using Weibull Analysis and AI Based on Field Returns. *Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/rams48127.2025.10935240>
- Raposo H.; Farinha J.T.; Ferreira L.; Galar D. (2017). An Integrated Econometric Model for Bus Replacement and Determination of Reserve Fleet Size Based on Predictive Maintenance. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 19(3), pp. 358–368, <https://doi.org/10.17531/ein.2017.3.6>.
- Raposo, H., Farinha, J. T., Fonseca, I., & Galar, D. (2019). Predicting Condition Based on Oil Analysis – A Case Study. *Tribology International*, 135, 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.041>
- Raposo, Hugo David Nogueira; Farinha, José Manuel Torres; Inácio Fonseca; Luís Andrade Ferreira, (2019). Predictive Maintenance Based on Condition of Oil Engines in Urban Buses – A Case Study. *Actuators*, 8(1), pp. 1-14; <https://doi.org/10.3390/act8010014>.
- Silva, F. J. P. da. (2021). *Estudo da Condição dos Veículos de Combate a Incêndios Florestais*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra.
- Silva, F., Raposo, J., Farinha, J. T., Raposo, H., & Reis, L. (2023). Study of the Condition of Forest Fire Fighting Vehicles. *Fire*, 6(7), 274. <https://doi.org/10.3390/fire6070274>
- Matos, J. S. (2008). *Estudo do Impacto da Implementação da TPM numa Fábrica de Componentes para Automóveis*. Tese de Mestrado. Manutenção industrial. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58167/1/000129334.pdf>
- Sobral, J., & Abreu, A. (2013). *Manutenção Produtiva Total. Manutenção Produtiva Total e Gestão Lean*.
- Soltanali, H., Khojastehpour, M., Farinha, J. T., & De Almeida E Pais, J. E. (2021). An Integrated Fuzzy Fault Tree Model with Bayesian Network-Based Maintenance Optimization of Complex Equipment in Automotive Manufacturing. *Energies*, 14(22), 7758. <https://doi.org/10.3390/en14227758>
- Souris, J.-P., & Batista, E. (1992). *Manutenção Industrial: Custo ou Benefício*. Lidel. ISBN: 9789729018251
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis*. Quality Press. ISBN 0873895983, 9780873895989
- Sustentabilidade - Cimpor. (2025). Retrieved January 17, 2025, from <https://www.cimpor.com/sustentabilidade>
- Ruhi, S. (2015). Application of Mixture Models for Analyzing Reliability Data: a Case Study. *OALib*, 02(09), 1–8. <https://doi.org/10.4236/oalib.1101815>
- Teoh, P., & Case, K. (2004). Failure Modes and Effects Analysis Through Knowledge Modelling. *Journal of Materials Processing Technology*, 153–154, 253–260. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.298>

- Trancho, J. C. M. (2022). *Gestão de Equipamentos e Implementação da Qualidade na Justa Prioridade Lda*. Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial Coimbra, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.
<https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/44716/1/Jose-Carlos-Marques-Melo%20Trancho.pdf> acedido a 2025/06/15.
- Varde, A. S., Liang, J., Yang, Z., & Sisson, R. D. (2022). Ishikawa, JESS, and Visual Analytics for Engineering. 2021 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), 6824–6826.
<https://doi.org/10.1109/bigdata55660.2022.10020637>
- Vitor M. Pinto. (1994). *Gestão da Manutenção*. Lisboa: IAPMEI. ISBN 9729205574
- Xiaolun, W., & Zhang, X. (2020). Research on Elevator Braking Failure Assessment Model Based on Fishbone Diagram and AHP. 2020 International Conference on Artificial Intelligence and Computer Engineering (ICAICE), 260–263.
<https://doi.org/10.1109/icaice51518.2020.00056>
- Zio, E. (2007). An Introduction to the Basics of Reliability and Risk Analysis. In *Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics*.
<https://doi.org/10.1142/9789812707413>
- Cimpor. (2021). Relatório de integrado 2021. Retrieved October 25, 2025, from https://www.cimpor.com/documents/20124/479907/CIMPOR_Relat%C3%B3rio_Integrado_2021_PT.pdf
- Cimpor. (2024). Relatório de integrado 2024. Retrieved October 25, 2025, from https://www.cimpor.com/documents/20124/1236544/RelatorioSustentabilidade_CIMPOR_ABPC_20251006_compressed.pdf/24081004-8069-7045-751a-f01fdb88eeefb?t=1759833587723
- Cimpor Global Holdings B.V. (2025). Retrieved October 25, 2025, from <https://cimporglobal.com/content/14/about-us>

8 ANEXOS

Anexo I: Ferramenta para aplicação da análise dos 5 Porquês

 CIMPOR	RCA - 5 Porquês	CoE-ME-AM-002
ASSET MANAGEMENT RELIABILITY & ROOT CAUSE ANALYSIS RCA 5 Porquês CoE-ME-AM-002		

Instruções

CoE-ME-AM-002

Instruções para extração do ficheiro do STOP
Para extrair o ficheiro excel da paragem a ser analisada deve-se seguir os seguintes passos:

1º Pesquisar e abrir a avaria para análise.

2º Guardar ficheiro em formato excel

Ponto 1: Clicar em "Visualizar"
Ponto 2: Clicar em "Exportar Excel..." para guardar o ficheiro excel da paragem
Ponto 3: Guardar o ficheiro na pasta da análise

Instruções para preenchimento da página "DADOS"
A primeira etapa do preenchimento do documento de análise da causa raiz consiste em completar a primeira página, intitulada "Dados". Nesta página, deverá ser registada toda a informação necessária para a realização da análise.

Para preencher automaticamente os campos de "Dados de falha", clique em "CARREGAR FICHEIRO", seleccione o arquivo extraído do STOP e os dados serão preenchidos de forma automática.

A lista de participantes deve ser preenchida de acordo com as pessoas presentes na reunião de análise de avarias.

Após o preenchimento da tabela acima, é imprescindível proceder à documentação das evidências relacionadas com a falha.

Estas evidências devem ser apresentadas sob a forma de imagens, gráficos, documentos ou outros ficheiros que possam apoiar e ilustrar de forma clara a falha ocorrida, como ilustrado na imagem abaixo.

Ao aceder à página de análise dos 5 Porquês, os parâmetros correspondentes a "Dados de Falha" e "Descrição de Falha" serão preenchidos automaticamente com as informações previamente inseridas na tabela da página anterior.

Para iniciar a análise, o primeiro passo é clicar no botão **"INICIAR ANÁLISE"**, identificado a vermelho na imagem abaixo.

[illegible]

Análise 5 Porquês

Problema: Falha no funcionamento do equipamento de medição de temperatura

Causa 1: Falta de manutenção preventiva

Causa 2: Equipamento com defeito

Causa 3: Medição incorreta

Causa 4: Temperatura incorreta

Causa 5: Falha no funcionamento do equipamento

Causa Raiz: Falta de manutenção preventiva

Ações Corretivas:

- Realizar a manutenção preventiva do equipamento.
- Verificar o funcionamento do equipamento.
- Realizar a calibração do equipamento.

É necessário preencher os campos da nova linha de forma sequencial para garantir que o modelo funcione corretamente. O processo começa com a formulação de uma pergunta inicial, que deve ser seguida pela resposta correspondente.

Análise 5 Porquês

Problema: Falha no controle de temperatura do sistema de refrigeração do modelo C00001 - Mito do peso. Numa operação de 10 minutos a temperatura passou de 10°C para 16°C.

Porquê 1: Falha no controle de temperatura do sistema de refrigeração do modelo C00001 - Mito do peso.

Porquê 2: Falha no controle de temperatura do sistema de refrigeração do modelo C00001 - Mito do peso.

Porquê 3: Falha no controle de temperatura do sistema de refrigeração do modelo C00001 - Mito do peso.

Porquê 4: Falha no controle de temperatura do sistema de refrigeração do modelo C00001 - Mito do peso.

Porquê 5: Falha no controle de temperatura do sistema de refrigeração do modelo C00001 - Mito do peso.

Causa Raiz: Falha no controle de temperatura do sistema de refrigeração do modelo C00001 - Mito do peso.

[illegible][illegible]

	precisa?		2
Porque o estoque de lubrificantes não interfere para uma parte de óleo necessária	Porque os planos de lubrificação incluem um erro nas quantidades de óleo dos chumaceros		Porque os planos de lubrificação incluem um erro nas quantidades de óleo dos chumaceros

3º Botão de apagar linhas

Em caso de erro ou necessidade de modificação na análise, é possível apagar toda a análise ou apenas linhas específicas; para apagar apenas uma linha, selecione a linha desejada e clique em "Apagar Linha", conforme ilustrado no exemplo abaixo.

[illegible][illegible]

Instruções para preenchimento da página "Ações"

Na página "Ações", é desenvolvido o plano de ação, onde são descritas as ações necessárias para cada causa do problema identificado. O funcionamento desta página é semelhante ao da página anterior. O processo começa com a inserção da linha correspondente à causa. Em seguida, deve-se elaborar o plano de ação para cada causa individualmente, garantindo que as ações sejam inseridas uma a uma. Esse método assegura que todas as causas sejam tratadas de forma organizada e eficiente.

Os parâmetros correspondentes a "Dados de Falha" e "Descrição de Falha" serão preenchidos automaticamente com as informações previamente inseridas na tabela da página "Dados".

1º Inserir causas automaticamente:

[illegible]

Ao clicar no botão **"INSERIR CAUSA"**, será gerada automaticamente as linhas para plano de ação para cada causa raíz encontrada na página "Análise 5 Porquês" (como mostra a imagem abaixo) que será preenchida com a causa identificada, o usuário apenas terá que escrever as ações que serão implementadas para sua eliminação. Certifique-se de descrever cada ação de forma clara e detalhada, garantindo que o plano de ação seja objetivo e eficaz.

[illegible]

3º Botão de apagar linhas

Em caso de erro ou necessidade de modificação No plano de ação, é possível apagar toda a análise ou apenas linhas específicas; para apagar apenas uma linha, selecione a linha desejada e clique em "Apagar Linha", conforme ilustrado no exemplo abaixo.

[illegible]

[illegible][illegible]

CIN.POR		Análise 5 Porquês								CoE-ME-AM-002
Dados da Falha:	Fábrica:	Equipamento:	Item:	Parte Equipamento:	Motivo:	Data Paragem:	Hora Paragem:	Tempo Paragem:	Hora Paragem:	
Descrição da Falha:										
INICIAR ANÁLISE		+ RESPOSTA		APAGAR LINHA		APAGAR TUDO				
	1P	2P	3P	4P	5P	6P	Causa Raiz			
Pergunta								1		
Resposta										

CIN.POR		Plano de Ações								CoE-ME-AM-002
Dados da Falha:	Fábrica:	Equipamento:	Item:	Parte Equipamento:	Motivo:	Data Paragem:	Hora Paragem:	Tempo Paragem:	Subtipo Paragem:	
Descrição da Falha:										
INSERIR CAUSAS		APAGAR LINHA		APAGAR TUDO						
Causa Raiz 1	Ação 1	Ação 2	Ação 3							

Anexo II: PowerPoint para apresentação e formação sobre a análise dos 5 Porquês



Maintenance Excellence Team Análise dos 5 Porquês

 CENTER of EXCELLENCE - Maintenance Excellence



Index:

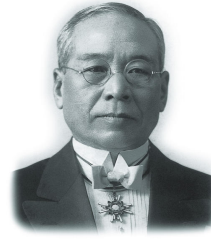
- 1 Origem do método dos 5 Porquês
- 2 O que é o método dos 5 Porquês
- 3 Quando usar o método dos 5 Porquês
- 4 Aplicação do método dos 5 porquês
- 5 Regras
- 6 Críticas ao método
- 7 Exemplo prático de aplicação do método

 CIMPOR | CENTER of EXCELLENCE - Maintenance Excellence |



1 Origem do método dos 5 Porquês

- A técnica dos 5 Porquês é uma metodologia simples e poderosa para identificar as causas-raiz de um problema.
- Criada na década de 1930 por Sakichi Toyoda, fundador das Indústrias Toyota.
- Sakichi Toyoda foi pioneiro na implementação de filosofias de melhoria contínua e resolução de problemas, que mais tarde seriam a base de ferramentas como a metodologia dos 5 Porquês, ele acreditava em capacitar os trabalhadores para questionarem e resolverem os problemas, o que se tornou um elemento central da cultura Toyota.
- No entanto, foi Taiichi Ohno, engenheiro da Toyota, que nos anos 1950 e 1960 sistematizou a técnica e a transformou numa ferramenta crucial para a resolução de problemas e melhoria contínua na Toyota.



Sakichi Toyoda



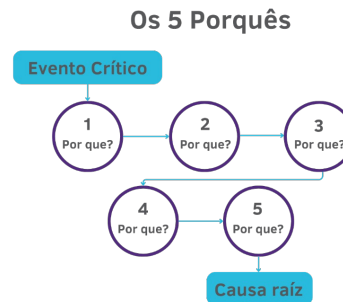
Taiichi Ohno

CIMPOR | CENTER of EXCELLENCE - Maintenance Excellence |



2 O que é o método dos 5 Porquês

- O método dos 5 Porquês é uma técnica usada para explorar a causa e efeito subjacentes de um problema específico.
- O objetivo desta técnica é identificar a causa raiz de um problema que está a ocorrer, utilizando repetidamente a pergunta “Porquê?”, onde cada resposta serve como base para a próxima pergunta.
- O número de 5 porquês é meramente indicativo, podendo ser necessário mais ou até menos de 5 porquês para chegar à causa raiz, tudo depende da complexidade do caso.
- O método dos 5 Porquês não define regras rígidas nem o tempo necessário para chegar à causa raiz, por isso, mesmo que o método seja seguido corretamente, o resultado final dependerá do conhecimento, da experiência e da capacidade de análise da equipa que o aplica.



CIMPOR | CENTER of EXCELLENCE - Maintenance Excellence |



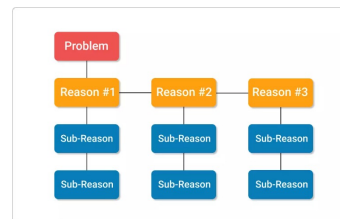
3 Quando usar o método dos 5 Porquês

- O método dos 5 porquês ajuda a alcançar a melhoria contínua em qualquer nível da organização, este método é bastante utilizado para resolver problemas simples. No entanto pode não ser a abordagem ideal para questões mais complexas, onde existem múltiplas causas.
- Em problemas complexos ou com múltiplas causas, o método dos 5 Porquês pode ser adaptado ou conjugado com outras técnicas para investigar múltiplas causas raiz como por exemplo o diagrama de ishikawa.

Diagrama de ishikawa



Modelo 5 Porquês adaptado a múltiplas causas



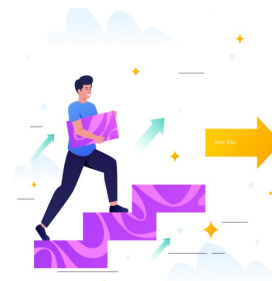
CIMPOR | CENTER of EXCELLENCE - Maintenance Excellence |



4 Aplicação do método dos 5 Porquês

Passos a seguir para a implementação do método

1. Reunir uma equipa
2. Definir o Problema
3. Perguntar Porquê?
4. Continuar a perguntar Porquê?
5. Saber quando parar
6. Abordar a causa raiz
7. Monitorizar as medidas implementadas



CIMPOR | CENTER of EXCELLENCE - Maintenance Excellence |



4 Aplicação do método dos 5 Porquês

Passo 1: Reunir uma equipa

A análise dos 5 Porquês não deve ser realizada individualmente, mas sim em equipa

A equipa deve ser composta por pessoas de vários departamentos

Cada pessoa deve estar familiarizado com o assunto que vai ser analisado

Ao reunir uma equipa obterá vários pontos de vista sobre o assunto, o que é importante para recolher informação suficiente para ser tomada uma decisão mais informada



4 Aplicação do método dos 5 Porquês

Passo 2: Definir o problema

Discutir o problema em equipa para que em conjunto seja definido o problema a ser tratado. Isto ajudará a perceber melhor a amplitude do problema

Isto é importante porque permite investigar um problema de larga abrangência

A equipa deve manter o foco para conseguir identificar com precisão o problema que está a ocorrer, permitindo assim encontrar uma solução eficaz



4 Aplicação do método dos 5 Porquês

Passo 3: Perguntar Porquê?

Neste passo a equipa deve começar a perguntar o porquê que o problema está a acontecer. É importante que as perguntas abordem problemas concretos

Perguntar porquê parece uma tarefa simples mas é necessário um pensamento crítico.

As respostas devem ser baseadas em registos de ocorrências documentadas e não em suposições sobre o que poderia ter acontecido. Caso contrário, as perguntas podem gerar diversas hipóteses, tornando o processo mais complexo e confuso

É fundamental nomear um moderador para orientar a equipa, garantindo que esta se mantém focada no assunto principal.



4 Aplicação do método dos 5 Porquês

Passo 3: Perguntar Porquê?

AVISO 1: Evite fazer um número excessivo de perguntas, pois isso pode acrescentar informações irrelevantes para a análise. Este excesso de perguntas pode confundir o processo e desviar a atenção para questões que não estão diretamente relacionadas com o problema que se pretende resolver.

AVISO 2: Em alguns em que existem múltiplas causas raiz, o aspeto da análise vai ficar semelhante a uma matriz onde cada ramificação corresponde a uma possível causa, permitindo analisar várias causas simultaneamente.



4 Aplicação do método dos 5 Porquês

Passo 4: Continuar perguntar Porquê?

Repita o processo mais quatro vezes, utilizando a resposta anterior como referência para formular a próxima pergunta

Como já referido anteriormente o número 5 é meramente indicativo, pode ser necessário mais ou até menos de 5 porquês para chegar á causa raiz, tudo depende da complexidade do caso.



4 Aplicação do método dos 5 Porquês

Passo 5: Saber quando parar

Deve se parar de perguntar “Porquê?” quando essa pergunta deixar de ter respostas que contribuam para a análise do problema

Se causa principal do problema ainda não tenha sido identificada, pode ser necessário recorrer a outros métodos como a análise FMEA para uma análise mais detalhada

Também é importante garantir que a análise não foi concluída cedo demais e que não se aceita apenas uma resposta superficial, deve-se explorar todas as possíveis causas do problema



4 Aplicação do método dos 5 Porquês

Passo 6: Abordar a causa raiz

Após identificar a causa raiz do problema, é essencial que a equipa trabalhe de forma colaborativa para desenvolver soluções que resolvam o problema de forma definitiva.

Além disso, é fundamental criar um plano de ação detalhado para orientar a implementação das soluções. Este plano deve incluir a atribuição de responsabilidades, indicando quem será responsável por cada etapa das ações corretivas.



4 Aplicação do método dos 5 Porquês

Passo 7: Monitorizar as medidas implementadas

É fundamental monitorizar os resultados das medidas implementadas para garantir que a causa raiz foi efetivamente eliminada e que as medidas corretivas estão a ser eficazes na resolução do problema

Em casos de reincidência, é necessário retomar o processo de análise dos 5 Porquês, pois isso pode indicar que a causa raiz não foi corretamente identificada ou que as soluções aplicadas foram insuficientes

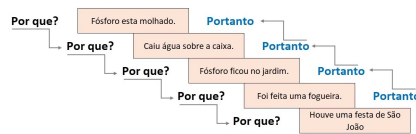
Por fim, é essencial documentar todo o processo, detalhando de forma clara e completa o ocorrido e as medidas adotadas para resolver o problema. Este documento deve ser partilhado pela organização, permitindo que todos aprendam com a situação e garantindo que problemas semelhantes sejam resolvidos de forma rápida e eficiente no futuro



5 Regras

Apesar de não haver regras rígidas para a aplicação da análise dos 5 Porquês, mas é importante ter em conta os seguintes pontos:

- Integrar na equipa pessoas com experiência ou conhecimento no assunto
- Nomear um moderador para assuntos mais complexos
- Apresentar o problema de modo a que todos entendam
- Distinguir sintomas das causas
- Concentrar apenas em problemas concretos em vez de suposições
- Avaliar o processo e não as pessoas
- Perguntar Porquê até que a causa raiz seja encontrada
- Ter a certeza de a causa raiz foi identificada, para isso, voltar a fazer o questionamento invertendo a sequência usando a palavra “Portanto”, como mostra a imagem abaixo



6 Críticas ao método

Muitas organizações utilizam a metodologia dos 5 Porquês para descobrir a causa raiz de problemas. Esta técnica procura fomentar o pensamento crítico e analítico das equipas, ajudando tanto na identificação dos problemas como no desenvolvimento de soluções. Contudo, é crucial estar atento a possíveis falhas na sua aplicação, que podem comprometer a eficácia do processo, como por exemplo:

- A tendência das equipas pararem a análise em apenas sintomas sem chegar á raiz do problema
- Dificuldade de estar aberto a novas causas e deixar um pouco o conhecimento de parte
- Dificuldade em realizar a pergunta “Porquê” adequadamente
- A aplicação do método por pessoas diferente leva a causas diferentes para o mesmo problema
- Tendência de isolar uma causa em vez de analisar as múltiplas causas
- A técnica só se torna eficaz se as pessoas que realizarem a análise tiverem experiência ou conhecimento aprofundado sobre o tema em questão

6 Críticas ao método

Benefícios do método dos 5 Porquês

- Ajuda na identificação da causa raiz dos problemas
- Ajuda a entender que um problema mal resolvido pode gerar ainda mais problemas
- Determinar a relação entre as diversas causas raiz
- Promove o raciocínio lógico na questão de identificar a causa raiz
- Baixo custo de implementação



7 Exemplo prático de aplicação do método



Obrigado | Teşekkürler | Thank you

Anexo III: Exemplo de caso de estudo do software de monitorização de motores e transformadores

Online Motor Monitoring System – High Severity Mechanical Factor

Case Study: Loulé – P103-10L011EM01: Elevador Alim. Silos M Cimento 3 (24/12/2024)



CENTER of EXCELLENCE

On December 24, 2024, the Enging ePreditMntc software issued a critical severity alert related to the mechanical factor of the P103-10L011EM01 motor, responsible for operating the Cement Silos 3 Feed Elevator at the Loulé plant.

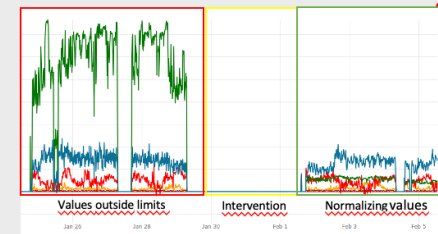
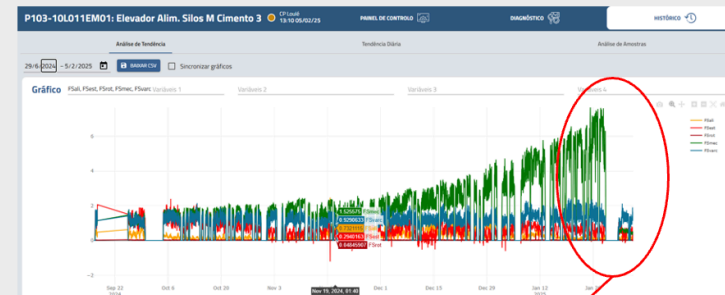
After analyzing the data, it was found that the mechanical severity had been steadily increasing since November. Faced with this situation, the team responsible contacted the Loulé plant to find out if they were already aware of the problem and what measures were being considered.

Following this alert, the plant's maintenance team inspected the elevator and identified wear on a coupling, which could be the cause of the increase in mechanical severity values.

During the intervention, in addition to replacing the coupling, the team also opted to replace the wheels and drive chains, as they showed signs of wear. After these corrective actions, the software data confirmed that the mechanical severity values had returned to normal levels, thus validating the effectiveness of the maintenance carried out.

Using the Enging ePreditMntc software enabled early detection of the fault and verification of the maintenance results, minimizing the impact on the production process and guaranteeing the plant's operational continuity.

An assessment was made of the estimated costs of saving money by identifying the problem early, the estimated cost of which is €10,000, considering the history of the equipment and the downtime required to carry out the repair, which could result in an interruption of more than 50 hours in the plant.



Worn sprockets



Damaged rubber coupling

Anexo IV: Exemplo de análise de alerta do software XPTO de manutenção preditiva



Alerts Analysis

Mill Incidental Stoppage - 26.04.2025 - 5:27 pm

Mill Incidental Stoppage - 26.04.2025 - 7:47 pm

EXCELLENCE MAINTENANCE

CoE - ME | Abril 2025



Gestão da Manutenção dos Ativos Físicos na CIMPOR

Raw mill incidental stoppage

Date: **26.04.2025** from 17:27:57s until 18:50:07s

Stoppage time: 01:22:11s

Equipment: Raw Mill

Cause: cylinder cylinder pressure reduction

The screenshot shows the 'STOP - Tratamento de Paragens' window. The 'Fase de processo' is 'Todas as fases de processo'. The 'Linha' is 'Todas as linhas'. The 'Evento' is '21457'. The 'Origem' is 'Automático'. The 'Fábrica' is 'P102'. The 'Fase de processo' is '2 - Moagem de Cru'. The 'Linha' is '23 - Moagem de Cru 3'. The 'Origem' is 'AUTOMÁTICO'. The 'Produto' is '222 - Farinha'. The 'Data e Hora de paragem' is '26/04/2025 17:27:56'. The 'Data e Hora de arranque' is '26/04/2025 18:50:07'. The 'Tempo de paragem' is '1 h 22 min 11 s'. The 'Perda de Produção' is '0,00 Ton'. The 'Tipo de paragem' is 'I - Incidental'. The 'Subtipo de Paragem' is 'ME - Equipamento Mecânico'. The 'Tipo de equipamento' is 'RM - Moinho vertical de rolos'. The 'Equipamento' is 'E3P03 - Pressão Cilindro Hidráulico 1/'. The 'Parte do Equipamento' is '156 - Pressostato'. The 'Motivo de Paragem' is '2005 - Baixa pressão de lubrificação'. The 'Responsável de Turno' is empty. The 'Fornecedor (c/ contrato)' is empty. The 'Comentários' section contains the text: 'Baixamento de pressão dos hidráulicos 1 e 3. A moagem foi colocada em funcionamento após inspeção ao moinho e equilibrados os hidráulicos.' The 'SIEMENS' logo is visible at the bottom right.

Date: **26.04.2025** from 19:46:43s until **27.04.2025**

09:38:55s

Stoppage time: 13:52:13s

Equipment: Raw Mill

Cause: Cylinder rod rupture

The screenshot shows the 'STOP - Tratamento de Paragens' window. The 'Fase de processo' is 'Todas as fases de processo'. The 'Linha' is 'Todas as linhas'. The 'Evento' is '21459'. The 'Origem' is 'Manual'. The 'Fábrica' is 'P102'. The 'Fase de processo' is '2 - Moagem de Cru'. The 'Linha' is '23 - Moagem de Cru 3'. The 'Origem' is 'AUTOMÁTICO'. The 'Produto' is '222 - Farinha'. The 'Data e Hora de paragem' is '26/04/2025 19:46:42'. The 'Data e Hora de arranque' is '27/04/2025 09:38:55'. The 'Tempo de paragem' is '13 h 52 min 13 s'. The 'Perda de Produção' is '0,00 Ton'. The 'Tipo de paragem' is 'I - Incidental'. The 'Subtipo de Paragem' is 'ME - Equipamento Mecânico'. The 'Tipo de equipamento' is 'RM - Moinho vertical de rolos'. The 'Equipamento' is 'SE12 - Moinho de Cru 3'. The 'Parte do Equipamento' is '237 - Veio'. The 'Motivo de Paragem' is '2016 - Quebra de eixo'. The 'Responsável de Turno' is empty. The 'Fornecedor (c/ contrato)' is empty. The 'Comentários' section contains the text: 'Tirante do hidráulico 1 partido.' The 'SIEMENS' logo is visible at the bottom right.



On 26 April, two critical failures were recorded in the raw mill:

A sharp drop in pressure in the cylinders, visible in the orange area of the graph, which led to a shutdown of the equipment for inspection and rebalancing of the grinding rollers.

After the system restart, a rupture occurred in the rod of one of the cylinders, visible in the green area of the graph, resulting in a 13-hour and 52-minute stoppage to replace the tie rod.

It is important to note that, in both occurrences, the software did not issue any alerts or notifications.



Gestão da Manutenção dos Ativos Físicos na CIMPOR



Comments on Mill Incidental Stoppage

- On 26 April, two critical failures were recorded in the raw mill:
- A sharp drop in pressure in the cylinders, visible in the orange area of the graph, which led to a shutdown of the equipment for inspection and rebalancing of the grinding rollers.
- After the system restart, a rupture occurred in the rod of one of the cylinders, visible in the green area of the graph, resulting in a 13-hour and 52-minute stoppage to replace the tie rod.
- It is important to note that, in both occurrences, the software did not issue any alerts or notifications.

Conclusion Analysis: **FALSE NEGATIVE**

Anexo V: Exemplo de análise de alerta do software XPTO de manutenção preditiva



Alerts Analysis

September 1, 2025, at 9:46:33 AM

EXCELLENCE MAINTENANCE

CoE - ME | Abril 2025



Email Alert

September 1, 2025, at 9:46:33 AM

Predictive Analytics Detected Alert For Overall Model Residual in the Vertical Raw Mill Grinding Rollers DA Model

Project Vertical Raw Mill Grinding Rollers DA
Profile Vertical Raw Mill Grinding Rollers DA
Point Overall Model Residual

Extended ID Vertical Raw Mill Grinding Rollers DA Vertical Raw Mill Grinding Rollers DA Overall Model Residual
Extended Description Vertical Raw Mill Grinding Rollers DA Vertical Raw Mill Grinding Rollers DA Overall Model Residual

Alert Type High Warning
Alert Threshold 5
Alert Window 10 Of The Last 12 Events

Event Timestamp 9/1/2025 9:46:33 AM
Event Value 10.861

Primary Contributors:
E3P02_A1 34.7% Deviation
E3L12_A1 25.1% Deviation

In the alert sent , a potential issue is highlighted in the Vertical Raw Mill Grinding Rollers DA model, where the main contributing factors are the 3/4 roller bearing sealing air pressure (E3P02_A1) and the roller 2 lube oil level (E3L12_A1).

Note: It is important to standardize the email format and the information provided, as currently only the sensor number is shown instead of the variable name. This makes it difficult to interpret the alarm, since one has to check separately which sensor the number refers to.

Gestão da Manutenção dos Ativos Físicos na CIMPOR

Date: August 26 to September 9, 2025

- Alert

- Warning

Email Alert

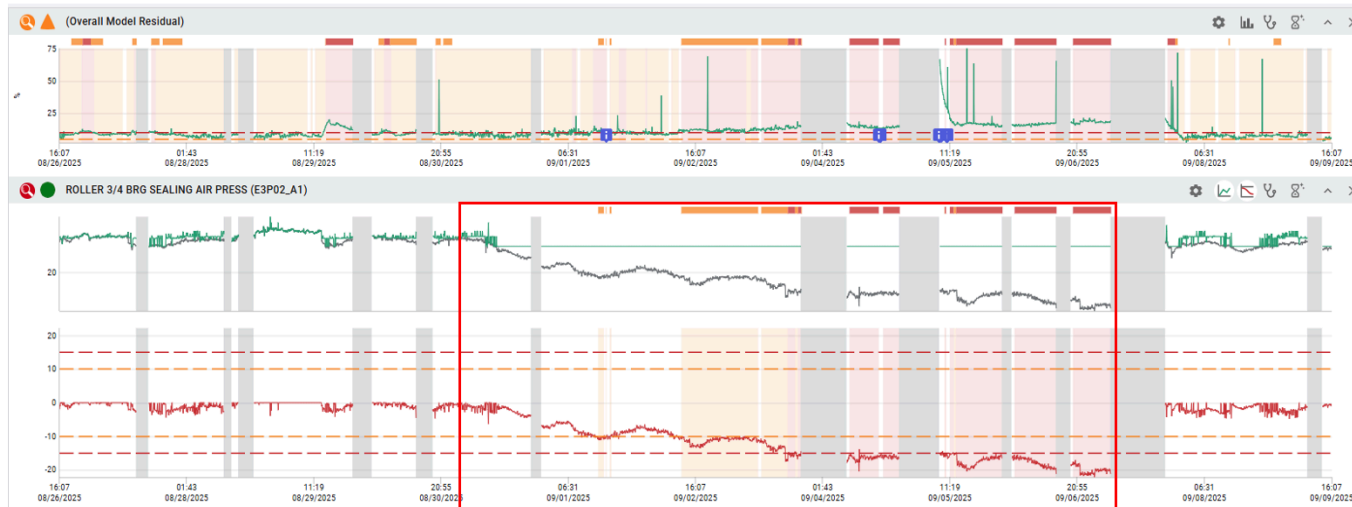


1st Contribution is ROLLER 3/4 BRG SEALING AIR PRESS (E3P02_A1) – 45,2%

2nd Contribution is ROLLER 2 LUBE OIL LEVEL (E3L12_A1) – 28,4%

Sensor Values

1st Contribution is ROLLER 3/4 BRG SEALING AIR PRESS (E3P02_A1)



This graph shows the decrease in sealing air pressure of the 3/4 roller bearing from August 31 to September 7. The pressure dropped to 7 mbar, while the normal value is 30 mbar



After the shutdown on September 7, and following the opening and inspection of the mill, it was detected that the piping had an opening, which caused a pressure drop. After the intervention, the pressure values returned to normal.

Sensor Values

2nd ROLLER 2 LUBE OIL LEVEL (E3L12_A1)



The contribution of ROLLER 2 LUBE OIL LEVEL to this alarm is incorrect, because the graph shows that the oil level is above the predictive value, which does not indicate a potential problem. This situation was caused by the positive deviation of the value, which in this case should only be considered an alert factor when the deviation is negative

Comments:

- In the alert sent, a potential issue is highlighted in the Vertical Raw Mill Grinding Rollers DA model, where the main contributing factors are the 3/4 roller bearing sealing air pressure (E3P02_A1) and the roller 2 lube oil level (E3L12_A1).
- **Note:** It is important to standardize the email format and the information provided, as currently only the sensor number is shown instead of the variable name. This makes it difficult to interpret the alarm, since one has to check separately which sensor the number refers to.
- This graph shows the decrease in sealing air pressure of the 3/4 roller bearing from August 31 to September 7. The pressure dropped to 7 mbar, while the normal value is 30 mbar.
- After the shutdown on September 7, and following the opening and inspection of the mill, it was detected that the piping had an opening, which caused a pressure drop. After the intervention, the pressure values returned to normal.
- The contribution of ROLLER 2 LUBE OIL LEVEL to this alarm is incorrect, because the graph shows that the oil level is above the predictive value, which does not indicate a potential problem. This situation was caused by the positive deviation of the value, which in this case should only be considered an alert factor when the deviation is negative.

Conclusion Analysis: True Positive

Anexo V: Artigo apresentado no Congresso internacional PAMDAS 2025

Case Study - Failure analysis of a raw mill in the cement industry: FMECA with fault tree and Ishikawa diagram

Paulo Duarte¹, Hugo Raposo^{1,2}, Torres Farinha^{1,2}

¹ Polytechnic University of Coimbra, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Rua da Misericórdia, Lagar dos Cortiços, S. Martinho do Bispo, 3045-093 Coimbra, Portugal.

² RCM²⁺ Research Centre in Asset Management and System Engineering, Polytechnic University of Coimbra, Coimbra, 3030-199 Coimbra, Portugal

Corresponding authors

paulo.j.duarte98@gmail.com; hugo.raposo@isec.pt; tfarinha@isec.pt

Abstract

The cement industry faces challenges related to the need to increase efficiency, ensure high equipment availability, reduce costs and reduce environmental impact. In this context, asset management plays a key role in promoting continuous improvement, ensuring the continuity of the production process and the sustainability of operations

In the cement sector, physical asset management is particularly demanding due to the size, complexity and criticality of equipment such as kilns and mills. The raw mill, responsible for grinding the raw materials that feed the clinker kiln, stands out as one of the most critical assets. Failures in this equipment can result in long periods of downtime, poor product quality and increased operating costs.

In this study presents an FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) analysis of the raw mill (vertical roller mill) in a cement production center. The methodology made it possible to identify the main failure modes, assess their effects and determine criticality based on occurrence, severity and detectability, resulting in the calculation of the Risk Priority Number (RPN). Complementary tools such as Fault Tree Analysis and the Ishikawa Diagram were also used for a more detailed analysis, with the aim of improving the analysis of the causes and effects of the failure modes found.

This analysis proved essential in identifying the most critical failure modes, serving as a basis for future reformulation of maintenance strategies. It is expected that, in the medium term, the implementation of these measures will contribute to greater equipment reliability and availability. On the other hand, the study showed that the current failure classification system is too simplistic, and it is recommended that it be revised to improve the accuracy of the analysis and the effectiveness of the actions implemented

Keywords: Cement Industry, Raw Mill, Physical Asset Management, FMECA, Fault Tree Analysis, Ishikawa Diagram

1 INTRODUCTION

The increasing complexity of industrial processes, combined with the pressure for efficiency, sustainability, and operational continuity, has highlighted the importance of physical asset management, which plays a fundamental role in modern organizations. The goal of asset management is to maximize value throughout the asset's lifecycle, balancing performance, cost and risk. [13] In the context of digital transformation and Industry 4.0, physical asset management has been adapting to a rapidly evolving technological landscape [17]. The introduction of tools such as the Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), and real-time data analytics is transforming the way assets are monitored and managed.

In the cement sector, due to the complexity and scale of the equipment, the reliability and availability of assets are essential to ensure production continuity and reduce the costs associated with unplanned downtime. Recent studies, such as by Maihulla, Yusuf & Chong used RAMS analyses to evaluate and optimize the overall performance of cement production systems, emphasizing the importance of integrating reliability, availability, and maintenance indicators into the strategic management of these assets [19].

One of the most critical pieces of equipment in this context is the raw mill, responsible for grinding the raw materials required for clinker production. Failures in this system can compromise operations and generate significant financial and productivity-related impacts.

This article presents a case study conducted at a cement plant, focusing on the analysis of the raw mill. The study began with the identification of recurrent failure modes in this stage of the process and aimed to apply reliability analysis and improvement methodologies. A Reliability Block Diagram (RBD) was developed, followed by a Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA), and complemented by the use of an Ishikawa Diagram and a Fault Tree Analysis (FTA).

This article is structured as follows: Section 2 presents the state of the art; Section 3 describes the methodologies applied and the case study; Section 4 presents the results obtained; Section 5 discusses the findings in comparison with the literature; and, finally, Section 6 outlines the conclusions drawn from the study.

2 STATE OF THE ART

The evolution of industrial maintenance reflects the growing need for increased reliability, availability, safety, and operational efficiency. Historically, maintenance was performed solely in a corrective manner, meaning after the occurrence of a failure. However, with economic and technological development, new approaches have emerged, giving rise to preventive and predictive maintenance strategies. [1]

According to the standard NP EN 13306:2021, maintenance is divided into three categories: preventive maintenance, corrective maintenance, and improvement maintenance. Corrective maintenance is carried out after a failure has occurred, while preventive maintenance involves scheduled interventions to prevent future failures. Within the scope of preventive maintenance, predictive maintenance stands out; this approach uses sensors and real-time data analysis to detect changes in operating patterns [17], thereby enabling the prevention of failures. Finally, improvement maintenance aims to increase the reliability of equipment or systems through actions designed to optimize their performance. [2] Farinha [13] reinforces these views by structuring maintenance planning within a life-cycle asset management approach, integrating technological.

In this article, four methodologies were used: Reliability Block Diagram (RBD), Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA), Ishikawa Diagram, and Fault Tree Analysis (FTA).

The Reliability Block Diagram (RBD) is a methodology used to logically structure the operation of equipment or a system. The IEC 61078:2016 standard establishes the requirements for graphical representation, application, and interpretation of reliability diagrams. The standard also specifies methods for estimating reliability, availability, and the impact of possible redundancies or sequences within the system.

This methodology is widely used for identifying the absence of redundancies and understanding the effects of failures in series systems. The reliability of a system in series can be calculated using Equation 1:

$$R(t) = \prod R_i(t) \quad (1)$$

Where $R_i(t)$, $R_{-i}(t)$ and $R_i(t)$ represents the reliability of component i over time.

In parallel systems, reliability is calculated using Equation 2:

$$R(t) = \prod [1 - R_{i(t)}] \quad (2)$$

FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) is an inductive and systematic methodology used in risk management, as well as in the improvement of products, processes and systems. Over time, this methodology has been adopted by the industrial sector across various fields. FMEA enables the identification of potential failure modes and the analysis of their respective causes and effects, so that preventive actions can be taken before failures occur. This method is widely recognized as an engineering technique aimed at anticipating, preventing, and eliminating known or potential failures before they reach the end user. [3], [4].

FMEA analysis can take two forms: a qualitative analysis, typically known as FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), or a more detailed and quantitative approach called FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis), in which the criticality of the identified failure modes is assessed. [5]

Criticality is assessed through the application of the Risk Priority Number (RPN), which is calculated using the Equation 3:

$$RPN = S \times O \times D \quad (3)$$

Where S is the Severity of the failure effect, O is the Occurrence of the failure mode and D is the Detectability of the failure. [5]

Despite its usefulness, FMEA/FMECA has limitations. It depends on the quality of the available information, the experience of the analysts, and can become subjective in the assignment of ratings. Moreover, the RPN may lead to incorrect interpretations if the factors S , O , and D are poorly weighted. Therefore, in more rigorous contexts, it can be complemented with other methodologies, such as Fault Tree Analysis (FTA) or Root Cause Analysis (RCA). [3], [5], [6]

FMEA or FMECA analyses are conducted according to the IEC 60812:2018 standard. This analysis is one of the fundamental tools for early failure identification, enabling a proactive response from engineering and maintenance teams, and significantly contributing to the reliability, safety, and efficiency of industrial assets. [5]

The Ishikawa diagram, also known as the fishbone diagram, is a cause-and-effect analysis tool used to identify, organize, and visually represent the possible causes of a problem, facilitating analysis in more complex issues. By clearly structuring the potential causes of the problem, it enables organizations to develop maintenance strategies—whether corrective, preventive, or even predictive—thereby improving the reliability and efficiency of assets. [7]

The development of the analysis using the Ishikawa diagram involves the correct identification of the problem, which is positioned on the right side of the diagram. From this point, the main lines represent the primary causes (Method, Manpower, Material, Measurement, Environment, Machine). Smaller lines branching from these are used to record the possible secondary causes grouped under each primary cause. [7]

Fault Tree Analysis (FTA) is a deductive methodology used for identifying, structuring, and evaluating the causes that may lead to a specific undesired event. This technique involves representing in a hierarchical and logical manner the sequence of failures or events that contribute to a critical equipment failure. Due to its ability to break down complex problems into basic causes, fault tree analysis is a fundamental tool in asset management, safety, and industrial maintenance, being particularly effective in analyzing systems with multiple interdependencies. [8]

According to the IEC 61025:2006 standard, fault tree analysis consists of the logical decomposition of the top event into simpler events until reaching the root causes or basic events. This international standard defines the principles, symbols, and procedures to be followed for constructing and analyzing fault trees, promoting standardization and reliability of the results obtained. For this purpose, the standard recommends the use of real data whenever possible (e.g., failure histories) to ensure greater reliability in the quantification of events. [9]

The causes are then organized into a tree diagram where, through logical gates—AND and OR gates—they express the relationships between the different events. [9]

OR logic gates represent situations where the output event occurs if at least one of the input events occurs; whereas the AND logic gate represents a situation where the output event only occurs if all the input events occur simultaneously. [9]

This logical structure also allows for the evaluation of failure probability based on component reliability data, failure histories, or expert estimates. Its practical application is highly valued in sectors where reliability analysis and risk minimization are critical, such as aerospace, energy, and industrial processes. [10]

For probability calculation Equations 4 and 5 are used, as stipulated in the IEC 61025:2006 standard:

Equation 4 - OR gate:

$$F(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R(t)] \quad (4)$$

Equation 5- AND gate:

$$F(t) = \prod_{i=1}^n [1 - R(t)] \quad (5)$$

Where $F(t)$ is the probability of occurrence of the event, and $R(t)$ is the reliability of the element.

However, despite being a powerful and widely used tool, Fault Tree Analysis (FTA) is not without limitations. In practice, it is not always easy to gather reliable and sufficient data to perform the analysis, especially when dealing with complex systems or in environments dominated by uncertainty and empirical knowledge.

To overcome these challenges, there has been an evolution in the methodology through the integration of fault tree analysis with other approaches, such as fuzzy logic, Bayesian networks, or even Reliability, Availability, Maintainability & Safety (RAMS) analysis, among others. As demonstrated by Soltanali *et al.*, "The integrated methodology improves the predictive capability of failure models and simultaneously optimizes maintenance decisions based on real data and the tacit knowledge of operators." [11]

As demonstrated by Gotora & Labib, a hybrid model integrating FTA, RBD, and FMECA was applied to investigate an incident in an underground mine, showing that the combined use of these methodologies not only enables a more comprehensive technical analysis but also allows for better prioritization of corrective actions and organizational learning from failures. [18]

3 METHODOLOGY

The raw mill is one of the fundamental pieces of equipment in the cement manufacturing process. Its function is to grind the raw materials used for clinker production. Raw material preparation is an essential step in cement production, aiming to obtain a homogeneous mixture of raw materials with a chemical composition suitable for clinker formation. This mixture mainly consists of limestone and clay but may also include corrective materials or industrial by-products to adjust the final composition.

The operation of vertical mills is based on the principle of compression grinding through a horizontal rotating table and a set of vertical rollers subjected to constant pressure via hydraulic cylinders. The raw material is fed into the center of the table, where, due to the centrifugal force generated by the table rotation, it is conveyed towards the edges of the table. As the material passes under the rollers, it is ground into fine particles. Simultaneously, hot air is blown into the bottom of the mill and travels through the interior. This hot air serves two functions: drying the material if moisture is present and transporting the ground particles to the upper part of the mill where the separator is located. The separator's function is to classify the material—the ground particles with the correct size pass through the separator following the gas flow to the next stage of the process, while the larger particles are returned via the rejection cone to be ground again.

The analysis conducted in this study was based on the failure history recorded between January 2022 and April 2025. The main objective was to identify, understand, and characterize the failure modes that impact the performance and availability of this equipment.

The study was structured in four stages, each with a distinct but interconnected approach, allowing for a detailed analysis of this equipment.

In the first stage, a block diagram was developed representing the main components that constitute the raw mill. This representation allowed for the identification of system elements and the assessment of redundancy solutions. In the second stage, a FMECA analysis was performed, focusing on the mill body to identify the most relevant failure modes, their effects, and criticality. In the third stage, as a complement to the FMECA analysis, an Ishikawa diagram was created, focusing on the failure mode “low oil level in the gauges,”

enabling an analysis of possible causes. Finally, in the fourth stage, a FTA diagram was developed, representing the failure modes identified in the FMECA analysis, as well as their interconnections and probabilities of occurrence, based on the equipment's historical data.

The study began with an analysis through a reliability block diagram (series-parallel), representing the main equipment that makes up the raw mill, such as, turner, coupling, main motor, gearbox, mill body, recirculation elevator and separator.

The construction of this diagram allowed for the visualization of the interdependencies between the different pieces of equipment and the assessment of possible redundancy solutions, that is, the existence of equipment capable of ensuring operation in the event of a failure of any component (Figure 3.1).



Figure 3.1 Raw Mill Reliability Block Diagram

After analyzing the diagram, it was confirmed that there are no redundancy systems— all equipment operates sequentially and interdependently, with every piece necessary for the continuous operation of the process. The only equipment that does not operate continuously with the others is the Reclaimer, which is only used when a specific maneuver is required on the mill, for example during maintenance or when it is necessary to adjust the thickness of the material layer. In such cases, the Reclaimer is used to perform the first pass before starting the main motor.

Consequently, whenever any of the constituent equipment fails, it inevitably results in the shutdown of the raw mill, classifying this system as critical to the process.

It is important to recall that in situations where the raw mill stops and there is insufficient stored raw meal in the silos, this failure can also cause the shutdown of the kiln stage, as the raw material feed to the kiln is interrupted, leading to significant consequences in terms of efficiency, operational costs, and production losses. This analysis highlights the importance of continuous monitoring of this equipment to minimize the risk of unexpected failures.

After preparing the block diagram and analysing the operation of the equipment and its components, the FMECA analysis follows, with the aim of analysing one of the most critical components of this equipment, in which case the mill body was chosen. This choice was based on the nature of the failures in this equipment and the size of the consequences of the failures for the operation of the mill.

The first phase of the analysis consisted of collecting accidental downtime data for the raw mill from January 2022 to April 2025. After data collection, a data screening was performed, which revealed some difficulties. Approximately 30% of the downtimes attributed to the mill body were classified under the generic category “Others.” Specifically, out of 27 recorded downtimes attributed to the mill body, 8 were classified as “Others.” Overall, of the 151 accidental downtimes recorded during this period for the raw mill, 69 were classified as “Others,” representing about 45% of the total accidental downtimes, which complicated the analysis and understanding of the failure modes.

Given this situation, a more detailed analysis of the descriptive comments associated with these downtimes was necessary. This analysis allowed the identification of the failure modes related to each occurrence, enabling the reclassification of the data and ensuring a more reliable basis for the development of the FMECA analysis. After data screening and reclassification of some downtimes, the FMECA Analysis was performed. For this purpose, a form was prepared, as shown in Figure 3.2, following the IEC 60812:80 standard with some modifications.

FMECA Analysis											
System / Equipment	Component / Subpart	Function	Failure Mode	Cause(s)	Local Effect	Global / Final Effect	Severity (S)	Occurrence (O)	Detectability (D)	RPN	Mitigation Actions

Figure 3.2 Form for FMECA analysis

The form was completed systematically after the information was collected and organized. Initially, the data were structured by equipment subpart and identified failure modes, with this identification complemented by a description of the function performed by each subpart, allowing for the contextualization of the failure’s impact on the overall system. For each failure mode, the possible causes were identified, as well as the effects caused both locally and on the operational performance of the raw mill (Figure 3.3).

After completing the identification of the failure modes found, the next phase involved the criticality analysis through the classification of the three fundamental FMECA parameters: Severity (S), Occurrence (O), and Detectability (D).

Although the IEC 60812:2018 standard typically recommends using a scale from 1 to 10 to assign values to each parameter, this analysis adopted a scale from 1 to 4. This decision aimed to simplify the analysis and ensure greater consistency in classification, given the nature of the available data and the complexity of the system analyzed (Figure 3.4).

Gestão da Manutenção dos Ativos Físicos na CIMPOR

FMECA Analysis						
System / Equipment	Component / Subpart	Function	Failure Mode	Cause(s)	Local Effect	Global / Final Effect
Raw Mill (SE12)	Hydraulic Cylinder	Ensure the pressure on the rollers required for raw material grinding	Tie rod fracture	Component fatigue	Pressure imbalance in the roller grindings	Mill stop
			Cylinder position detector failure	Pressure imbalance in the cylinders	roller grinding out of level	Risk of shutdown to restore normal operating conditions of the roller grindings
			Cylinder base bolts broken	Component fatigue	Increase in vibrations	Risk of mill shutdown
	Roller Grinding	Grind the material coming from the quarry	Low oil level	Damaged seals	Loss of lubrication	Risk of mill shutdown caused by low oil level
				Probe installed without measurement capability	Incorrect sensor reading	Incorrect oil level information
				Loose plug	Loss of lubrication	Risk of mill shutdown caused by low oil level
	Dam ring and wear plates	Dam ring that retains the material on the grinding table during milling	Broken fixing of the gauge liner	Wear	Wear plates drop caused damage to the dam ring and the lower plates	Mill shutdown due to structural damage in the mill
	Sealing air fan for grinding rollers	Supply constant air pressure for roller sealing	Loss of air pressure in the sealing line	Damaged pipeline (ruptured)	Air pressure loss in the sealing line	Air sealing failure in the roller grinding
				Breakage of the bolt fixing the piping support	Drop in roller grinding sealing pipe and loss pressure	Air sealing failure in the roller grinding
	vibration sensor	Vibration measurement	Vibration warning	Possible lack of material on the mill plate	Increased vibrations detected in the system	Risk of mill shutdown due to high vibration levels
				Sensor wiring loose	High vibrations	Shutdown due to high vibrations
	Wear plates	Protect the base plate against wear to reduce abrasion	Lower liner dropped (bottom part of the wear plates)	Fracture of the weld supporting the wear plates	Abnormal noise at the frequency of a rotation in the elevator SE14 zone	Mill stop
	Interbus card	Layer control card	Communication failure	Interbus card damaged	Loss of communication	Mill stop
	Low-pressure oil Pump 1	Lubrication	Low lubrication level	Clogged oil filters of the low-pressure pump	Lack of oil	Risk of mechanical failure
	Hydraulic cylinder position detectors	Measuring the position of the cylinders to ensure the correct position of the gauges	Broken position detector support	Component fatigue	roller grinding out of level	Risk of shutdown to restore normal operating conditions of the roller grindings

Figure 3.3 First phase of the FMECA analysis

Caption		
Level		Description
Severity (S)		
1	Very low	Insignificant functional impact
2	Low	Minimal reduction in performance or quality with tolerable effects
3	Moderato	Significant reduction in performance, potential impact on functionality
4	High	Critical failure may compromise safety or cause system shutdown
Occurrence (O)		
1	Rare	Less than one occurrence per year
2	Occasional	Approximately one occurrence per year
3	Frequent	Several times per year
4	Highly frequent	Monthly or more frequently
Detectability (D)		
1	Very high	Very high probability of detecting the failure
2	High	High probability of detecting the failure
3	Low	Some probability of detecting the failure
4	Very low	Low probability of detecting the failure

Figure 3.4 Caption FMECA Analysis

The classification of the parameters for each identified failure mode was carried out with the support of a maintenance technician from the Inspection and Preparation Department of the Souselas Production Center. This collaboration

was crucial to ensure the consistency of the assigned ratings, as the technician possesses in-depth knowledge of the equipment and its operation, as well as past failures. This process helped guarantee that the analysis accurately reflected the operational reality of the equipment, reinforcing the results obtained and the subsequent prioritization of failure modes based on the Risk Priority Number (RPN) – Figure 3.5.

RPN	Color code	Description
0-16	Green	Low risk
17-32	Yellow	Moderate risk
33-48	Orange	High risk
49-64	Red	Critical risk

Figure 3.5 Caption with values and color code for RPN interpretation

Finally, after completing the FMECA analysis, it was possible to identify the most critical failure modes related to the mill body, based on the calculated RPN values. Using these values along with a color-coded scheme, the criticality of the various failure modes was effectively demonstrated.

The analysis revealed that certain failure modes, although of low occurrence, exhibit high severity and low detectability. This situation is mainly due to the size of the components involved and the difficulty in performing corrective interventions, as these failures tend to occur unexpectedly and require prolonged downtime for repair, significantly impacting the operational availability of the equipment.

It was concluded that the most critical failure mode corresponds to the breaking of the tie rod, caused by progressive wear, which implies an immediate shutdown and, consequently, the stoppage of the kiln.

This result highlights the importance of studying monitoring strategies, such as ultrasonic testing, and intensifying routine inspections to anticipate component degradation. In this way, tie rod replacements are intended to no longer occur reactively and unexpectedly but to become part of the preventive maintenance plan based on objective data. This approach allows minimizing the impact of failures, reducing unplanned downtime, and increasing equipment availability and reliability.

The second most relevant failure mode, considering its occurrence, is low oil level in the gauges, resulting from seal leakage. Although this failure mode has

higher detectability, its high occurrence makes it a priority for maintenance management. Whenever an oil level below the recommended threshold is detected, replenishment is carried out, allowing the mill to continue operating until the next scheduled shutdown. However, this temporary solution does not represent a definitive correction, incurring costs related both to the labor required for refilling and to the oil consumption.

This procedure is justified by the fact that replacing the leaking pair of gauges with a spare requires a prolonged shutdown, which leads to attempts to postpone this intervention as much as possible until it coincides with a planned maintenance stop.

Given its relevance, this failure mode was subject to a more in-depth analysis through the construction of an Ishikawa diagram, aiming to understand its possible causes and identify effective mitigation measures.

Finally, after completing the FMECA analysis, it was possible to identify which failure modes are most critical regarding the mill body, based on the calculated RPN values and, through its value and a colour scheme, it became possible to demonstrate the criticality of the various failure modes.

The FMECA analysis thus proved to be a strategic tool for operational decision-making and continuous improvement, contributing to the enhancement of equipment availability and reliability (Figure 3.6).

FMECA Analysis											
System / Equipment	Component / Subpart	Function	Failure Mode	Cause(s)	Local Effect	Global / Final Effect	Severity (S)	Occurrence (O)	Detectability (D)	RPN	Mitigation Actions
Raw Mill (SE12)	Hydraulic Cylinder	Ensure the pressure on the rollers required for raw material grinding	Tie rod fracture	Component fatigue	Pressure imbalance in the roller grindings	Mill stop	4	3	4	48	Replacement of the tie rod
			Cylinder position detector failure	Pressure imbalance in the cylinders	roller grinding out of level	Risk of shutdown to restore normal operating conditions of the roller grindings	3	2	3	18	Pressure regulation of the cylinders
			Cylinder base bolts broken	Component fatigue	Increase in vibrations	Risk of mill shutdown	2	2	4	16	Replacement of broken bolts
	Roller Grinding	Grind the material coming from the quarry	Low oil level	Damaged seals	Loss of lubrication	Risk of mill shutdown caused by low oil level	4	3	3	36	Restoring the oil level followed by roller grinding repair
				Probe installed without measurement capability	Incorrect sensor reading	Incorrect oil level information	4	1	3	12	Replacement of the sensor with one of higher measurement capacity
				Loose plug	Loss of lubrication	Risk of mill shutdown caused by low oil level	2	1	2	4	Retightening of the plug
	Dam ring and wear plates	Dam ring that retains the material on the grinding table during milling	Broken fixing of the gauge liner	Wear	Wear plates drop caused damage to the dam ring and the lower plates	Mill shutdown due to structural damage in the mill	4	2	4	32	Replacement of the north roller grinding, full replacement of the dam ring, mill skirt, drag plates, and repair of the mill body
	Sealing air fan for grinding rollers	Supply constant air pressure for roller sealing	Loss of air pressure in the sealing line	Damaged pipeline (ruptured)	Air pressure loss in the sealing line	Air sealing failure in the roller grinding	3	2	4	24	Repair of piping
				Breakage of the bolt fixing the piping support	Drop in roller grinding sealing pipe and loss pressure	Air sealing failure in the roller grinding	2	1	4	8	Replacement of broken bolts and lubrication of the spherical joints
	vibration sensor	Vibration measurement	Vibration warning	Possible lack of material on the mill plate	Increased vibrations detected in the system	Risk of mill shutdown due to high vibration levels	3	4	1	12	Restart of the system
				Sensor wiring loose	High vibrations	Shutdown due to high vibrations	1	1	3	3	Retightening of the wire
	Wear plates	Protect the base plate against wear to reduce abrasion	Lower liner dropped (bottom part of the wear plates)	Fracture of the weld supporting the wear plates	Abnormal noise at the frequency of a rotation in the elevator SE14 zone	Mill stop	2	2	3	12	Weld repair of the wear plates
	Interbus card	Layer control card	Communication failure	Interbus card damaged	Loss of communication	Mill stop	2	1	4	8	Replacing the control card
	Low-pressure oil Pump 1	Lubrication	Low lubrication level	Clogged oil filters of the low-pressure pump	Lack of oil	Risk of mechanical failure	2	1	4	8	Replacement of filters
Hydraulic cylinder position detectors	Measuring the position of the cylinders to ensure the correct position of the gauges	Broken position detector support	Component fatigue	roller grinding out of level	Risk of shutdown to restore normal operating conditions of the roller grindings	1	2	3	6	Repair of the support structure	
Hydraulic Unit for Raw Mill 3	Control of the hydraulic cylinders	Isolated cylinder	Oil intake valve closed	Lack of cylinder pressure	Cylinder failure	2	1	2	4	Restoration of operating conditions (valve opening)	
Water pipework	Water supply to the mill	Water leakage in the pipeline	Defective accessory	Water leakage		1	1	3	3	Disassembly of accessory, condition analysis, reassembly and retightening of the union to eliminate water leakage	

Figure 3.6 FMECA Analysis

After identifying the failure modes related to the mill body, the failure mode "low oil level in the gauges" stood out due to its recurrence. This recurrence justified a more in-depth analysis through the creation of an Ishikawa diagram, also known as a fishbone diagram.

This method allows for a structured organization of factors that may cause the failure, grouping them into categories such as: method, labor, machine, maintenance, measurement, and materials; the objective is to identify possible causes contributing to this failure mode.

According to historical data, the low oil level failure mode in the gauges is mainly attributed to seal leaks, directly affecting the oil retention in the gauges. However, a thorough analysis revealed other possible causes for this failure mode, such as:

- Method: Failure in the verification of plug tightening;
- Machine: Loose plug, damaged seals;
- Material: Poor seals quality;
- Measurement: Low-capacity sensor, incorrect reading;
- Maintenance: Failure to tighten the plug;
- Manpower: Incorrect plug tightening.

The diagram resulting from this analysis (Figure 3.7) clearly shows the possible root causes associated with the failure mode, serving as support for defining more effective corrective and preventive actions.

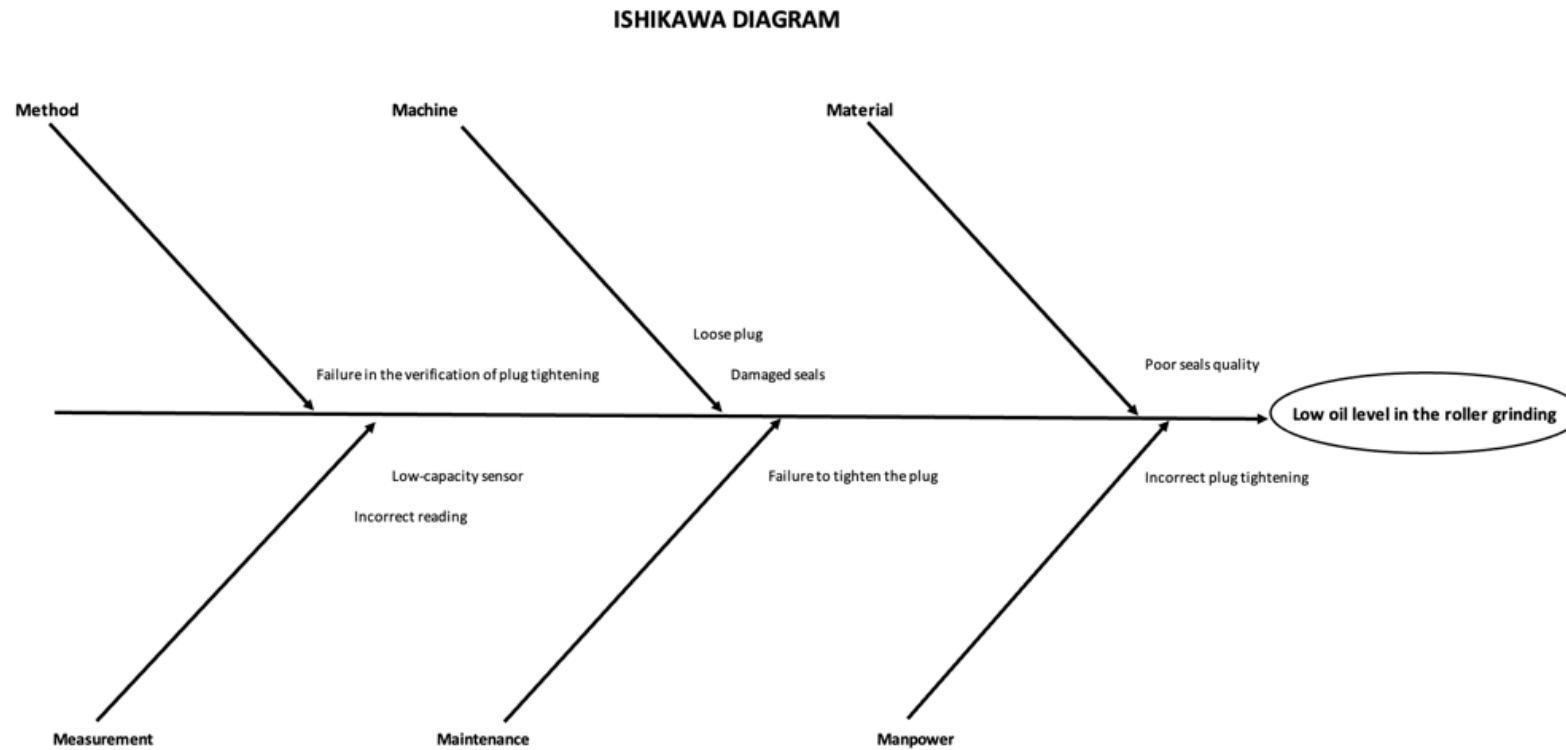


Figure 3.7 Ishikawa diagram: Low oil level in roller grinding

Just like the Ishikawa diagram, an FTA was developed as a complement to the FMECA analysis carried out with a specific focus on the mill body.

This tool allowed a deeper investigation by quantifying the probability of occurrence of the failure modes previously identified in the FMECA, through a logical tree structure. This approach proved particularly useful to understand which events carry the greatest statistical weight in causing the mill to stop.

It is important to highlight that this analysis was constructed based on historical shutdown data of the mill, recorded between January 2022 and April 2025. Unlike theoretical or estimation-based approaches, this analysis relied on concrete facts and records, allowing for more precise quantification of the causes that contributed most to system failures.

Through the fault tree analysis, it was clearly identified that the failure chain with the highest probability of occurrence is associated with the low oil level in the bearings, because of oil leaks caused by damaged seals. This failure mode, already highlighted as critical in the FMECA analysis and included in the Ishikawa diagram as one of the main causes, is now supported by concrete data obtained from the shutdown history.

The convergence of results obtained through qualitative (Ishikawa diagram), semi-quantitative (FMECA analysis), and quantitative (FTA analysis, Figure 3.8) approaches clearly validates the consistency of the conclusions of this study. The gathered evidence points to the need to strengthen monitoring and prevention of failures caused by oil leaks in the bearings, whose contribution to mill shutdowns is significant.

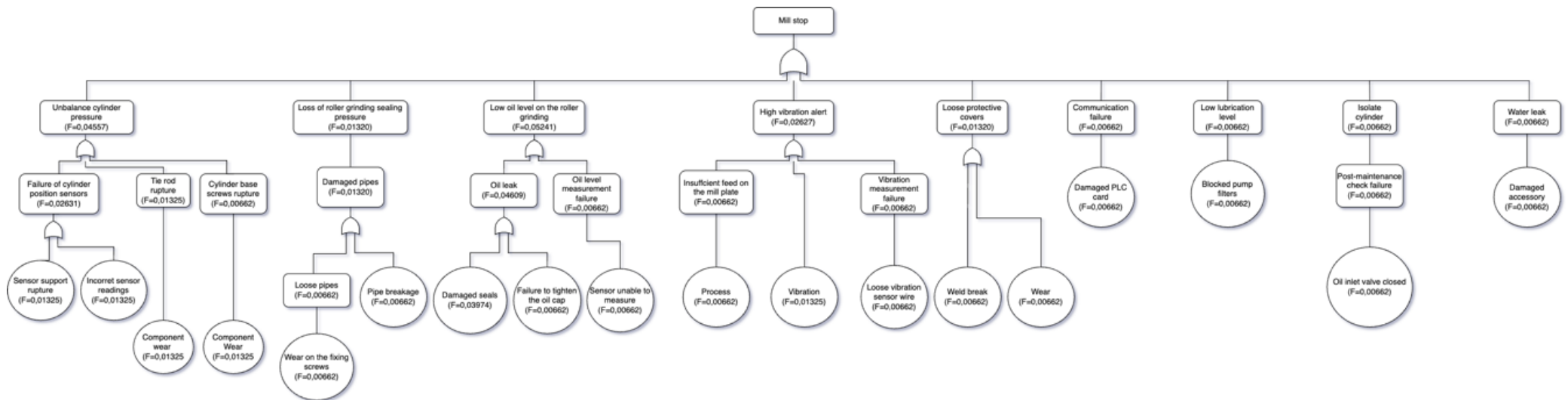


Figure 3.8 Fault tree analysis

4 Results

The reliability block diagram analysis identified the absence of redundancies in the raw mill. All equipment within the raw mill system is arranged in series, implying that the failure of any single component results in the shutdown of the entire mill.

The results obtained from the FMECA analysis revealed the failure modes with the greatest impact on operation: the tie rod breakage mode [15], which presents a high RPN due to its high severity and low detectability, and the oil leakage mode in the roller grindings, which exhibits a high RPN primarily due to its high occurrence rate.

Complementing the FMECA analysis, an Ishikawa diagram was used to further detail the causes of the low oil level failure mode in the roller grinding system.

Finally, the Fault Tree Analysis (FTA) confirmed that the failure mode with the highest probability of occurrence in the system is the oil leakage in the roller grindings, resulting from multiple combined failures. The application of OR logic demonstrated that the occurrence of any of the identified causes leads to the top event.

5 DISCUSSION

The results of this study demonstrate that the combined application of methodologies such as the RBD, FMECA, Ishikawa Diagram, and FTA enables a comprehensive understanding of potential failure modes in the raw mill. The absence of redundancy, identified through the RBD, amplifies the impact of isolated failures, reinforcing the importance of a preventive and structured maintenance approach.

The FMECA proved effective in identifying and prioritizing failure modes, while the Ishikawa Diagram clearly represented the possible root causes of the problem, particularly regarding the low oil level failure in the roller grinding system. The FTA complemented the process by providing logical and quantitative validation of failure mode probabilities. As described by several authors [5], [11], [12], [17], this approach aligns with international best practices in reliability management and the principles of Reliability-Centered Maintenance (RCM).

The study also highlights the importance of reliable and properly categorized historical data, whose continuous improvement will contribute to more rigorous and well-founded analyses in the future.

6 CONCLUSION

This study aimed to demonstrate the application of integrated methodologies in the management of industrial physical assets, specifically focusing on the analysis of a raw mill in a cement plant.

As previously mentioned in earlier chapters, this study was based on the use of four integrated methodologies with the goal of understanding and quantifying the existing failure modes in the selected equipment. Through this study, it was possible to confirm the absence of redundancies in this equipment, which contributes to an increased likelihood of equipment failure.

The low oil level in the roller grinding system was identified as the most recurrent failure mode, while the failure mode of tie rod breakage stood out as the most critical event in terms of severity, given its potential to cause severe damage and prolonged downtime.

As future actions, it is recommended to improve the digitization and categorization of failure modes to enable more precise and historically comparable analyses. Additionally, a review of preventive maintenance plans for the components associated with the most critical failure modes identified in this study is advised. Finally, the integration of predictive models through machine learning is recommended to detect possible deviations in operational patterns, thereby supporting decision-making based on real-time condition data of the assets aligning with the methodological evolution proposed by Farinha [13].

In this context, Schwendemann, Amjad & Sikora, provide comprehensive research on machine learning techniques for condition monitoring and predictive maintenance, illustrating the potential of AI-based approaches to improve fault detection and maintenance planning. [20]

These initiatives align with the principles of maintenance digitalization, the paradigms of Industry 4.0, and the natural evolution of maintenance towards a more intelligent, automated, and data-driven model [17], [16].

References

- [1] C. V. Pinto, Organização e gestão da manutenção. IAPMEI, 2002. Monitor. ISBN: 9789729413391.
- [2] IPQ - Instituto Português da Qualidade, “NP EN 13306:2021 - Manutenção: Terminologia de Manutenção,” Lisboa, 2021.
- [3] Stamatis, DH. (2003). *Failure Mode and Effect Analysis* (2nd ed.). ASQ Quality Press. Retrieved from <https://www.perlego.com/book/3772269/failure-mode-and-effect-analysis-fmea-from-theory-to-execution-pdf> (Original work published 2003)
- [4] P. C. Teoh and K. Case, “Failure modes and effects analysis through knowledge modelling,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 153–154, pp. 253–260, Oct. 2004, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.298.
- [5] International Electrotechnical Commission, *IEC 60812:2018 - Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA)*, 3rd ed. 2018. Accessed: May 05, 2025. [Online]. Available: www.iec.ch
- [6] Mikulak, R. J., McDermott, R., Beauregard, M. (2017). *The basics of FMEA*. New York: Productivity Press. ISBN: 9780429244773
- [7] A. S. Varde, J. Liang, Z. Yang, and R. D. Sisson, “Ishikawa, JESS, and Visual Analytics for Engineering,” 2021 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), pp. 6824–6826, Dec. 2022, doi: 10.1109/bigdata55660.2022.10020637.
- [8] E. Zio, An introduction to the basics of reliability and risk analysis. 2007. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics: Volume 13. <https://doi.org/10.1142/6442>
- [9] International Electrotechnical Commission, *IEC 61025:2006 Fault tree analysis (FTA)*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2006.
- [10] C. A. Ericson, Fault Tree Analysis primer. CreateSpace Independent Publishing Platform. 2011. ISBN-13: 978-1466446106 2011.
- [11] H. Soltanali, M. Khojastehpour, J. T. Farinha, and J. E. De Almeida E Pais, “An Integrated Fuzzy Fault Tree Model with Bayesian Network-Based Maintenance Optimization of Complex Equipment in Automotive Manufacturing,” *Energies*, vol. 14, no. 22, p. 7758, Nov. 2021, doi: 10.3390/en14227758.
- [12] H. Raposo, J. T. Farinha, I. Fonseca, and D. Galar, “Predicting condition based on oil analysis – A case study,” *Tribology International*, vol. 135, pp. 65–74, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.triboint.2019.01.041.
- [13] J. M. T. Farinha, Asset maintenance engineering methodologies. 2018. doi: 10.1201/9781315232867.
- [14] P. Pareek and V. S. Sankhla, “Review on vertical roller mill in cement industry & its performance parameters,” *Materials Today Proceedings*, vol. 44, pp. 4621–4627, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.916.
- [15] R. Barata, R. F. Martins, T. Albarran, T. Santos, and A. Mourão, “Failure analysis of a pull rod actuator of an ATOX raw mill used in the cement production process,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 76, pp. 99–114, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.engfailanal.2016.12.023.
- [16] N. H. A. Wahab et al., “Systematic review of predictive maintenance and digital twin technologies challenges, opportunities, and best practices,” *PeerJ Computer Science*, vol. 10, p. e1943, Apr. 2024, doi: 10.7717/peerj-cs.1943.
- [17] I. Hector and R. Panjanathan, “Predictive maintenance in Industry 4.0: a survey of planning models and machine learning techniques,” *PeerJ Computer Science*, vol. 10, p. e2016, May 2024, doi: 10.7717/peerj-cs.2016.
- [18] T. Gotoro and A. W. Labib, “A Hybrid Model for Designers to Learn from Failures: A Case of a High Potential Fire Incident at an Underground Hard Rock Mine,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 8, p. 4577, Apr. 2025, doi: 10.3390/app15084577.
- [19] A. S. Maihulla, I. Yusuf, and M. K. B. Chong, “Reliability Evaluation of cement production system using RAM analyses,” *International Journal of Applied and Computational Mathematics*, vol. 11, no. 4, Jun. 2025, doi: 10.1007/s40819-025-01945-3.
- [19] A. S. Maihulla, I. Yusuf, and M. K. B. Chong, “Reliability Evaluation of cement production system using RAM analyses,” *International Journal of Applied and Computational Mathematics*, vol. 11, no. 4, Jun. 2025, doi: 10.1007/s40819-025-01945-3.
- [20] S. Schwendemann, Z. Amjad, and A. Sikora, “A survey of machine-learning techniques for condition monitoring and predictive maintenance of bearings in grinding machines,” *Computers in Industry*, vol. 125, p. 103380, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.compind.2020.103380.

Anexo VI: Resumo do Artigo apresentado no 18º Congresso Nacional de Manutenção

Análise de Falhas de um Moinho do Cru com Ênfase nas Seguintes Ferramentas: 5 Porquês e FMECA - Estudo de Caso

Paulo Duarte¹, Hugo Raposo^{1,2}, Torres Farinha^{1,2}

¹ Polytechnic University of Coimbra, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Rua da Misericórdia, Lagar dos Cortiços, S. Martinho do Bispo, 3045-093 Coimbra, Portugal.

² RCM²⁺ Research Centre in Asset Management and System Engineering, Polytechnic University of Coimbra, Coimbra, 3030-199 Coimbra, Portugal

Corresponding authors

paulo.j.duarte98@gmail.com; hugo.raposo@isec.pt; tfarinha@isec.pt

Resumo

A indústria cimenteira enfrenta desafios relacionados com a necessidade de aumentar a eficiência, garantir uma elevada disponibilidade de equipamentos, reduzir custos e diminuir o impacto ambiental. Neste contexto, a gestão de ativos desempenha um papel fundamental na promoção da melhoria contínua, garantindo a continuidade do processo produtivo e a sustentabilidade das operações.

No setor do cimento, a gestão de ativos físicos é particularmente exigente devido à dimensão, complexidade e criticidade de equipamentos como fornos e moinhos. O moinho do cru, responsável pela moagem das matérias-primas que alimentam o forno de clínquer, destaca-se como um dos ativos mais críticos. As avarias neste equipamento podem resultar em longos períodos de indisponibilidade, baixa qualidade do produto e aumento dos custos operacionais.

Neste estudo é apresentada uma análise segundo duas ferramentas, nomeadamente os 5 Porquês e a FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) do moinho do cru (moinho rolos verticais) num centro de produção de cimento. A metodologia permitiu identificar os principais modos de falha, avaliar os seus efeitos e determinar a criticidade com base na ocorrência, severidade e detetabilidade, resultando no cálculo do Número de Prioridade de Risco (RPN). Foram também utilizadas ferramentas complementares como a Análise de Árvore de Falhas e o Diagrama de Ishikawa para uma análise mais detalhada, com o objetivo de melhorar a análise das causas e efeitos dos modos de falha encontrados.

Esta análise revelou-se essencial na identificação dos modos de falha mais críticos, servindo de base para futuras reformulações das estratégias de manutenção. Espera-se que, a médio prazo, a implementação destas medidas contribua para uma maior fiabilidade e disponibilidade dos equipamentos. Por outro lado, o estudo demonstrou que o atual sistema de classificação de avarias é demasiado simplista, sendo recomendada a sua revisão para melhorar a precisão da análise e a eficácia das ações implementadas.

Palavras-Chave: Indústria Cimenteira, Moinho do cru, Manutenção, 5 Porquês, FMECA.



**Instituto Superior
de Engenharia**

Politécnico de Coimbra