



**Instituto Superior
de Engenharia**

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Aplicação de Técnicas de Análise de Falhas para
Reestruturação de Planos de Manutenção: Caso de
Estudo numa Caldeira de Recuperação na Biotek**

Relatório de Estágio para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Especialização em Projeto, Instalação e Manutenção de Sistemas
Térmicos

Autor

Vânio Guilherme Paulo Da Silva

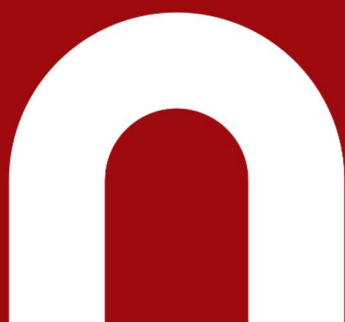
Orientador

Professor Doutor António Santos Simões

Supervisor na empresa

Engenheiro Duarte Dias

Coimbra, Abril 2026



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, Ana José Guilherme, cuja presença e amor incondicional foram fundamentais em cada etapa desta caminhada.

Sua força, dedicação e sabedoria sempre me inspiraram a seguir em frente, mesmo diante das maiores dificuldades. Agradeço por todos os sacrifícios, pelo apoio constante e por acreditar em mim com uma confiança que tantas vezes me sustentou.

Este trabalho é fruto de todos os valores que você me transmitiu e das oportunidades que você sempre se esforçou para me proporcionar. Obrigado por ser minha maior incentivadora e pelo amor que me motiva a buscar o melhor. Esta conquista é, antes de tudo, sua. Amo-te mãe.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a minha família (irmãos), a todos que contribuíram para a realização deste estágio e para o desenvolvimento deste relatório. Em especial, agradeço à equipe da Biotek (Altri), por ter me acolhido com tanto profissionalismo e generosidade, proporcionando um ambiente de aprendizado dinâmico e colaborativo.

Agradeço especialmente ao meu supervisor da empresa, Engenheiro Duarte Dias, pela orientação constante, pelo compartilhamento de conhecimentos valiosos e pelo apoio ao longo de todas as fases deste projeto. Sua expertise e paciência foram essenciais para meu crescimento profissional e pessoal, e sua dedicação inspiradora me impulsionou a dar o meu melhor em cada etapa.

Agradeço também aos meus colegas de equipe, que se mostraram sempre dispostos a compartilhar ideias, esclarecer dúvidas e colaborar no desenvolvimento do projeto. A experiência de trabalhar ao lado de profissionais tão dedicados e competentes foi enriquecedora e contribuiu imensamente para minha formação.

Finalmente, deixo um agradecimento à minha instituição de ensino e ao meu orientador acadêmico, Professor Doutor António Simões, por toda a orientação e suporte. Sem o incentivo e o apoio de todos, este estágio e o aprendizado adquirido ao longo dele não seriam possíveis.

A todos, minha sincera gratidão.

RESUMO

O presente relatório visa descrever as atividades desenvolvidas durante o estágio curricular na empresa Biotek, no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica, com especialização em Projeto, Manutenção e Instalação de Sistemas Térmicos. A etapa teve como foco Aplicação de Técnicas de Análise de Falhas para Reestruturação de Planos de Manutenção: Caso de Estudo numa Caldeira de Recuperação na Biotek.

Os principais objetivos deste estágio foram adquirir e aplicar conhecimentos teóricos/técnicos sobre o funcionamento, manutenção e otimização de caldeiras de recuperação, com ênfase na sua eficiência energética e na sustentabilidade do processo industrial. Para tal, foram abordadas atividades relacionadas com a inspeção e análise de desempenho da caldeira, a implementação de planos de manutenção preventiva e corretiva.

Ao longo do estágio, foi realizada uma avaliação crítica das condições de funcionamento da caldeira, com a proposta de melhorias para o seu desempenho, reduzindo o tempo de paragem para manutenção e avarias, melhorando a fiabilidade do equipamento e aumentando a vida útil do sistema. Adicionalmente, foram seguidos os procedimentos de segurança aplicáveis aos sistemas térmicos, bem como a análise de dados operacionais para a elaboração de relatórios técnicos.

Este estágio passou a consolidar os conhecimentos teóricos adquiridos no curso de mestrado e desenvolvimento de competências práticas, essenciais para a carreira profissional na área de engenharia mecânica, com foco em sistemas térmicos e manutenção industrial. O relatório detalha as etapas do processo de aprendizagem, os desafios enfrentados e as soluções inovadoras, bem como as consequências deste acompanhamento técnico.

Palavra-chave: Caldeira de recuperação, eficiência energética, manutenção industrial.

ABSTRACT

This report aims to describe the activities carried out during the curricular internship at the company Biotek, within the scope of the master's degree in mechanical engineering, with a specialization in Design, Maintenance, and Installation of Thermal Systems. The internship focused on the Application of Failure Analysis Techniques for the Restructuring of Maintenance Plans: A Case Study on a Recovery Boiler at Biotek.

The main objectives of this internship were to acquire and apply theoretical and technical knowledge regarding the operation, maintenance, and optimization of recovery boilers, with an emphasis on their energy efficiency and the sustainability of the industrial process. To this end, activities related to the inspection and performance analysis of the boiler were carried out, along with the implementation of preventive and corrective maintenance plans.

Throughout the internship, a critical evaluation of the boiler's operating conditions was conducted, with proposed improvements aimed at enhancing its performance, reducing downtime due to maintenance and failures, increasing equipment reliability, and extending the system's lifespan. In addition, applicable safety procedures for thermal systems were followed, and operational data were analyzed to prepare technical reports.

This internship provided an opportunity to consolidate theoretical knowledge acquired during the master's program and to develop practical skills essential for a professional career in mechanical engineering, particularly in the areas of thermal systems and industrial maintenance. The report details the learning process stages, the challenges encountered, innovative solutions applied, and the outcomes of the technical follow-up.

Keywords: Recovery boiler, energy efficiency, industrial maintenance.

ÍNDICE

Dedicatória	i
Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract.....	iv
Índice De Figuras	ix
Índice De Tabela	xii
Lista de siglas e acrónimos	xiii
1 Introdução	1
1.1 Objetivos do Relatório	2
1.2 Justificação da Escolha da Empresa	2
1.3 Enquadramento do Estágio no Plano de Estudos do Mestrado em Engenharia Mecânica	3
2 Caracterização da Empresa.....	4
2.1 Breve História e Missão.....	4
2.2 Estrutura Organizacional da Biotek.....	4
2.3 Área de Atuação e Principais Produtos e Serviços	6
2.3.1 Matéria-prima.....	6
2.3.2 Descrição Geral do Processo Produtivo	7
2.4 Captação e Tratamento de Águas	19
2.5 ETAR.....	19
2.5.1 Outros Equipamentos de Proteção Ambiental	21
2.6 Aterro Resíduos.....	22
2.7 Modelo de Gestão da Empresa	22
2.8 Sistemas de Gestão da Biotek.....	23
2.9 A Proteção do Ambiente.....	23
2.10 O Sistema de Gestão Energético	24
3 Contextualização do Estágio	25
3.1 Duração e Cronograma	25
3.2 Departamentos Envolvidos	26
3.3 Orientador, Supervisor e Formadores na Empresa.....	26
3.4 Objetivos Específicos do Estágio	27

4	Revisão da literatura.....	28
4.1	Estado da Arte.....	28
4.2	A Indústria da Celulose e o Processo Kraft.....	28
4.3	Processo da Recuperação Kraft	30
4.4	Caldeiras de Recuperação Química.....	30
4.5	Evolução das Tecnologias de Recuperação Química e Caldeiras de Recuperação	32
4.6	Princípios Termodinâmicos Aplicados a Sistemas Térmicos.....	34
4.7	Eficiência da Caldeira e Manutenção do Sistema.....	35
4.8	Métodos de Determinação da Eficiência Térmica de Caldeiras de Recuperação	36
4.8.1	Método Direto	36
4.8.2	Método Indireto	37
4.8.3	Considerações Técnicas.....	37
4.9	Problemas Operacionais.....	39
4.10	Black Liquor Recovery Boiler Advisory Committee (BLRBAC).....	39
4.11	Sustentabilidade e a Contribuição das Caldeiras de Recuperação.....	40
4.12	Conceitos Teóricos da Manutenção	43
4.12.1	Introdução à Manutenção	43
4.12.2	Evolução da Manutenção	43
4.12.3	Conceito Gerais da Manutenção	45
4.12.4	Ciclo de Vida.....	49
4.12.5	Plano de Manutenção.....	49
4.12.6	Gestão da Manutenção	50
4.12.7	Manutenção Estratégica.....	51
4.12.8	Fase Preparatória da Manutenção: Documentação, Procedimentos e Recursos.....	51
4.12.9	Gestão da Manutenção com Base em KPI	53
4.12.10	Melhores Práticas.....	53
4.12.11	Níveis de Manutenção.....	54
4.12.12	Expectativas Económicas da Manutenção	56
4.12.13	Manutenção Preditiva	57
4.12.14	Vantagens da Abordagem Preditiva	62
4.12.15	Desafios e Limitações	62

5	Atividades Desenvolvidas	64
5.1	Manutenção na Biotek.....	64
5.1.1	Departamento da Manutenção	64
5.1.2	Organização dos Tipos de Manutenção - Biotek	65
5.1.3	Gestão da manutenção	73
5.1.4	Fiabilidade na Biotek.....	76
5.2	Estudo de Caso – Aplicação de Técnicas de Análise de Falhas para Reestruturação de Planos de Manutenção numa Caldeira de Recuperação	78
5.3	Ferramentas e Metodologias Utilizadas.....	79
5.3.1	Aplicação da Análise de Pareto na Zona 2 da Caldeira de Recuperação.....	82
5.3.2	Análise dos Tipos de Avarias nas Unidades Funcionais.....	83
5.3.3	Análise Temporal das Ocorrências de Avarias nas Unidades Funcionais.....	90
5.3.4	Identificação e Análise das Causas de Falhas.....	92
5.3.5	Integração da Análise de Ishikawa com a Metodologia dos 5 Porquês	95
5.3.6	Análise de Fiabilidade com a Distribuição de Weibull	96
5.3.7	Avaliação do Nível de Criticidade das Unidades Funcionais e Priorização das Ações.....	98
5.3.8	Análise de Custo de Manutenção	99
5.4	Estudo de Caso: Sistema de Fornecimento de Ar Primário	100
5.5	Estudo de Caso: Sopradores de Fuligem na Caldeira de Recuperação ...	101
5.6	Análise do Plano de Manutenção das Unidades Funcionais	102
5.7	Proposta de Otimização do Plano de Manutenção Preventiva.....	103
5.7.1	Cálculo do MTBF e Taxa de Falha com Base em Dados de Falhas Mensais: Exemplo Prático para o Ano de 2024.....	104
5.7.2	Análise de Desempenho das Unidades Funcionais.....	105
5.8	Propostas de Melhorias Operacionais e nas Unidades Funcionais.....	106
5.8.1	Padronização das Montagens (Exemplo: Montagem da Válvula Polpet) 106	
5.8.2	Melhoria nos Autómatos de Limpeza do Ar Secundário (Adição de Suporte) 107	
5.8.3	Proposta de Modificação da Proteção dos Sopradores de Fuligem. 110	

5.9	Paragem Anual da Caldeira de Recuperação 2025	112
5.9.1	Análise de Registos de Intervenções Anteriores	113
5.9.2	Avaliação de Componentes Críticos	113
5.9.3	Inspeção de Áreas Vulneráveis	113
5.9.4	Avaliação Preditiva dos Tubos da Caldeira	113
5.10	Análise e Resultados	114
6	Reflexões sobre o Estágio.....	116
6.1	Dificuldades Enfrentadas	116
6.2	Competências Adquiridas	116
6.3	Relação entre Teoria e Prática	117
6.4	Contributo para a Empresa e para o Desenvolvimento Pessoal.....	117
7	Autoavaliação e Sugestões	119
7.1	Avaliação Global da Experiência	119
7.2	Impacto no Percorso Académico e Profissional.....	119
7.3	Sugestões para Futuros Estagiários.....	120
8	Conclusão	122
8.1	Síntese dos Principais Pontos	122
8.2	Cumprimento dos Objetivos Iniciais.....	122
8.3	Considerações Finais	123
	Bibliografia	124
	Anexo A.....	127
	Anexo B	128
	Anexo C.....	133
	Anexo D	135
	Anexo E.....	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Instalações da Biotek.	4
Figura 2.2 – Estrutura Organizacional da Biotek. Fonte: Biotek, 2025.....	5
Figura 2.3 – Processo de receção, verificação e armazenamento de matéria-prima na empresa Biotek.....	6
Figura 2.4 – Fluxograma de funcionamento da Biotek. Fonte: Biotek, 2025.....	8
Figura 2.5 – Cozimento Modificado Lo-Solids. Fonte: Biotek, 2025.....	10
Figura 2.6– Lavagem e crivagem. Fonte: Biotek, 2025.....	11
Figura 2.7 – Fluxograma Geral do Branqueamento. Fonte: Biotek, 2025.	12
Figura 2.8 – a) Processo de crivagem; b) Secção de secagem.	13
Figura 2.9 - Caldeira de Recuperação Biotek.	17
Figura 2.10– Representação esquemática do tratamento de água fabril. Fonte: Biotek, 2025.	19
Figura 2.11 – Representação esquemática do tratamento primário. Fonte: Biotek, 2025.	20
Figura 2.12 – Representação esquemática do tratamento secundário. Fonte: Biotek, 2025.	21
Figura 2.13 – Representação 3D da ETAR da Biotek (sem tratamento primário). Fonte: Biotek, 2025.	21
Figura 3.1 – cronograma distribuição temporal das fases e a respetiva carga horária mensal	25
Figura 4.1– Processo de Cozimento Kraft. Fonte: Adaptado de (Vakkilainen, 2007).	29
Figura 4.2– Processo da Recuperação Kraft.	30
Figura 4.3– Caldeira de Recuperação. Fonte: Adaptado de (Praszkier, 2011).	31
Figura 4.4– Representação Ciclo Rankine. Fonte: Adaptado de (Ardila e Alberto, 2016).....	34
Figura 4.5 – Limites típicos do sistema para uma CR. Fonte: Adaptado (Ahtila, 2011).	38
Figura 4.6– a) Consumo de energia final em 2022; b) Consumo de energia final em 2024. Fonte: DGEG, 2024.....	42
Figura 4.7– Revoluções industriais. Fonte: (Machado et. al, 2023).....	44

Figura 4.8 – Pilares e ferramentas da manutenção prescritiva. Fonte: (Machado et. al, 2023).....	46
Figura 4.9 – Ciclo de vida do equipamento.....	49
Figura 4.10 – Diagrama de fluxo da manutenção. Fonte: NP EN 13460:2009.	50
Figura 4.11 - Fase Preparatória da Manutenção: Documentação, Procedimentos e Recursos. Fonte: NP EN 13460:2009 — Documentação para a Manutenção.	52
Figura 4.12 – Matriz de Maturidade do PDM. Fonte: Adaptado (PricewaterhouseCoopers, 2017).....	58
Figura 4.13 – Termografia em Motor elétrico. Fonte: (Okada, 2020).	60
Figura 4.14 – Aplicação de análise ultrassônica. Fonte: (Barulho, 2011).....	62
Figura 5.1– Organograma Hierárquico - Tipos de manutenção existentes na Biotek.	65
Figura 5.2 – Análise de amplificação de movimento (Vibração). Fonte: Biotek, 2025.	69
Figura 5.3 – Análise acústica (Ruído anormais). Fonte: Biotek, 2025.....	69
Figura 5.4 – Análise Baker. Fonte: Biotek, 2025.....	70
Figura 5.5– Teste de líquido penetrante. Fonte: Biotek, 2025.....	72
Figura 5.6 - Interface principal do software de gestão IBM Maximo. Fonte: Biotek, 2025.....	73
Figura 5.7 – Interface do IBM Maximo para gestão de inventário e pedidos de material. Fonte: Biotek, 2025.	75
Figura 5.8 – Interface do IBM Maximo para emissão e controle de ordens de trabalho. Fonte: Biotek, 2025.....	76
Figura 5.9 – Análise estatística de ocorrência de avarias das unidades funcionais ..	80
Figura 5.10 – Aplicação de gráfico de Pareto para análise estatística de avarias.	81
Figura 5.11 – Autômatos de limpeza de caldeira de recuperação.....	83
Figura 5.12 – Sopradores de fuligem da caldeira de recuperação.....	84
Figura 5.13 – Evacuação de smelt na caldeira de recuperação.	86
Figura 5.14 – Queimador de licor da caldeira de recuperação.....	87
Figura 5.15 – Queimadores de arranque da caldeira de recuperação.....	89
Figura 5.16 – Análise temporal do fornecimento de ar primário e secundário.	90
Figura 5.17 – Melhorias implementadas nos sopradores da unidade funcional de fornecimento de ar.	91
Figura 5.18 – Análise temporal dos sopradores da parede esquerda e direita da caldeira de recuperação.....	92

Figura 5.19 – Número de avarias anuais do queimador de licor.	92
Figura 5.20 – Análise de avarias com Diagrama de Ishikawa.	94
Figura 5.21 – Distribuição de Weibull.	97
Figura 5.22 – Correlação entre a frequência das falhas e os custos de manutenção.	100
Figura 5.23 – Plano de manutenção unidade funcional queimador de arranque...	102
Figura 5.24 – Plano de manutenção unidade funcional evacuação de smelt.	103
Figura 5.25 – Fuga na válvula polpet.	107
Figura 5.26 – Desgaste prematuro dos autómatos de limpeza.	108
Figura 5.27 – Desgaste prematuro dos autómatos de limpeza.	108
Figura 5.28 - Desgaste prematuro dos autómatos de limpeza.	109
Figura 5.29 – Modificação dos encaixes das proteções dos sopradores.....	111
Figura 5.30– Implementação de partes moveis nos sopradores.....	112
Figura 5.31 – Modificação de partes traseira dos sopradores.	112

ÍNDICE DE TABELA

Tabela 4.1– Comparação entre tipos de manutenção. Fonte: Adapta de (Machado <i>et. al</i> , 2023).....	47
Tabela 5.1 – Algumas unidades funcionais da caldeira de recuperação Biotek.	79
Tabela 5.2 – Unidades Funcionais com maior número de ocorrências por avarias.	82
Tabela 5.3 – Tipos de avarias nos autómatos de Limpeza.	84
Tabela 5.4 – Tipos de avarias nos sopradores de fuligem.	85
Tabela 5.5 – Tipos de avarias, Evacuação de smelt.....	86
Tabela 5.6 – Tipos de avarias Queimador de licor.....	88
Tabela 5.7 – Tipos de avarias Queimador de Arranque	89
Tabela 5.8 – Redução percentual anual fornecimento de ar (2019–2024).	91
Tabela 5.9 – Comparação entre Condições de Operação, Projeto e Propriedades dos Lubrificantes dos sopradores.	96
Tabela 5.10 – Descrição do nível de criticidade.	98
Tabela 5.11 – Descrição do nível de criticidade.	99
Tabela 5.12 – Avaliação do custo de manutenção Fornecimento de ar primário.	101
Tabela 5.13 – Dados dos cálculos de MTBF e MTTR dos Sopradores.	105
Tabela 5.14 – Dados dos cálculos de MTBF, MTTR e disponibilidade dos autómatos e sopradores.	106

LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

CMMS	Computerized Maintenance Management System
Cl	Cloro
D	Disponibilidade
DM-M	Departamento de mecânica
ERP	Sistema Internacional de Unidades
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
ETARI	Estação de Tratamento de Águas Residuais Industriais
IOT	Internet of Things (Internet das Coisas)
IBM Maximo	Sistema de Gestão de Manutenção Assistida por Computador
MT	Partícula magnética
MTBF	Mean time between failures
MTTR	Mean time to repair
OE	Ordem de execução
PdM	Manutenção preditiva
PT	Penetrant Testing
RCA	Análise de causa raiz
RUL	Remaining Useful Life
SKF-IMX	Sistema de monitorização de condição e manutenção preditiva da SKF
SKF-IXIOS	Monitorização de condição e manutenção preditiva da SKF
SPM	Statistical Process Monitoring
SAP	Systems, Applications and Products in Data Processing
SMS	Saúde, Meio Ambiente e Segurança
WSBP	Wireless Sensor-Based Predictive

Aplicação de Técnicas de Análise de Falhas para Reestruturação de Planos de Manutenção: Caso de Estudo numa Caldeira de Recuperação na Biotek

“Todo o texto do documento é da autoria do autor, sendo que a revisão do texto usou-se a IA ChatGPT”

1 INTRODUÇÃO

Este relatório tem como finalidade apresentar o trabalho realizado durante o estágio curricular na empresa Biotek, como parte do plano de estudos do Mestrado em Engenharia Mecânica, com especialização em Projeto, Manutenção e Instalação de Sistemas Térmicos. A oportunidade de integrar em ambiente industrial proporcionou a aplicação prática de conceitos teóricos e o desenvolvimento de competências técnicas relacionadas com sistemas térmicos, em particular no Aplicação de Técnicas de Análise de Falhas para Reestruturação de Planos de Manutenção.

A caldeira de recuperação desempenha um papel crucial na indústria, especialmente no que diz respeito à eficiência energética, uma vez que permite aproveitar o calor residual dos gases de exaustão, transformando-o em energia útil para diversos processos. Neste contexto, a gestão adequada deste tipo de equipamento é essencial para garantir a continuidade operacional, a otimização do consumo de recursos e a minimização de impactos ambientais.

O principal objetivo deste estágio consistiu na aplicação de técnicas de análise de falhas para a reestruturação dos planos de manutenção de uma caldeira de recuperação. Para tal, foram acompanhadas as atividades de operação, manutenção e preparação do equipamento, com vista à melhoria do seu desempenho e à garantia da sua fiabilidade a longo prazo. O estágio proporcionou ainda uma imersão em metodologias de diagnóstico, estratégias de manutenção preventiva e corretiva, bem como na análise do desempenho energético — elementos fundamentais para assegurar a eficiência e a longevidade do sistema térmico.

Ao longo deste relatório, serão apresentados os métodos e as abordagens utilizados no acompanhamento do equipamento, as intervenções realizadas, os desafios encontrados e as soluções implementadas para otimizar o seu funcionamento. O documento também reflete sobre a importância da integração entre o conhecimento teórico e a prática industrial, destacando os benefícios obtidos pela experiência de campo no contexto da engenharia mecânica.

1.1 Objetivos do Relatório

Objetivo Geral

Desenvolver competências práticas e técnicas na manutenção e operação de caldeiras de recuperação, no contexto mais amplo dos equipamentos térmicos, com ênfase na aplicação de técnicas de análise de falhas para a reestruturação de planos de manutenção. Pretende-se, assim, contribuir para a otimização dos processos operacionais, o aumento da eficiência energética e o reforço da segurança industrial, salientando a importância de ações preventivas e corretivas que assegurem o funcionamento fiável e sustentável destes sistemas térmicos.

Objetivos Específicos

1. Aprofundar o conhecimento sobre os sistemas de caldeiras de recuperação:

Compreender a teoria e o funcionamento dos componentes mecânicos da caldeira (como economizadores, barrilete de vapor, sobreaquecedores, entre outros).

2. Executar atividades de manutenção preventiva e preditiva:

Acompanhar as inspeções periódicas da caldeira, verificando a integridade mecânica dos componentes e sistemas (tubagens, válvulas, etc.).

Participar em atividades de lubrificação e substituição de peças desgastadas.

3. Desenvolver competências na resolução de problemas mecânicos:

Estudar falhas comuns em sistemas de caldeiras de recuperação e as respetivas soluções, seja através de reparações ou substituições.

Participar em manutenções corretivas e intervenções mecânicas, tais como o reparo de fugas, substituição de componentes e ajustes na tubagem.

1.2 Justificação da Escolha da Empresa

A escolha da **Biotek – Empresa de Celulose do Tejo S.A.**, unidade do grupo **Altri**, para a realização do estágio curricular no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica, foi motivada pela sua posição de destaque no setor da produção de pasta de papel e pela relevância dos seus processos industriais para a aplicação prática dos conhecimentos adquiridos ao longo do curso.

A Biotek é reconhecida pela sua forte aposta na inovação tecnológica, na sustentabilidade ambiental e na eficiência dos seus processos industriais, integrando soluções modernas de engenharia em diversos setores operacionais. A unidade onde o estágio decorreu está equipada com sistemas avançados de produção e manutenção, entre os quais se destaca a **caldeira de recuperação**, elemento central no processo produtivo baseado no **ciclo Kraft**. Esta caldeira desempenha um papel essencial na recuperação de produtos químicos e na geração de energia térmica, sendo um dos ativos críticos da unidade industrial.

A oportunidade de integrar no departamento de **manutenção mecânica** da Biotek permitiu o contacto direto com equipamentos de elevada complexidade e criticidade operacional, proporcionando uma experiência formativa enriquecedora e alinhada com os objetivos do mestrado.

1.3 Enquadramento do Estágio no Plano de Estudos do Mestrado em Engenharia Mecânica

O estágio curricular realizado constitui uma componente essencial do plano de estudos do Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC), correspondendo a **60 ECTS**. Esta unidade curricular visa proporcionar ao estudante uma experiência prática em ambiente industrial, permitindo a aplicação dos conhecimentos teóricos adquiridos ao longo do curso e o desenvolvimento de competências técnicas e profissionais.

O estágio foi realizado no departamento de **manutenção mecânica** da Biotek, com foco na análise e acompanhamento da **caldeira de recuperação**, equipamento central no processo produtivo baseado no **ciclo Kraft**. A realização deste estágio permitiu aprofundar conhecimentos nas áreas de manutenção industrial, análise de falhas, gestão de ativos e processos térmicos, alinhando-se com os objetivos formativos do mestrado.

2 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA

2.1 Breve História e Missão

A Biotek, S.A. tem a sua sede em Vila Velha de Ródão, cerca de 30 km de Castelo Branco. Atualmente possui uma área total de 80ha, na qual 25 dos quais ocupados por instalação fabril, excluindo aterros. Uma empresa que tem como missão o fornecimento de pastas celulósicas de eucalipto e de pinho de alta qualidade, produzidas de forma económica e ambientalmente sustentáveis, satisfazendo os requisitos e as expectativas dos clientes.



Figura 2.1 – Instalações da Biotek.

A empresa foi constituída em 23 de novembro de 1965 designada por Celtejo-Companhia de Celulose do Tejo, SARL e teve o seu início produtivo em 24 de fevereiro de 1971, inaugurada em 23 de outubro do mesmo ano e depois foi nacionalizada em 9 de maio de 1975. passando por várias transformações foi então apenas em 25 de outubro de 2021 que passou a se chamar por Biotek é uma empresa que faz parte do grupo Altri, SGPS, SA desde 12 de junho de 2005.

2.2 Estrutura Organizacional da Biotek

A estrutura organizacional da Biotek reflete uma abordagem funcional, orientada para a eficiência operacional, a inovação tecnológica e a qualidade dos serviços prestados no setor industrial em que atua. A empresa está segmentada em departamentos especializados, cada um com responsabilidades bem definidas, o que

permite uma gestão integrada dos processos produtivos, de manutenção e de desenvolvimento de projetos.

Durante o estágio curricular, foi possível observar uma comunicação clara entre os diferentes níveis hierárquicos, promovendo uma coordenação eficaz entre os departamentos técnico, de produção, manutenção, qualidade e projetos. Esta articulação é fundamental para garantir a fiabilidade dos equipamentos e a implementação de estratégias de manutenção, como a manutenção preventiva, que constituíram o foco principal do presente estágio.

A organização interna da Biotek facilita ainda o trabalho colaborativo com empresas subcontratadas, como é o caso das entidades responsáveis pela monitorização de vibrações e pela lubrificação dos equipamentos. A existência de um Departamento de Projetos bem estruturado permite a análise detalhada de relatórios técnicos, contribuindo para decisões baseadas em dados e para a melhoria contínua da performance dos sistemas industriais.

Abaixo apresenta-se o organograma da empresa, que ilustra de forma clara a distribuição das funções e os fluxos de comunicação entre as diversas unidades organizacionais:

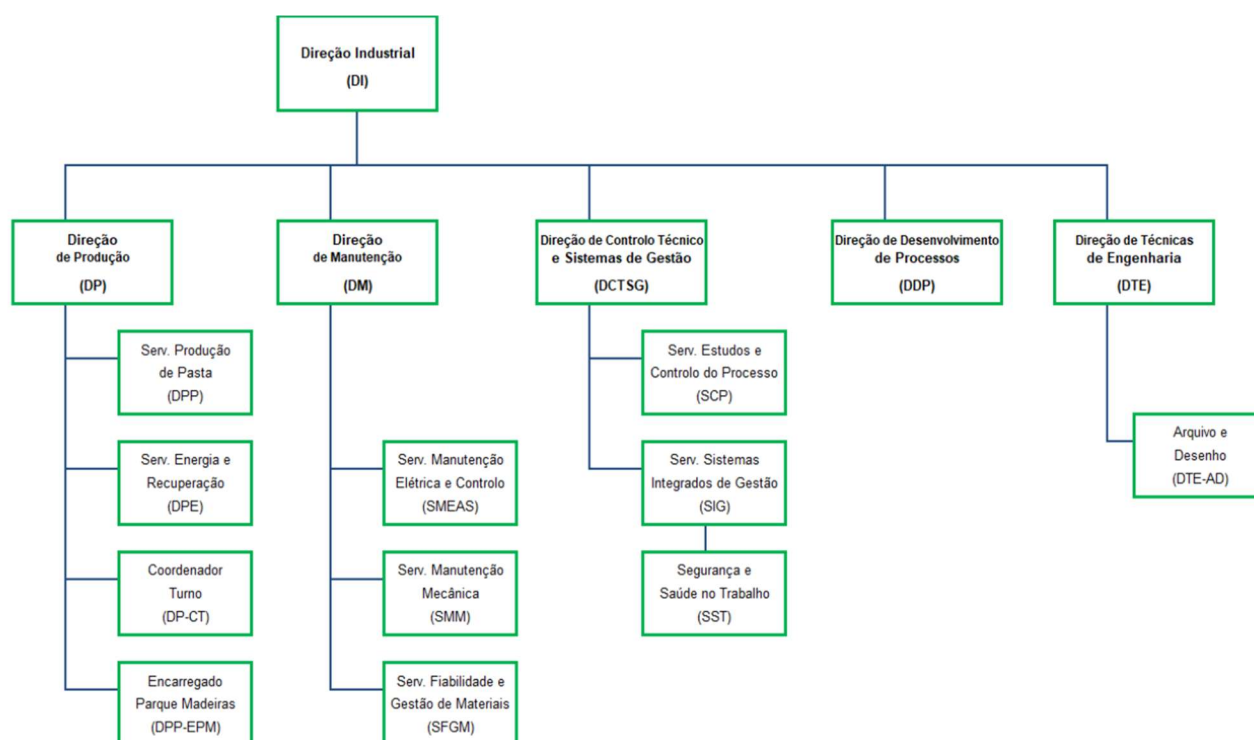


Figura 2.2 – Estrutura Organizacional da Biotek. Fonte: Biotek, 2025

2.3 Área de Atuação e Principais Produtos e Serviços

2.3.1 Matéria-prima



Figura 2.3 – Processo de receção, verificação e armazenamento de matéria-prima na empresa Biotek.

Na Biotek, a floresta representa a única fonte de matéria-prima para a produção de pasta para papel, o que torna essencial a implementação de práticas de gestão florestal rigorosas e sustentáveis. Esta necessidade decorre do elevado consumo anual de madeira necessário para a produção, exigindo, por isso, a adoção de métodos eficientes para otimizar a capacidade produtiva florestal. A empresa, segue modelos silvícolas que garantem uma exploração sustentável, assegurando que as operações estão em conformidade com as melhores práticas florestais.

A Biotek tem um compromisso claro com a promoção e incentivo das boas práticas de exploração florestal, cumprindo integralmente as normas internacionais de certificação. A empresa adotou o Sistema de Gestão exigido pelas normas FSC (Forest Stewardship Council) e PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification), pelo qual está certificada, garantindo uma gestão responsável da cadeia de custódia e a utilização de madeira controlada.

Consoante o tipo de pasta a ser produzida, a Biotek recorre à utilização de matérias-primas de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) ou de pinho (*Pinus pinaster*). A classificação das pastas em *pastas EUCA* (produzidas a partir de eucalipto) e *pastas PINE* (produzidas a partir de pinho) baseia-se no tipo de matéria-prima utilizada.

Na Biotek, a produção de pasta segue um processo de branqueamento específico, o qual resulta na produção preferencial de determinados tipos de pasta, conforme as exigências do mercado e os critérios de sustentabilidade. A empresa garante que todos os seus processos respeitam os mais elevados padrões ambientais, oferecendo ao mercado produtos de alta qualidade, ao mesmo tempo que mantém o compromisso com a preservação dos recursos florestais e a promoção de práticas responsáveis e sustentáveis.

Em função do processo de branqueamento aplicado, a Biotek prefere produzir, para o mercado, os seguintes tipos de pasta:

➤ ***EUCA-TCF***

A empresa responsável pelo abastecimento de madeira às unidades fabris do Grupo Altri e pela gestão das suas propriedades florestais é a Altri Florestal.

2.3.2 Descrição Geral do Processo Produtivo

Na Biotek, a produção de pasta para papel é realizada através do processo Kraft ou Sulfato, com cozimento contínuo. Neste processo, coexistem dois conjuntos de operações que, apesar de indissociáveis ao longo da produção, desempenham funções distintas:

- **A linha da pasta**, que abrange todas as etapas, desde a receção da matéria-prima até à unitização dos lotes de pasta. Esta linha é responsável pelo processamento inicial da madeira e pela transformação da matéria-prima em pasta para papel, de acordo com as especificações de qualidade exigidas.

- **A linha de energia e recuperação**, que, como o nome indica, tem a função de regenerar os reagentes utilizados no processo e produzir vapor de alta pressão. Este vapor, ao passar por uma turbina, gera energia elétrica, bem como vapor de média e baixa pressão, essenciais para o bom funcionamento de todo o processo produtivo.

Estas duas linhas operam de forma integrada, garantindo a eficiência do processo e o cumprimento dos requisitos de sustentabilidade da Biotek, enquanto minimizam o impacto ambiental da operação, promovendo a recuperação de energia e reagentes no ciclo produtivo.

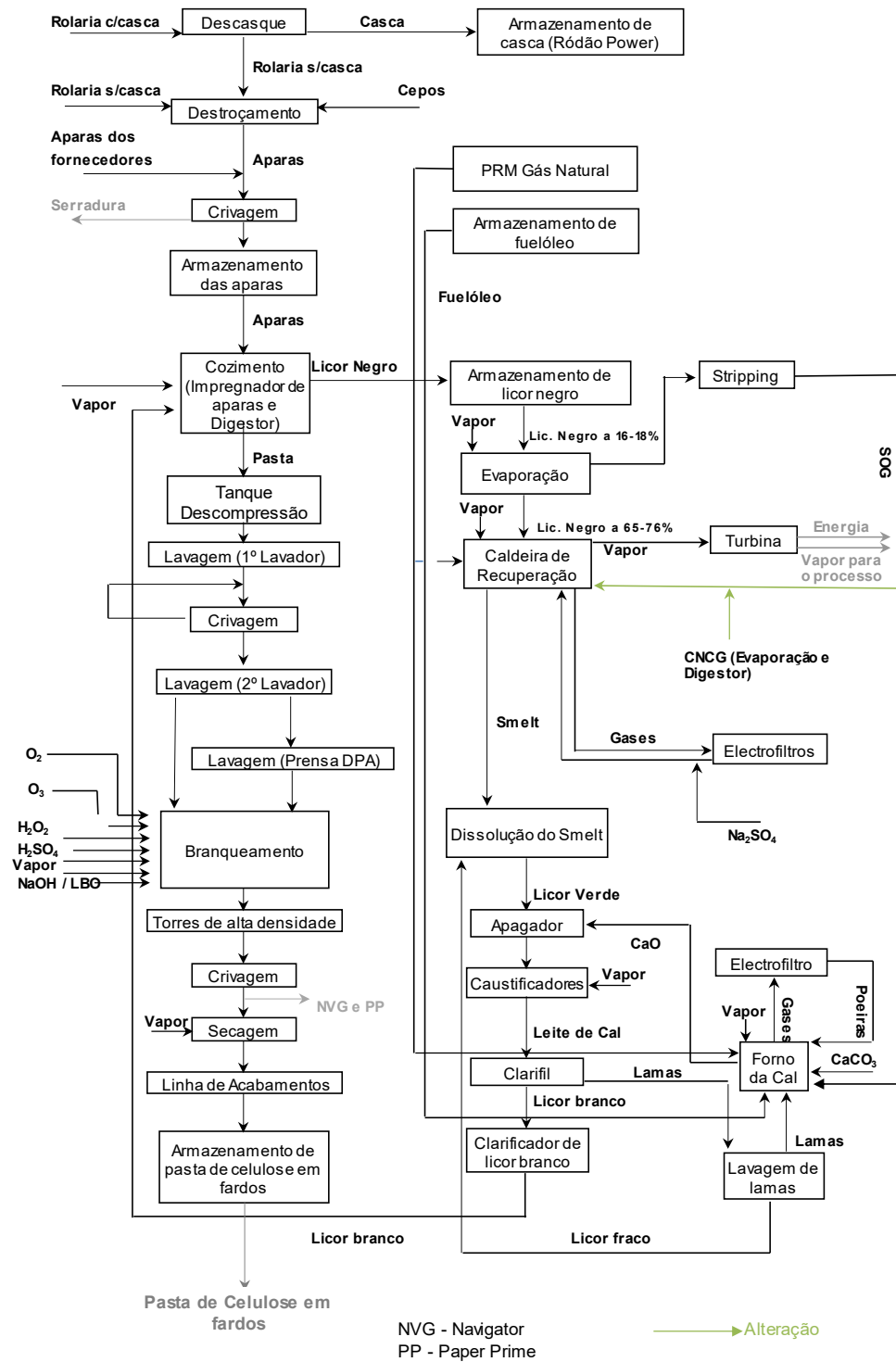


Figura 2.4 – Fluxograma de funcionamento da Biotek. Fonte: Biotek, 2025.

2.3.2.1 Linha de Produção de Pasta

2.3.2.1.1 Processo de Produção de Pasta Celulósica

A madeira é inicialmente transformada em estilha e, em seguida, submetida a um processo de cozimento em uma mistura de hidróxido de sódio e sulfureto de sódio (licor branco). Este processo ocorre sob condições controladas de temperatura e pressão, com o objetivo de separar as fibras celulósicas da lignina aglomerante. Após a remoção da lignina, as fibras passam por diversas etapas físico-químicas, como lavagem, crivagem, branqueamento e secagem, resultando no produto final.

2.3.2.1.2 Processo de Alimentação e Impregnação das Aparas

As aparas (estilhas) provenientes do silo atmosférico são transportadas por parafusos sem-fim e telas até à tremonha de alimentação do digestor. A tremonha funciona como um silo de onde as aparas são alimentadas para os dois parafusos sem-fim localizados em sua base. Na base da tremonha, é introduzido vapor recuperado (proveniente do reebulidor) ou vapor de baixa pressão, com o objetivo de aumentar a temperatura das aparas e impregná-las com vapor. Esse processo substitui o ar no interior das aparas, o que diminui as interferências na transferência de calor e facilita a penetração do licor de cozimento nos interstícios das aparas. Os parafusos de alimentação transportam as aparas para as bombas de alimentação, que as enviam ao topo do impregnador.

2.3.2.1.3 Impregnador e Digestor

O impregnador é um equipamento de grande capacidade, com 4,8 metros de diâmetro e 49 metros de altura, totalizando um volume de 697 metros cúbicos. Este equipamento é projetado para operar com um baixo nível de aparas, a fim de reduzir o tempo de retenção e melhorar a eficiência do processo. O impregnador também pode funcionar como uma etapa de pré-hidrólise, essencial para a produção de fibras destinadas à indústria têxtil.

Após o processo de impregnação, as aparas são transferidas para o topo do digestor Kamyr. Este digestor, com um diâmetro de 4,2 metros e uma altura de 44,5 metros, é o equipamento responsável pelo processo contínuo de cozimento. As aparas, juntamente com o licor negro de circulação e o licor branco, são submetidas a condições controladas de temperatura e pressão, que desencadeiam a reação química necessária para a separação das fibras celulósicas.

2.3.2.1.4 Recuperação de Subprodutos

Durante o processo de laboração com madeira de pinho, os gases de exaustão do digestor são condensados para a obtenção de terebentina crua, um subproduto de interesse comercial, especialmente na indústria química.

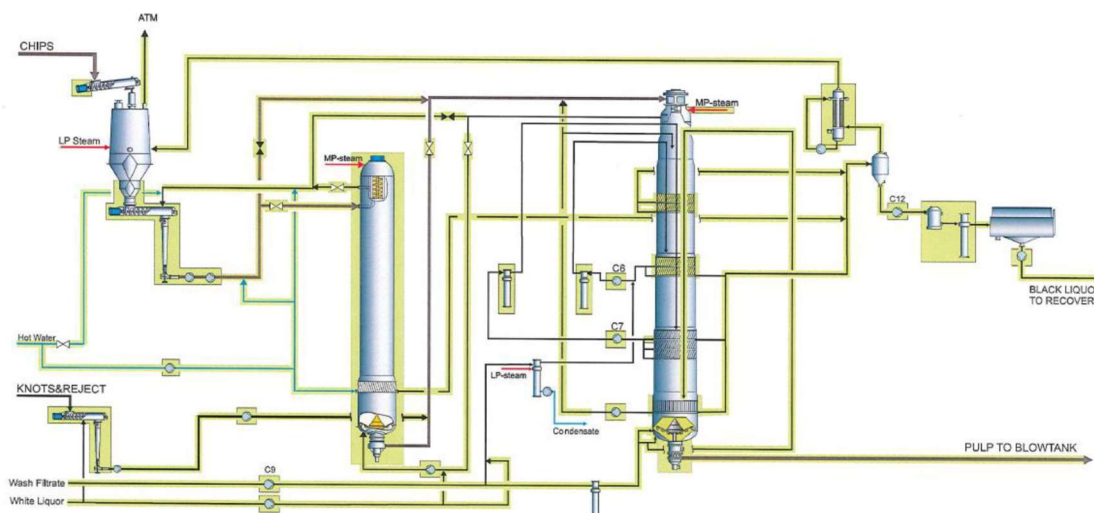


Figura 2.5 – Cozimento Modificado Lo-Solids. Fonte: Biotek, 2025.

O principal consumo de energia térmica destas operações é sob a forma de vapor. O consumo de eletricidade é principalmente para força motriz de acionamento dos vários equipamentos utilizados.

2.3.2.1.5 Lavagem e Crivagem

Após o processo de cozimento, a pasta é submetida a uma primeira lavagem num lavador DD, utilizando o filtrado do estágio anterior, com o objetivo de minimizar o consumo de água. Segue-se o processamento da pasta no combiscreen, que tem como função remover os nós, que são novamente introduzidos no processo, e realizar um estágio inicial de crivagem. A pasta resultante passa por uma segunda lavagem num outro lavador DD. Os filtrados dos diferentes estágios de lavagem circulam em contracorrente, ou seja, o filtrado de um estágio é reaproveitado no estágio anterior, de modo a otimizar o uso de água. A pasta rejeitada no combiscreen é crivada novamente para separar as impurezas, sendo reintroduzida no processo.

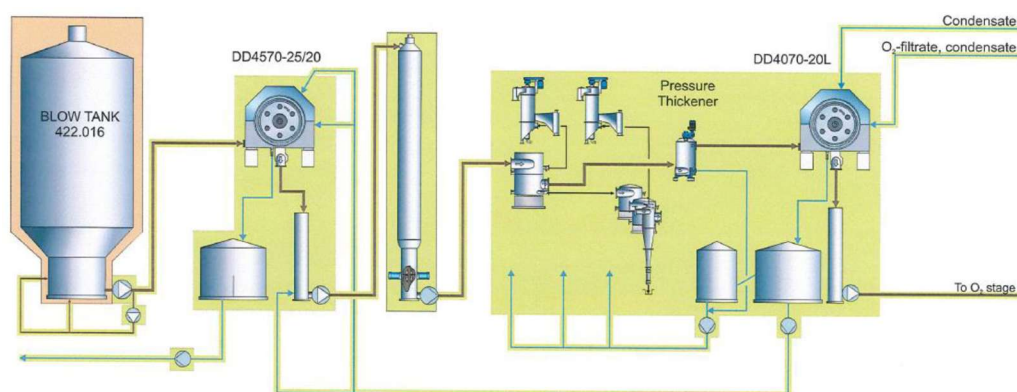


Figura 2.6– Lavagem e crivagem. Fonte: Biotek, 2025.

Também nesta secção o consumo de energia elétrica está principalmente associado ao acionamento de equipamentos (lavadores, crivos e bombas).

2.3.2.1.6 Branqueamento

O processo de branqueamento das pastas de eucalipto e pinho adota as Melhores Tecnologias Disponíveis, conforme o documento BREF/PPI da Comissão Europeia, incluindo:

- Deslenhificação com oxigénio;
- Utilização de ozono;
- Fecho parcial dos circuitos de filtrados;
- Uso de técnicas TCF (totalmente isento de compostos de cloro).

A deslenhificação com oxigénio ocorre em dois reatores de fluxo ascendente, utilizando oxigénio e alcalis (licor branco oxidado ou soda cáustica). Esse estágio remove grande parte da lenhina, reduzindo a necessidade de produtos químicos nos estágios subsequentes e diminuindo o impacto ambiental dos efluentes.

Após a deslenhificação, a pasta é descompressada em um tanque para separar o oxigénio gasoso e o vapor. Esse tanque também atua como zona de armazenamento entre a pasta crua e os estágios finais de branqueamento.

A pasta é então lavada em uma prensa de lavagem para remover o alcali e a matéria orgânica residual, reduzindo o consumo de químicos nos estágios seguintes. O líquido de lavagem é filtrado da prensa 3.

A pasta é acidificada e segue para uma prensa de espremedura para ajustar o pH antes do estágio de ozono, visando a remoção de metais. Após a segunda prensa,

a pasta, com cerca de 40% de consistência, entra no estágio de ozono (sistema ZeTrac™).

A pasta passa por um pequeno estágio de extração para remover subprodutos gerados pela reação com o ozono.

Antes dos dois últimos estágios de branqueamento, a pasta é lavada com água quente em uma prensa Metso, utilizando filtrado da prensa 4 como líquido de lavagem.

No penúltimo estágio, H_2O_2 é adicionado na entrada da torre P1, que é de fluxo ascendente. Entre os estágios, há uma prensa Metso (prensa 4).

H_2O_2 é novamente adicionado na entrada da torre P2, também de fluxo ascendente. Após o último estágio, a pasta passa por uma última prensa de espremedura (prensa 5).

As instalações auxiliares incluem unidades para oxidação de licor branco e a geração de O_2/O_3 , com abastecimento local. A pasta final é armazenada em duas torres de média consistência antes de ser alimentada à máquina de secagem.

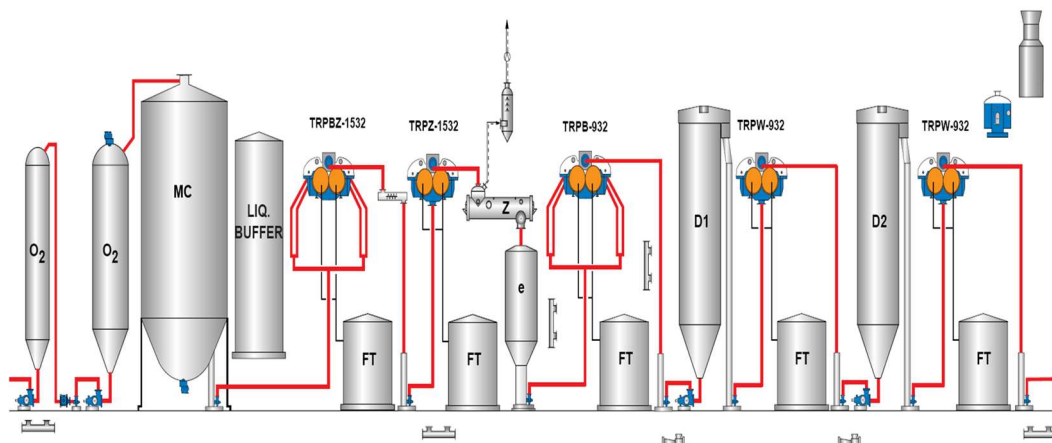


Figura 2.7 – Fluxograma Geral do Branqueamento. Fonte: Biotek, 2025.

Nesta fase do processo utiliza-se energia térmica (vapor de média e baixa pressão), juntamente com energia elétrica, principalmente na geração de ozono, mas também no acionamento dos diversos equipamentos processuais.

2.3.2.1.7 Secagem e Linha de Acabamentos

Antes de ser alimentada à Máquina de Secagem, a pasta passa por crivagem, que inclui dois crivos primários, um secundário e dois estágios de centricleaners.

Após a crivagem, a pasta pode ser destinada à máquina de secagem ou transferida por pipeline para fábricas de papel tissue. Na máquina de secagem, a folha, com 4,40 m de largura, é formada numa mesa plana tipo Fourdrinier, passando por duas prensas e uma zona de pré-secagem com 5 rolos aquecidos por vapor. A folha é então prensada novamente antes de ser transportada por uma estufa Flakt tipo L, com 18 andares, onde é aquecida por ar saturado quente.

Após a secagem, a pasta é cortada em folhas de 72x86 cm, empilhadas em fardos de 250 kg, pesadas e prensadas, com a umidade determinada automaticamente pelo sistema Forté. Os fardos são, então, agrupados em lotes de 8 unidades por uma unitizadora Valmet.

Na secção de secagem, há consumo de energia térmica (vapor de média e baixa pressão) e elétrica, devido aos equipamentos que operam na linha.



a)



b)

Figura 2.8 – a) Processo de crivagem; b) Secção de secagem.

2.3.2.2 Linha de Recuperação de Químicos e Produção de Energia

2.3.2.2.1 Linha de Energia e Recuperação

A lenhina solubilizada pelos produtos químicos segue outro circuito com o fim de os recuperar na sua forma original (licor branco). Por sua vez, a lenhina e alguns compostos celulósicos degradados originam, mediante combustão, energia térmica na formada de vapor de alta pressão. Este vapor, turbinado através dum processo de cogeração, produz a energia térmica necessária à realização do próprio processo

e energia elétrica suficiente para alimentação toda a fábrica, sendo o excesso injetado na rede pública nacional.

2.3.2.2.2 Evaporação e Stripping

O processo Kraft, ou processo ao sulfato, é economicamente viável devido à recuperação de reagentes e à produção de vapor e energia. O licor negro transporta a maior parte dos químicos de cozimento e matéria orgânica, que são valorizados energeticamente na caldeira de recuperação. O licor negro de extração tem entre 15% e 17% de sólidos, o que impede sua queima direta na caldeira. Portanto, é necessário concentrá-lo para formar o licor de queima, com cerca de 75% de sólidos no pinho e 70% no eucalipto.

A evaporação de múltiplo efeito da Biotek utiliza uma sequência de 6 efeitos em cascata, onde cada efeito funciona com pontos de ebulição diferentes, sendo aquecido pelo vapor do efeito anterior. Os efeitos 1E, 1D e 1ABC são aquecidos com vapor de baixa pressão proveniente da central térmica.

Durante a evaporação, os condensados gerados são reaproveitados para a lavagem de pasta no branqueamento e de lamas na caustificação. O condensado contaminado, com alto teor de metanol, é tratado na instalação de stripping. Na coluna de stripping, o condensado sofre ebulições sucessivas para liberar compostos voláteis, ricos em metanol, que são incinerados no forno da cal ou na caldeira de recuperação. O condensado recuperado é armazenado para reutilização no processo.

O consumo de energia é realizado principalmente na forma de vapor para a evaporação da água do licor negro, além de energia elétrica como força motriz.

2.3.2.2.3 Caldeira de Recuperação

A caldeira química de recuperação tem duas funções principais:

- A recuperação do sódio e enxofre do licor negro numa forma que permita a posterior regeneração do licor branco para o cozimento e;
- O aproveitamento do conteúdo energético do licor negro na produção de vapor de alta pressão.

A influência da caldeira no processo é vital para a regeneração do licor branco e é requisito que o seu consumo médio seja idêntico à produção média de licor negro no digestor.

A caldeira de recuperação, com uma potência térmica de 216,9 MWt, queima licor negro a uma concentração de 70%, com uma capacidade de queima máxima de 1450 tDS/d (toneladas diárias de licor negro em base seca). A temperatura da água

de alimentação à caldeira, antes do economizador, é de 130 °C e produz vapor de 95 bar(g) a 495 °C;

O licor negro concentrado é obtido na evaporação, com um teor de sólidos de aproximadamente 75% (pinho) e 70% (eucalipto) e armazenado nos tanques de licor negro concentrado (tanques de fortes).

Antes do licor ser alimentado à caldeira pelos 8 queimadores existentes nas paredes laterais, é analisado *on-line* o valor da sua densidade de forma a impedir qualquer problema na caldeira devido a um baixo teor de sólidos. O licor é alimentado à caldeira nos queimadores que se situam entre as entradas de ar secundário e terciário de forma a permitir a correta formação do “monte” e favorecer a evaporação da água remanescente no licor. O movimento dos gases é forçado pela existência de um exaustor na zona oposta da caldeira que também arrasta cinzas, das quais parte fica “agarrada” aos diferentes tubulares e a restante sai para o electrofiltro. As cinzas agarradas aos tubulares são sopradas e recuperadas na base do nariz da caldeira por arrastadores e reintroduzidas no tanque de mistura juntamente com as cinzas posteriormente recuperadas no electrofiltro. Devido às placas eletromagnéticas do electrofiltro as partículas são “captadas” por estas e depois através de um martelo caem das placas para a base do electrofiltro onde são posteriormente recuperadas.

Quanto ao smelt, este vai para o tanque de smelt ou tanque de dissolução, onde é dissolvido com licor branco fraco vindo da caustificação. Antes de entrar no tanque, o smelt é partido com vapor e a elevada agitação do tanque e recirculação impede a sedimentação do carbonato de sódio no tanque. Na reação do carbonato e do sulfureto de sódio com a água do licor branco fraco são produzidas elevadas quantidades de gases que devido aos compostos e à sua temperatura têm de ser previamente lavados num scrubber (lavador de gases). Estes gases são desumidificados e realimentados juntamente com o ar secundário, reduzindo deste modo as emissões atmosféricas da caldeira.

Para realizar a sua função é vital a introdução de ar para permitir a combustão do licor negro concentrado na fornalha da caldeira. A entrada de ar dá-se através de quatro zonas distintas, com o intuito de proporcionar condições para ocorrerem todas as reações da queima do licor negro, sendo o ar de cada zona denominado de ar primário, secundário, terciário e quaternário. O ar primário tem como principais objetivos: estabilizar o “monte”, manter a boa eficiência da queima e a alta redução. O ar secundário pretende queimar os gases libertados do “monte” e finalmente o ar terciário completa a queima dos gases e uniformiza as suas velocidades. O ar quaternário visa sobretudo reduzir a concentração poluentes, nomeadamente NO_x, nos gases de escape da caldeira.

Por outro lado, as caldeiras têm uma segunda função que é a produção de vapor sobreaquecido que após ser turbinado irá produzir energia e vapor de média e baixa pressão. O circuito de água/vapor é constituído principalmente por três zonas:

- Economizadores;
- Secção de Geração de Vapor (Barrilete / boiler bank e paredes da caldeira)
- Sobreaquecedores.

Para além da produção de vapor aproveitando o calor proveniente da queima do licor negro, este circuito também arrefece os gases da caldeira, antes da sua entrada no electrofiltro. A denominação das diferentes secções prende-se com o componente que circula no seu interior. Nos economizadores existe um aquecimento prévio da água de alimentação que vai para a secção de geração de vapor, onde devido ao calor recebido, a água passa do estado líquido a vapor. A separação do vapor dá-se no barrilete. O vapor saturado aqui produzido passa pelos sobreaquecedores, onde a transferência de calor produz vapor sobreaquecido. O rendimento da produção de vapor é analisado mais à frente nesta descrição.

2.3.2.2.4 Produção de Vapor e Energia Elétrica

O vapor sobreaquecido produzido na Caldeira de Recuperação, a cerca de 495°C e 95bar é expandido na turbina GE de condensação, sendo extraído, da turbina, a pressões nominais mais baixas, 3,5 bar, 13,5 bar e 27 bar, para utilização no processo as duas primeiras correntes e nos sopradores da caldeira a de pressão mais alta.

A energia resultante da expansão na turbina aciona o alternador, produzindo energia elétrica. A rede da fábrica está ligada à rede exterior através da qual a Biotek vende e compra eletricidade.

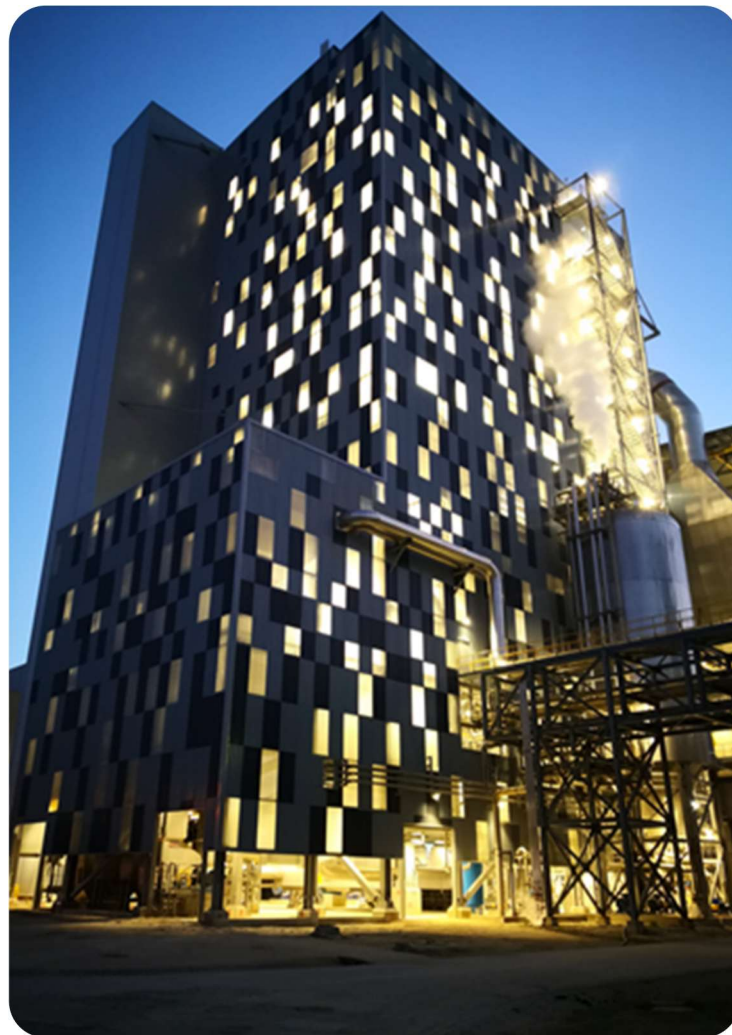


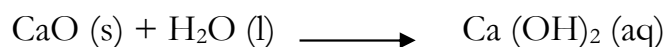
Figura 2.9 - Caldeira de Recuperação Biotek.

2.3.2.2.5 Caustificação e Forno da Cal

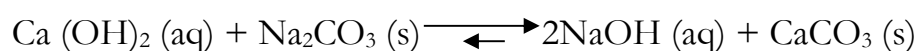
No final do circuito de recuperação de químicos, as áreas de Caustificação e Forno da Cal regeneram os reagentes químicos do processo Kraft. O smelt da caldeira de recuperação é dissolvido com licor branco fraco, formando o licor verde, que é clarificado em clarificadores Dorr Oliver. Em seguida, o licor verde é introduzido no apagador com cal viva proveniente do forno. A reação de caustificação ocorre em 5 caustificadores.

As reações químicas do processo de Caustificação são:

Reacção de hidratação ou apagamento da cal:

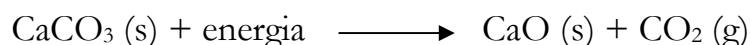


Reacção de caustificação:



O leite de cal produzido é filtrado no Clarifil, armazenado no tanque de licor branco e segue para o cozimento como licor branco. As lamas calcárias separadas na clarificação/filtração são lavadas e espessadas num filtro de discos, sendo alimentadas ao Forno da Cal para produção de cal viva. O licor branco fraco resultante da lavagem das lamas é enviado para a caldeira de recuperação para dissolver o smelt.

No Forno da Cal, a calcinação começa a cerca de 820°C, liberando CO₂ que estava combinado com óxido de cálcio:



A temperatura e o tempo de retenção no forno são controlados pelo declive e pela velocidade de rotação para otimizar a reatividade da cal. A temperatura é mantida através da queima de Gás Natural, fuelóleo e gases combustíveis. Os gases combustíveis provenientes da coluna de stripping, ricos em metanol, são queimados na zona mais baixa do forno, perto da saída de cal viva.

No extremo inferior do forno, arrefecedores incorporados resfriam a cal viva, que é transportada para o transportador de cal, direcionando-a ao silo de cal viva, de onde é dosada para o apagador.

Dentro do forno, é induzido um fluxo gasoso para maximizar a combustão. O fluxo de gases combustíveis entra e os produtos da combustão, como CO₂ e vapor de água, saem. O gás é filtrado num eletrofiltro para recuperar partículas arrastadas.

O consumo de energia no Forno da Cal é realizado por meio de Gás Natural, fuelóleo, e vapor para aquecimento e atomização do fuelóleo. A energia elétrica é usada como força motriz.

2.4 Captação e Tratamento de Águas

A captação da água utilizada na Biotek é feita no rio Tejo e bombeada para a fábrica por três grupos verticais. A água é tratada num clarifloculador de 46 m de diâmetro, seguido de uma instalação de filtros rápidos de areia. A água ao passar pelos filtros de areia é filtrada e posteriormente armazenada na cisterna de água fabril. Na figura 2.10 representa-se esquematicamente o tratamento de água fabril.

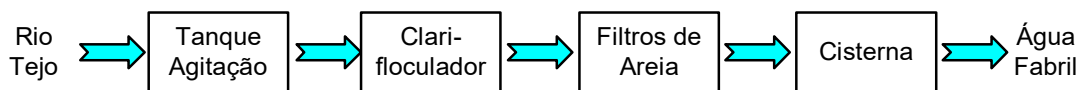


Figura 2.10– Representação esquemática do tratamento de água fabril. Fonte: Biotek, 2025.

A água de alimentação às caldeiras é desmineralizada numa unidade de produção de água desmineralizada.

Esta unidade é composta por Filtros de areia -> Ultrafiltração -> Osmose Inversa -> Desgaseificador -> Eletrodesionização.

2.5 ETAR

A fábrica dispõe de tratamento primário e secundário dos seus efluentes líquidos.

O tratamento primário (ver figura 2.11) é constituído por dois decantadores e duas prensas de lamas. O efluente fabril é distribuído pelos dois decantadores sendo o clarificado enviado para o tratamento secundário. As lamas primárias são enviadas para o tanque de lamas. Depois é-lhes adicionado um polímero para facilitar a sua agregação. De seguida, passam por um pré-espessador e uma prensa antes de serem enviadas para empresas de compostagem licenciadas.

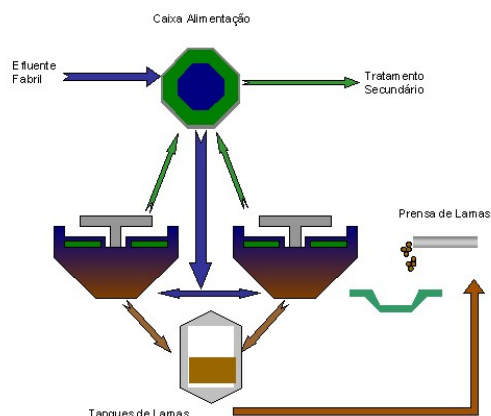


Figura 2.11 – Representação esquemática do tratamento primário. Fonte: Biotek, 2025.

No tratamento secundário (ver figura 2.12) o efluente proveniente dos decantadores primários é arrefecido a uma temperatura inferior a 35°C e em seguida neutralizado a pH próximo de 7, com dióxido de carbono, substância com menos impacto ambiental que o ácido sulfúrico, normalmente usado na neutralização de efluentes de fábricas de pasta. O caudal é depois distribuído a uma bateria de 3 reatores biológicos, funcionando num regime de arejamento estendido. Cada reator tem um volume de 12000m³ e podem funcionar de forma isolada ou em grupos, removendo mais de 95% da carga biodegradável. O caudal dos reatores é misturado no canal de saída e alimentado aos 6 tanques onde estão instaladas as membranas de ultrafiltração, que removem quase toda a componente sólida.

O efluente final é armazenado num tanque com a capacidade de 15000m³ e depois enviado para o rio Tejo.

As lamas biológicas recirculam ao início dos reatores biológicos de forma a manter a atividade microbiológica nos reatores. As lamas em excesso sedimentam em dois espessadores e depois são alimentadas a uma centrifuga para tentar retirar o máximo de água.

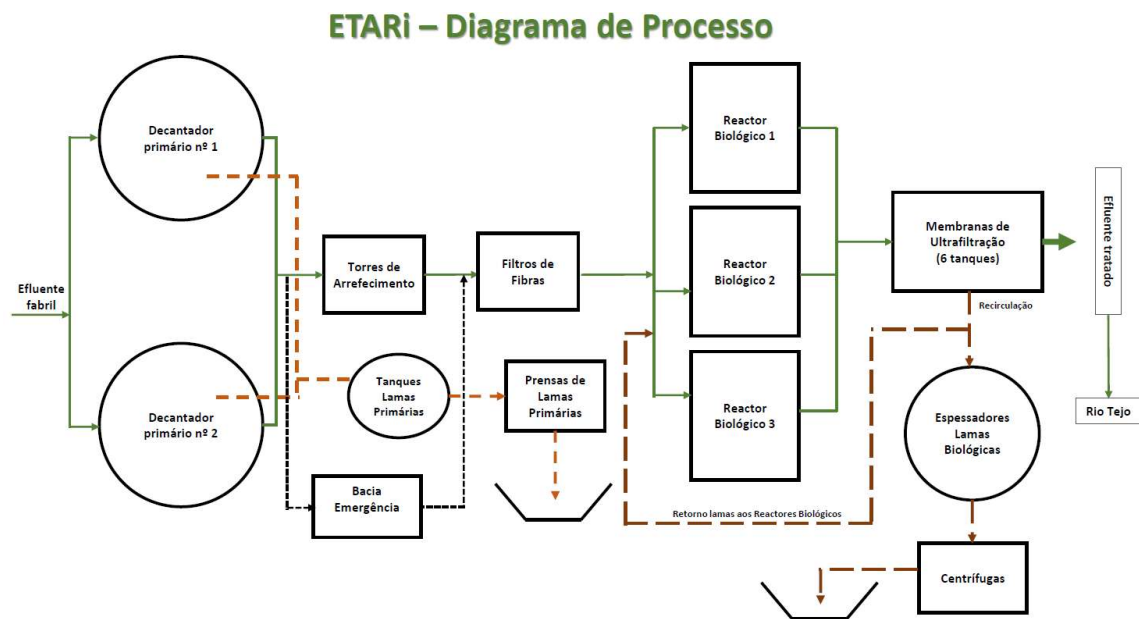


Figura 2.12 – Representação esquemática do tratamento secundário. Fonte: Biotek, 2025.



Figura 2.13 – Representação 3D da ETAR da Biotek (sem tratamento primário). Fonte: Biotek, 2025.

2.5.1 Outros Equipamentos de Proteção Ambiental

No que se refere à existência de equipamentos de fim-de-linha para tratamento e/ou redução das emissões gasosas, encontram-se instalados dois electrofiltros de 3 campos associados à Caldeira de Recuperação, um electrofiltro de 2 campos associado ao Forno da Cal e um Scrubber associado ao Tanque Smelt.

A instalação do sistema de recolha de gases não condensáveis (CNCG) e de gases odorosos fortes (SOG) possibilita a sua queima na caldeira de recuperação II. No caso de indisponibilidade da incineração dos gases na caldeira de recuperação, existe uma tocha de reserva para efetuar esse tratamento.

Estes gases CNCG e SOG já eram anteriormente queimados no forno de cal, mas com esta nova instalação de queima destes gases na CR II, a Biotek, consegue otimizar o mix de combustíveis a utilizar na caldeira de recuperação II e no forno de cal. Tanto a CR II como o forno da cal dispõem de flare/tocha de emergência, para utilização esporádica, em caso de indisponibilidade / avaria dos respetivos queimadores de CNCG e SOG.

2.6 Aterro Resíduos

A Biotek dispõe de um aterro para resíduos não perigosos com um período de vida útil de 24 anos. Este aterro tem uma capacidade nominal de 360 000 toneladas de resíduos, distribuídas em duas células. A instalação é constituída ainda por uma estação elevatória de águas lixiviantes para envio dos efluentes para tratamento na ETARi do complexo industrial.

2.7 Modelo de Gestão da Empresa

Gestão por objetivo: No âmbito da avaliação de desempenho, a Biotek implementou a Gestão Por Objetivo (GPO), por forma a acompanhar, a avaliar resultados e o desempenho individual, de equipa e de grupo, do ponto de vista organizacional. Está assente em quatro premissas de estratégias de grupo, que são basilares e sequenciais: planeamento e definição de Objetivo; Monitorar o Processo; Feedback Intercalar e Sessão Anual de Feedback. Esta recolha de informação contínua irá promover uma maior igualdade entre trabalhadores; acompanhar a evolução de carreiras; aumentar a empatia e transparência nos postos de trabalho; detetar e resolver problemas, de ordem laboral, e facilitar a comunicação entre todos os níveis da hierarquia organizacional. O processo de coordenação do programa será feito, particularmente, pelo team leader, que vai definir e avaliar os objetivos individuais e coletivos da sua equipa. O report e briefing total, de todas as áreas, será feito à direção fabril, numa primeira fase, e, posteriormente, à administração, para análise e controlo de dados. Os trabalhadores terão um acesso facilitado e permanente a esta informação.

Prémios e evolução na carreira profissional: a avaliação de desempenho poderá fundamentar a atribuição de um prémio, destinado a recompensar o desempenho individual, que é definido pela administração, desde que reunidas as condições financeiras e de performance da empresa, que são estabelecidas. A avaliação de desempenho também pode contribuir para a evolução profissional na empresa.

2.8 Sistemas de Gestão da Biotek

Toda a atividade da Biotek esta devidamente enquadrada num sistema integrado de gestão, de acordo com a sua política de crescimento sustentado, em harmonia com a natureza e a comunidade envolvente.

A empresa está certificada desde 1996 pela norma NP EN ISO 9002, tendo feito em 2015 a transição para a norma NP EN ISO 9001:2015.

Já em 2008, obteve a certificação Ambiental através da norma NP EN ISO 14001, e a certificação de cadeia de responsabilidade pelo FSC e PEFC, tendo feito em 2015, a transição para a nova versão 14001:2015.

Em 2009, a Biotek obteve a Acreditação como entidade formadora e em maio de 2013 passou a ser Entidade Formadora Certificada pela DGERT.

Em 2010, a Biotek obteve a Certificação do Sistema de Gestão de Segurança e Saúde no Trabalho em conformidade com a norma OHSAS 18001, tendo sido realizado a migração para o nome ISO 45001:2018 em 2012.

O laboratório está acreditado desde 1989 pela norma NP EN ISO 45001, tendo feito em 2002 a transição para a norma NP EN ISO/EC 17025.

Em 2012, o sistema de gestão energética da Biotek foi certificado de acordo com a norma NP EN 50001.

No ano de 2013, a empresa passou a ser a primeira empresa produtora de pasta para papel em Portugal, a dispor de um sistema de Gestão de Investigação, Desenvolvimento e Inovação, certificado segundo a norma NP 4457, mantendo, atualmente, um sistema de gestão implementado.

2.9 A Proteção do Ambiente

O ambiente tem constituído, desde sempre, ponto de honra da Biotek. A fabrica, possui mecanismos sofisticados que permitem um tratamento eficaz dos efluentes líquidos e das emissões gasosas-tratamento primário e electrofiltros, respetivamente, de modo a minimizar o seu impacto no meio ambiente. A Empresa tem recorrido a tecnologia cada vez mais eficazes e complementares, para dar uma resposta célere às exigências ambientais atuais

A monitorização das emissões gasosas, em contínuo, e o controlo diário do efluente líquido, permite seguir os níveis das descargas lançadas para a atmosfera e meio recetor, e atuar no processo em tempo real.

2.10 O Sistema de Gestão Energético

A prossecução da política de sustentabilidade pela gestão, assumida pela estrutura hierárquica e funcional da Biotek, assenta no estabelecimento e manutenção de condições adequadas de acompanhamento do desempenho energético. Esta política analisa o modo como várias formas de energia são utilizadas, como são consumidas e qual a sua eficiência energética, sempre numa perspetiva de melhoria contínua a incentivando o envolvimento de todos na concretização deste objetivo.

Os benefícios de Sistema de Gestão Energético (SGE) incidem em três grandes objetivos, sendo o primeiro a redução de custos, pois é fundamental verificar-se um decréscimo desse valor face ao previsível aumento dos custos energéticos nos próximos anos. O segundo centra-se na redução das emissões de carbono e a poupança energética, fortalecendo a responsabilidade ambiental da empresa na redução das emissões de gases com efeito estufas, e contribui para a redução do pagamento da taxa de carbono. O terceiro e último objetivo debate-se com a redução do consumo, quer se trate de combustíveis fósseis ou de energia elétrica, diminuindo o risco do aumento no preço ou da dificuldade de fornecimento, cenários que afetariam em grande escala a sustentabilidade económico da empresa.

3 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTÁGIO

3.1 Duração e Cronograma

O estágio curricular realizou-se entre os meses de **outubro de 2024 e junho de 2025**, perfazendo um total de **1560 horas** correspondentes a **60 ECTS**, conforme definido pelo plano curricular do Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC).

As atividades do estágio foram organizadas em dez fases distintas, que abrangeram desde a preparação teórica, integração na empresa, estudo do funcionamento da caldeira de recuperação e ciclo Kraft, análise de falhas, elaboração de propostas de melhoria, acompanhamento da manutenção durante uma grande paragem programada, até à elaboração e apresentação do relatório final.

Segue-se o cronograma resumido que apresenta a distribuição temporal das fases e a respetiva carga horária mensal:

Mês	Out/24	Nov/24	Dez/24	Jan/25	Fev/25	Mar/25	Abr/25	Mai/25	Jun/25	Total
Nº horas	144	160	176	160	184	144	176	168	40	1560
Fase 10									X	
Fase 9									X	
Fase 8							X	X	X	
Fase 7					X	X	X			
Fase 6				X	X	X	X			
Fase 5			X	X						
Fase 4		X	X	X	X	X	X			
Fase 3	X	X								
Fase 2	X	X								
Fase 1	X									

Figura 3.1 – cronograma distribuição temporal das fases e a respetiva carga horária mensal

Esta organização permitiu um planeamento estruturado e o acompanhamento sistemático do progresso das atividades, assegurando o cumprimento dos objetivos definidos.

3.2 Departamentos Envolvidos

Durante o estágio, a atividade decorreu principalmente no **Departamento de Manutenção Mecânica** da empresa Biotek, responsável pela conservação, reparação e otimização dos equipamentos industriais, nomeadamente da caldeira de recuperação.

Este departamento trabalha em estreita colaboração com outras áreas, nomeadamente o **Departamento de Produção**, responsável pela operação das unidades industriais, e o **Departamento de Segurança e Ambiente**, que assegura o cumprimento das normas legais e práticas de segurança no local de trabalho.

O contacto com estes departamentos foi fundamental para a compreensão integral do processo produtivo e das implicações das intervenções de manutenção, promovendo uma visão global e multidisciplinar do funcionamento da empresa.

3.3 Orientador, Supervisor e Formadores na Empresa

O estágio foi supervisionado por diferentes intervenientes que asseguraram o acompanhamento técnico e pedagógico do processo:

- **Orientador do ISEC:** Professor e doutor António Santos Simões, responsável pela orientação académica, acompanhamento do plano de estágio e validação do relatório final.
- **Supervisor na Empresa:** Eng.º Duarte Dias, responsável pela orientação técnica diária, integração nas atividades do departamento de manutenção mecânica e supervisão das tarefas desenvolvidas.
- **Formadores na Empresa:** Técnicos especializados da Biotek que participaram na formação técnica relativa ao funcionamento da caldeira de recuperação, ao ciclo Kraft e às técnicas de manutenção preventiva, preditiva, proporcionando um suporte fundamental para o desenvolvimento das competências específicas.

A colaboração próxima entre estes intervenientes permitiu garantir o sucesso do estágio, assegurando uma experiência formativa rica e diversificada.

3.4 Objetivos Específicos do Estágio

O estágio teve como principais objetivos:

- **Aprofundar os conhecimentos teóricos e práticos** na área da manutenção mecânica, com especial enfoque em equipamentos térmicos de grande dimensão, nomeadamente a caldeira de recuperação.
- **Realizar o acompanhamento da manutenção durante a grande paragem programada**, incluindo a análise das falhas identificadas e a preparação das atividades de intervenção.
- **Estudar o ciclo Kraft**, processo industrial fundamental para a produção de pasta de papel, com vista a compreender as interdependências entre os diversos equipamentos e otimizar a sua operação.
- **Analisar e diagnosticar as falhas da caldeira de recuperação**, identificando as suas causas e impactos no desempenho do sistema.
- **Elaborar relatórios técnicos detalhados**, que documentem as atividades realizadas, as análises efetuadas e as propostas de melhoria, contribuindo para a transferência de conhecimento e suporte à tomada de decisão na empresa.

Estes objetivos visaram, de forma integrada, promover o desenvolvimento de competências técnicas, analíticas e de gestão de manutenção, fundamentais para a futura prática profissional do engenheiro mecânico.

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 Estado da Arte

O processo de fabrico de pasta de papel através do ciclo Kraft é amplamente reconhecido na indústria da celulose pela sua elevada eficiência na regeneração de reagentes químicos e na produção de energia térmica. No centro deste processo encontra-se a caldeira de recuperação, cuja função consiste em proceder à combustão de subprodutos provenientes da etapa de polpação, nomeadamente a lignina, de modo a gerar vapor utilizado na produção de eletricidade por meio de turbinas.

A operação contínua e fiável desta caldeira é essencial para garantir a estabilidade da produção e a segurança das operações industriais. Por este motivo, as práticas de **manutenção preditiva** têm vindo a assumir um papel determinante, recorrendo à monitorização de parâmetros críticos, como vibrações, temperaturas e pressões, para antecipar falhas e planear intervenções com maior eficácia. A implementação de sistemas de **monitorização inteligente** e de **análise de dados em tempo real** tem evidenciado resultados positivos, traduzindo-se na redução dos custos de manutenção, no aumento da disponibilidade dos equipamentos e na otimização da eficiência energética global do processo.

Nos últimos anos, tem-se verificado uma aposta crescente na inovação e na sustentabilidade dentro do setor. Um exemplo representativo é o projeto de **transição da Biotek para a produção de fibras solúveis**, apoiado pela AICEP, que envolve um investimento superior a 75 milhões de euros. Esta iniciativa reforça a estratégia de **diversificação industrial** e promove práticas mais sustentáveis, produzindo fibras destinadas às indústrias têxtil, farmacêutica e alimentar. O projeto enquadra-se plenamente nas tendências atuais de **bioeconomia** e **economia circular**, ao valorizar recursos renováveis e reduzir o impacto ambiental do processo produtivo.

4.2 A Indústria da Celulose e o Processo Kraft

A pasta de madeira constitui a base da indústria da celulose e do papel, servindo como matéria-prima essencial para a produção de uma vasta gama de produtos de uso diário. Conforme indicado por Lahtinen (2019), os processos de fabrico de pasta podem ser classificados em três grandes grupos: **mecânicos**, **químico-mecânicos**

e **químicos**, cada um com características específicas em termos de eficiência energética, custos operacionais e qualidade da pasta obtida.

Entre os métodos químicos, o **processo ao sulfato**, mais conhecido como **processo Kraft**, é amplamente considerado o mais eficaz para a obtenção de pastas de elevada resistência e pureza, devido à sua capacidade de remover de forma eficiente a lignina. Este processo destaca-se ainda pela **alta taxa de recuperação de reagentes químicos**, que pode atingir cerca de 97%, garantindo vantagens económicas e ambientais significativas.

Durante o ciclo Kraft, aproximadamente metade da matéria lenhosa é dissolvida, originando o **licor negro fraco**, uma solução que contém compostos orgânicos dissolvidos e os químicos utilizados na digestão da madeira. Após a separação e lavagem da pasta, o licor é encaminhado para o sistema de **recuperação química**, onde os compostos inorgânicos são regenerados para reutilização no processo e os compostos orgânicos são queimados na caldeira de recuperação, gerando vapor e energia térmica que alimentam o próprio sistema produtivo.

De acordo com Vakkilainen (2007), por cada tonelada de pasta produzida, formam-se aproximadamente **dez toneladas de licor negro fraco**, contendo cerca de **1,5 toneladas de sólidos secos** que necessitam de tratamento no circuito de recuperação. Esta integração entre **recuperação química e valorização energética** confere ao processo Kraft uma elevada eficiência global, tornando-o o método predominante na indústria mundial da celulose pela sua capacidade de conciliar desempenho técnico, sustentabilidade e autossuficiência energética.



Figura 4.1– Processo de Cozimento Kraft. Fonte: Adaptado de (Vakkilainen, 2007).

4.3 Processo da Recuperação Kraft

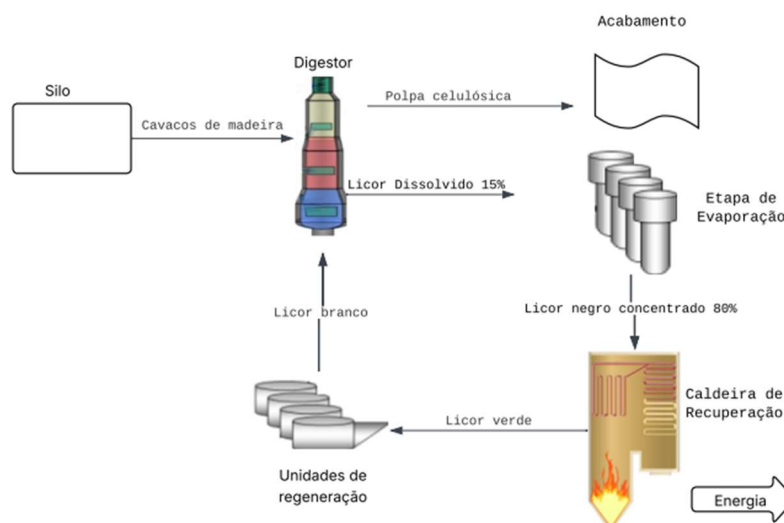


Figura 4.2– Processo da Recuperação Kraft.

A caldeira de recuperação é um equipamento essencial no processo Kraft, pois permite simultaneamente a regeneração dos reagentes químicos utilizados na polpação e a produção de energia para autoconsumo industrial. A operação baseia-se na queima do licor negro concentrado, cuja energia libertada é convertida em vapor de alta pressão, utilizado para alimentar turbinas e sustentar processos térmicos da fábrica.

Durante a combustão, os compostos inorgânicos formam o smelt que, após dissolução, dá origem ao licor verde. Este é posteriormente tratado na secção de caustificação, onde se recuperam os compostos necessários para reintegrar o ciclo de fabrico da pasta. Para além disso, a caldeira permite a remoção de elementos não recicláveis, como certos sais, através da purga de cinzas, contribuindo para o equilíbrio químico do sistema.

Outro contributo importante é a destruição de gases com odores desagradáveis gerados noutros pontos da fábrica, os quais são encaminhados para a câmara de combustão, reduzindo assim emissões poluentes. Deste modo, a caldeira de recuperação assume um papel central na eficiência energética, sustentabilidade e continuidade do processo de fabrico de pasta química.

4.4 Caldeiras de Recuperação Química

Além de sua eficiência energética, as caldeiras de recuperação química contribuem significativamente para a sustentabilidade ambiental, ao minimizar a emissão de poluentes por meio do reaproveitamento de resíduos e do tratamento de gases. Assim, tornam-se um componente essencial tanto para a eficiência

operacional quanto para a redução do impacto ambiental nas fábricas de celulose contemporâneas.

A principal função da caldeira de recuperação é reciclar os produtos químicos usados na fabricação de celulose. Embora ela também produza vapor, o foco principal não é gerar energia, mas garantir a queima do licor negro, o que permite que a fábrica continue funcionando. Se a caldeira parar, a produção de celulose também para, pois o licor negro precisa ser queimado imediatamente e não pode ser armazenado facilmente. Além disso, sem reciclar os produtos químicos, como o licor branco, a produção se tornaria economicamente inviável (Praszkie, 2011). Assim, podemos definir as funções da caldeira de recuperação da seguinte forma:

- Função primária - Reciclar os produtos químicos de cozimento
- Função secundária - Gerar vapor e energia

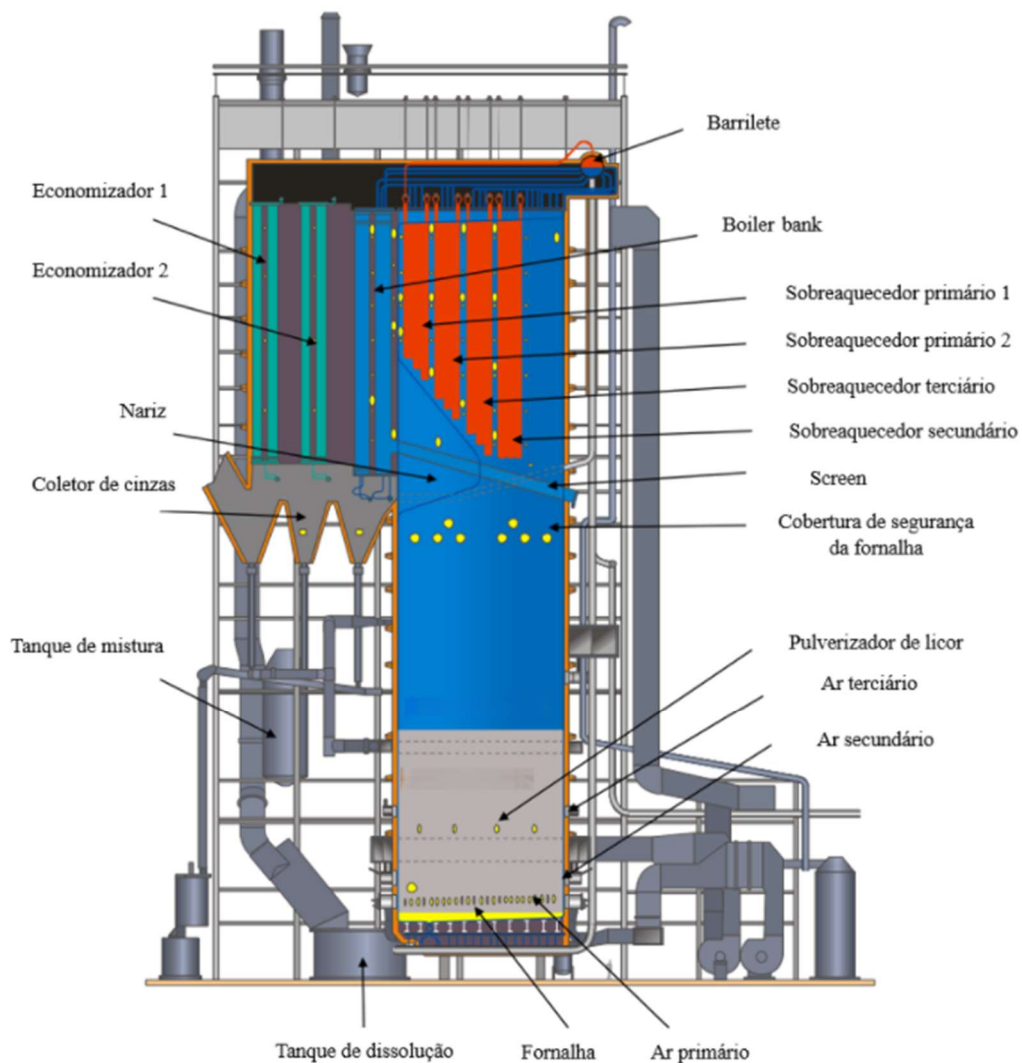


Figura 4.3— Caldeira de Recuperação. Fonte: Adaptado de (Praszkie, 2011).

O licor negro é uma solução aquosa complexa e multifásica, composta por uma variedade de substâncias orgânicas e inorgânicas. Entre os constituintes orgânicos destacam-se a lignina, os polissacarídeos, os compostos resinosos e outras substâncias de baixo peso molecular. No que diz respeito aos compostos inorgânicos, predominam os sais, como o hidróxido de sódio (NaOH), o carbonato de sódio (Na_2CO_3) e outros derivados de ácidos minerais. A composição do licor negro pode variar consideravelmente, dependendo da espécie de madeira utilizada, das condições do processo de cozimento e do sistema de recuperação adotado na indústria de pasta e papel (Cardoso, 1998).

4.5 Evolução das Tecnologias de Recuperação Química e Caldeiras de Recuperação

O desenvolvimento das tecnologias de recuperação química e caldeiras de recuperação foi impulsionado pela necessidade de reutilizar produtos químicos no processo de fabricação de celulose, reduzindo custos e aumentando a eficiência energética.

As tecnologias baseavam-se em métodos rudimentares, como fornos redutores para secagem e combustão do licor negro. Avanços significativos incluíram a introdução de evaporadores de múltiplos estágios e caldeiras de tubos verticais para recuperação de calor, além da utilização de fornos rotativos. No entanto, esses sistemas enfrentavam desafios operacionais, como incrustações e perdas de eficiência devido ao fluxo de ar inadequado.

Nas caldeiras de recuperação, melhorias constantes foram feitas para aumentar a capacidade e eficiência, como a introdução de sistemas de vedação aprimorados, tanques de dissolução e revestimentos refratários. A integração de caldeiras de circulação forçada e fornos rotativos combinados com sistemas de pré-combustão e refrigeração a água consolidou sua operação até meados do século XX.

Esses avanços possibilitaram a recuperação eficiente de produtos químicos e a geração de vapor, alcançando até 5000 kg de vapor a 3,0 MPa por tonelada de celulose, enquanto reduzindo custos e impacto ambiental. A evolução contínua das tecnologias de recuperação reforçou seu papel central na sustentabilidade e competitividade das fábricas modernas de celulose e papel.

A caldeira de recuperação moderna trouxe inovações estruturais e operacionais que permanecem centrais até hoje. Uma das principais características desse equipamento é a integração de todos os processos essenciais – secagem, combustão e reações químicas subsequentes do licor negro – dentro de um único forno refrigerado, ideia pioneira de Tomlinson. A pulverização do licor negro em pequenas gotículas, introduzida inicialmente em fornos rotativos e adaptada para fornos

estacionários, facilitou o controle da combustão. O uso de sistemas de ar em múltiplos níveis, concebido por C. L. Wagner, otimizou a gestão do leito de carvão ao regular a entrada de ar primário na base e de níveis adicionais acima.

Outra inovação significativa foi a melhoria na remoção da fundição, que passou a ser feita diretamente para um tanque de dissolução através de bicas fundidas. Além disso, a introdução de precipitadores eletrostáticos, como o desenvolvido por Cottrell, permitiu a recuperação de poeira e reduziu perdas químicas.

Entre os pioneiros da tecnologia está a Babcock & Wilcox, que introduziu a primeira caldeira de recuperação de licor negro do mundo em 1929, com um modelo avançado totalmente refrigerado a água em 1934. Essas caldeiras, que representaram a transição de fornos reverberatórios e rotativos para sistemas mais integrados, foram licenciadas e amplamente adotadas em países como Escandinávia e Japão. Fabricantes locais produziram versões baseadas nos desenhos e nas especificações de licenciamentos internacionais, contribuindo para a expansão global da tecnologia (Vakkilainen, 2005).

A Engenharia de Combustão, outra pioneira no campo, baseou seus projetos no trabalho de William M. Cary, que desenvolveu fornos com pulverização direta de licor, e de Adolph W. Waern, criador de unidades de recuperação inovadoras. O primeiro modelo da Engenharia de Combustão se assemelhava muito às caldeiras modernas, com evaporadores de contato direto e tubos refrigerados.

Na Escandinávia, uma das primeiras caldeiras Tomlinson, construída com um forno de 8 metros de altura, destacava-se pela expansão da base do forno na entrada do superaquecedor. Inicialmente, esses modelos requeriam limpeza frequente, com economizadores lavados duas vezes por dia. No entanto, a introdução de sopradores de fuligem no final da década de 1940 permitiu que as limpezas ocorressem apenas durante paradas regulares de fim de semana, aumentando a eficiência operacional.

Esses avanços consolidaram as caldeiras de recuperação como equipamentos essenciais para o setor de celulose e papel, com capacidade de operação prolongada e confiável. Exemplos como a caldeira de 160 t/dia instalada em Korsnäs, que operou por quase 50 anos, demonstram a durabilidade e o sucesso técnico dessas construções. Até 1937, mais de 20 unidades já haviam sido instaladas globalmente, incluindo 10 na Escandinávia, marcando o início da ampla adoção dessa tecnologia revolucionária (Vakkilainen, 2005).

4.6 Princípios Termodinâmicos Aplicados a Sistemas Térmicos.

As máquinas térmicas são sistemas concebidos para transformar energia térmica em trabalho mecânico, recorrendo, para isso, a ciclos termodinâmicos específicos. No caso das caldeiras de recuperação, esta conversão ocorre a partir do calor libertado na combustão do licor negro (ou de outro combustível), sendo essa energia térmica posteriormente aproveitada para gerar eletricidade ou fornecer calor a processos industriais. Este tipo de caldeira constitui um exemplo de aplicação prática de uma máquina térmica, ao utilizar o calor contido nos gases de combustão para melhorar a eficiência energética do sistema e reforçar a sustentabilidade da unidade industrial.

O ciclo termodinâmico mais frequentemente associado ao funcionamento das caldeiras de recuperação é o **Ciclo Rankine**, amplamente utilizado em centrais termoeletricas. Este ciclo permite a conversão de calor em trabalho mecânico, independentemente da fonte de calor — que pode incluir desde combustíveis fósseis e biomassa até resíduos sólidos urbanos (Ardila e Alberto, 2016).

No contexto específico das caldeiras de recuperação, o Ciclo Rankine é ajustado de forma a tirar partido do calor resultante da queima do licor negro. O processo envolve a vaporização de água sob alta pressão no interior da caldeira. O vapor gerado é então conduzido a uma turbina, onde ocorre a conversão da energia térmica em trabalho mecânico. Após passar pela turbina, o vapor é condensado, transformando-se novamente em água, que é depois comprimida e reenviada para a caldeira, reiniciando assim o ciclo de forma contínua.

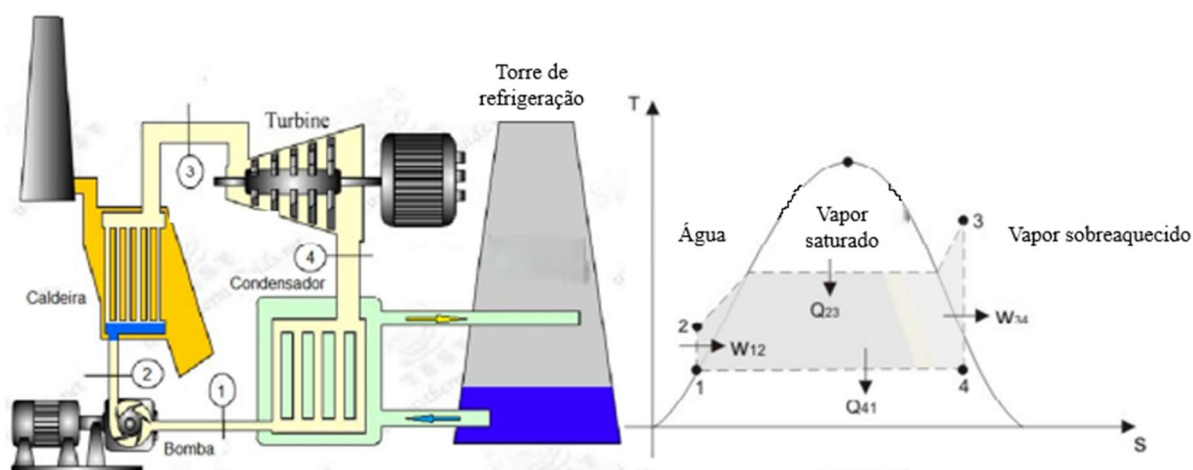


Figura 4.4— Representação Ciclo Rankine. Fonte: Adaptado de (Ardila e Alberto, 2016)

Além do ciclo Rankine, outro ciclo que pode ser relevante no contexto de caldeiras de recuperação é o **Ciclo Brayton**, usado em turbinas a gás. Embora menos comum nas caldeiras de recuperação de papel e celulose, o ciclo Brayton também é importante em sistemas de cogeração, onde a energia térmica dos gases de

combustão é aproveitada para gerar eletricidade em turbinas a gás. Em sistemas híbridos, que combinam caldeiras de recuperação com turbinas a gás, pode-se obter uma maior eficiência no processo de conversão de energia.

As caldeiras de recuperação operam com base em ciclos termodinâmicos bem estabelecidos, como o ciclo Rankine ou o ciclo de regeneração, que visam otimizar a recuperação de energia térmica. Contudo, esses ciclos têm sua eficiência limitada pela necessidade de rejeição de parte do calor ao ambiente ou a um reservatório de baixa temperatura. Este conceito está diretamente relacionado ao enunciado de Kelvin-Planck, um dos fundamentos da termodinâmica, que estabelece que nenhuma máquina térmica pode converter 100% do calor extraído em trabalho útil.

O princípio de Kelvin-Planck afirma que é impossível criar uma máquina térmica que opere em um ciclo termodinâmico sem realizar alguma forma de rejeição de calor para um reservatório frio. Em outras palavras, qualquer dispositivo que extraia calor de um reservatório quente e converta parte desse calor em trabalho útil necessariamente deverá transferir uma quantidade de calor para um reservatório de menor temperatura. Isso se deve à inevitável dissipação de energia durante o processo de recuperação de calor e geração de trabalho, o que impede a conversão completa da energia térmica em trabalho mecânico.

Portanto, a análise dos ciclos termodinâmicos aplicados às caldeiras de recuperação é essencial para otimizar a eficiência do processo de conversão de calor em trabalho e minimizar as perdas de energia. A compreensão do ciclo Rankine e, em algumas configurações, do ciclo Brayton, permite que as caldeiras de recuperação sejam operadas de forma mais eficiente, garantindo um melhor aproveitamento da energia gerada, com benefícios tanto econômicos quanto ambientais.

4.7 Eficiência da Caldeira e Manutenção do Sistema

A eficiência de uma caldeira é um indicativo da qualidade do processo e dos equipamentos utilizados para transferir o calor gerado pela combustão para o vapor. Em caldeiras a combustível sólido de alto desempenho, a eficiência pode variar entre 86% e 90%. Já as caldeiras a óleo e a gás natural têm a capacidade de alcançar eficiências de 90% a 94%. A definição da eficiência da caldeira pode ser expressa como a razão entre a potência calorífica útil e a energia total consumida (Ahtila, 2011).

$$\eta = \frac{Q_{abs}}{Q_{in}}$$

- ✓ η é a eficiência da caldeira
- ✓ Q_{abs} é o calor útil absorvido (calor transferido para o vapor)
- ✓ Q_{in} é a entrada de calor e energia na ebulição

Para determinar a eficiência de uma caldeira, é essencial definir um sistema e identificar os fluxos de energia e massa que atravessam seus limites. O sistema deve ser delineado de modo que todos os fluxos relevantes, como o combustível, o ar de combustão, os gases de combustão e o vapor gerado, possam ser monitorados de forma precisa. Na prática, fluxos menores podem ser negligenciados para simplificação, e reações internas ou recirculações não precisam ser consideradas. A eficiência da caldeira é então calculada com base nos fluxos de entrada e saída do sistema, que são determinantes para a quantidade de calor transferido da combustão para o vapor, observa a figura 4. Os limites do sistema podem variar, sendo que a casa da caldeira é comumente utilizada como referência. No entanto, dispositivos como ventiladores e bombas internas, que desempenham papéis no processo, devem ser considerados ao comparar a eficiência de diferentes tipos de caldeiras. **A norma EN 12952-15** fornece um método padronizado para a definição dos limites do sistema e a medição da eficiência, especialmente em caldeiras de recuperação, considerando todos os fluxos de energia registrados (Ahtila, 2011).

4.8 Métodos de Determinação da Eficiência Térmica de Caldeiras de Recuperação

A determinação da eficiência térmica dos geradores de vapor, especialmente no contexto de caldeiras de recuperação, é fundamental para garantir seu desempenho ideal. De acordo com a **norma EN 12952-15**, a avaliação da eficiência térmica de caldeiras pode ser realizada através de dois métodos distintos: o método direto e o método indireto. A escolha do método depende de diversos fatores técnicos, incluindo a natureza do combustível, a capacidade de medição de fluxos e as condições operacionais da caldeira.

4.8.1 Método Direto

O **método direto** de determinação da eficiência térmica baseia-se na medição direta dos fluxos de calor, como a quantidade de energia fornecida pelo combustível e a energia que é efetivamente convertida em vapor. Esse método envolve medições precisas dos parâmetros operacionais, como temperatura e pressão do vapor gerado, e a quantidade de combustível consumido. A precisão desse método depende fortemente da capacidade de medir corretamente os fluxos de massa de combustível e ar, além da quantidade de calor perdido devido a radiação e convecção.

Este método é ideal para caldeiras de recuperação, especialmente em situações onde os fluxos de combustível podem ser monitorados com precisão. Em caldeiras pequenas ou em condições operacionais estáveis, o método direto oferece uma estimativa mais precisa da eficiência térmica, uma vez que permite uma análise mais detalhada das perdas térmicas e da produção de energia útil.

No entanto, a precisão das medições pode ser afetada por incertezas associadas às perdas de calor por radiação e convecção, que são difíceis de quantificar com precisão. Em caldeiras com grande variação nas propriedades do combustível ou que utilizam combustíveis sólidos, as dificuldades aumentam.

4.8.2 Método Indireto

O **método indireto** de determinação da eficiência térmica é frequentemente utilizado quando a medição direta de fluxos de combustível é complexa ou difícil de realizar com precisão, como é o caso de combustíveis sólidos ou quando há grandes flutuações nas propriedades do combustível. Nesse método, calcula-se a eficiência a partir das perdas térmicas conhecidas (como perdas nos gases de escape, perdas por radiação, etc.) e pela energia total fornecida ao sistema.

Esse método é particularmente útil em grandes paradas de manutenção de caldeiras de recuperação, onde pode ser necessário avaliar a eficiência térmica ao longo do ciclo de operação de forma mais robusta. As perdas térmicas, como a perda de calor nos gases de exaustão e a radiação para as superfícies externas, podem ser determinadas por equações de balanço de energia, baseadas em medições de temperatura e fluxo de gases, sem a necessidade de medições diretas de combustíveis.

4.8.3 Considerações Técnicas

A escolha entre o método direto e indireto depende da situação específica de operação da caldeira de recuperação. Para combustíveis sólidos, ou quando as propriedades do combustível variam significativamente, o método indireto é geralmente preferido, pois permite um cálculo mais seguro das perdas e eficiências sem a necessidade de medições complexas. Por outro lado, quando as medições de fluxo de combustível e ar são precisas e a caldeira opera de maneira estável, o método direto pode ser mais vantajoso.

Ambos os métodos possuem níveis diferentes de incerteza. O método indireto, embora eficaz, pode gerar maiores margens de erro nas estimativas, principalmente se as perdas de calor não forem corretamente quantificadas. Já o método direto, ao exigir medições precisas de fluxos e temperaturas, pode apresentar uma incerteza

considerável nas medições de perdas por radiação e convecção (Standarization, 2003).

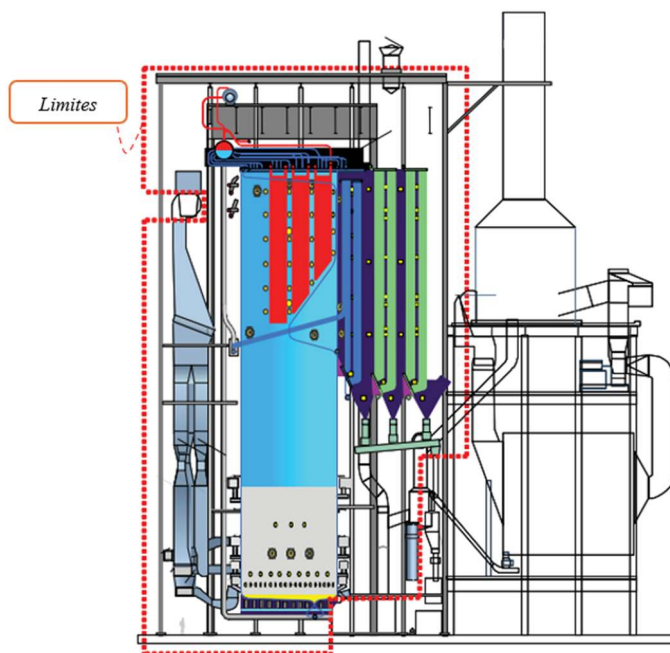


Figura 4.5 – Limites típicos do sistema para uma CR. Fonte: Adaptado (Ahtila, 2011).

A eficiência de uma caldeira de recuperação química (processo Kraft) depende não só do fluxo de energia, mas também de vários fatores, sendo que um dos mais importantes é a manutenção preventiva eficiente. Uma operação eficaz não só reduz os custos operacionais, como também minimiza o impacto ambiental, garantindo a sustentabilidade do processo.

A manutenção preventiva desempenha um papel crucial no desempenho da caldeira de recuperação, uma vez que a falha de componentes críticos, como a caldeira de recuperação, pode comprometer a capacidade de recuperação dos produtos químicos e da energia. Manutenções regulares e bem planejadas asseguram o bom funcionamento do sistema, evitando paragens não programadas e prolongando a vida útil dos equipamentos. Além disso, uma manutenção eficiente contribui para o aumento da segurança, prevenindo acidentes causados por falhas nos sistemas de alta pressão e temperatura envolvidos no processo.

Outros fatores que influenciam a eficiência do processo Kraft incluem a qualidade do licor negro, a temperatura de operação, a quantidade de sólidos presentes no licor e a gestão de resíduos. Contudo, sem uma manutenção adequada, mesmo os melhores sistemas podem apresentar quedas de desempenho, o que pode afetar diretamente a produção e os custos operacionais. Por isso, a manutenção preventiva não é apenas uma prática recomendada, mas um fator essencial para

garantir a otimização do processo e a sustentabilidade económica e ambiental da operação.

4.9 Problemas Operacionais

Embora o princípio do processo de recuperação Kraft seja relativamente simples, a sua implementação com elevados níveis de eficiência implica dificuldades relevantes, quer ao nível da engenharia dos equipamentos, quer no controlo e otimização dos parâmetros operacionais. Os evaporadores multi-efeito, por exemplo, frequentemente enfrentam problemas como incrustação lateral do licor, corrosão dos tubos e formação de espuma, especialmente quando o licor está concentrado.

Estes problemas podem resultar em furúnculos nos evaporadores, elevado consumo de vapor e baixos níveis de sólidos no licor do produto. As caldeiras de recuperação, por sua vez, apresentam diversas dificuldades, incluindo o entupimento dos tubos de transferência de calor, obstrução das passagens de gás de combustão por depósitos próximos ao fogo, corrosão e fissuração dos tubos, danos nos tubos de fundo, circulação inadequada da água e problemas como explosões de água fundida e escoamento instável da fundição. Outros problemas incluem níveis elevados de borras, redução deficiente na fundição, baixa produção de vapor, apagões e emissões atmosféricas.

Dependendo do desempenho da caldeira de recuperação e da forma como os produtos químicos são adicionados ao sistema, o ciclo do licor pode enfrentar acumulação de elementos não processados, como cloreto (Cl) e potássio (K), bem como uma elevada carga morta de Na_2CO_4 e Na_2SO_4 , o que pode resultar em desequilíbrio entre Na e S. Estes problemas operacionais afetam negativamente a qualidade do licor de celulose, a qualidade da celulose, o consumo de energia da planta e a capacidade produtiva. Além disso, estes desafios dificultam o cumprimento das regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas, especialmente durante períodos de perturbação no processo (Vakkilainen, 2007). Por isso é importante salientar a importância de uma manutenção preventiva eficiente para garantir o melhor desempenho da caldeira de recuperação.

4.10 Black Liquor Recovery Boiler Advisory Committee (BLRBAC)

Segundo o *Black Liquor Recovery Boiler Advisory Committee* (BLRBAC), entidade responsável pela definição de orientações técnicas para a operação segura e eficiente de caldeiras de recuperação, são recomendadas diversas boas práticas relativamente à utilização de combustíveis auxiliares nestes sistemas. No seu manual intitulado

Recommended Good Practice – Safe Firing of Auxiliary Fuel in Black Liquor Recovery Boilers (COMMITTEE, 2016), destaca-se a importância da implementação de um **programa de manutenção preventiva**, como medida essencial para garantir a fiabilidade e segurança contínuas do sistema.

Este programa deve obedecer a uma série de requisitos técnicos, entre os quais se incluem:

1. A realização programada de inspeções e testes ao sistema de queima segura de licor negro, com planos previamente definidos, limites de operação claramente estabelecidos e procedimentos de reporte devidamente estruturados.
2. A definição de procedimentos de manutenção que atribuam prioridade máxima ao sistema de queima segura, de forma a garantir uma intervenção célere sempre que forem detetadas anomalias.
3. A existência de um stock mínimo de peças sobressalentes críticas para o sistema, permitindo intervenções rápidas em caso de falha. É recomendada, por exemplo, a disponibilidade de uma cabeça de monitorização de sólidos suplente.
4. A elaboração de um plano de ação para substituição ou reparação imediata do refratómetro sempre que este se encontre fora de funcionamento.
5. A implementação de um programa de testes periódicos e fiáveis, com o objetivo de verificar de forma rigorosa a precisão do refratómetro.

A adoção de um plano de manutenção preventiva bem estruturado revela-se crucial não só para manter a segurança operacional das caldeiras, como também para garantir o seu desempenho a longo prazo. A realização sistemática de inspeções, a verificação de equipamentos e a pronta substituição de componentes desgastados permitem reduzir o risco de falhas imprevistas, prolongar a vida útil dos equipamentos e assegurar uma operação industrial mais eficiente e sustentável.

4.11 Sustentabilidade e a Contribuição das Caldeiras de Recuperação

A **caldeira de recuperação** tem um papel fundamental na **sustentabilidade energética** de processos industriais. Ela é responsável por recuperar o calor residual de processos térmicos, como a queima de combustíveis, que de outra forma seria desperdiçado. Esse calor pode ser reaproveitado para gerar **vapor ou energia elétrica**, reduzindo a necessidade de consumir combustíveis adicionais e, consequentemente, diminuindo o impacto ambiental das operações.

Ao otimizar o uso da energia, as caldeiras de recuperação **reduzem o consumo de fontes fósseis** e, por sua vez, **diminuem as emissões de CO₂**. Esse

aproveitamento do calor residual contribui diretamente para a redução da pegada de carbono da indústria, alinhando-se com os objetivos de **descarbonização** estabelecidos pela **União Europeia**, que visa alcançar a **neutralidade carbónica até 2050**.

Além disso, ao aumentar a **eficiência energética**, essas caldeiras permitem que as empresas cumpram as normas ambientais cada vez mais rigorosas, ao mesmo tempo em que geram **economias de custo** ao diminuir a necessidade de combustíveis externos.

Dessa forma, as caldeiras de recuperação não são apenas uma solução eficiente para o aproveitamento de energia, mas também um contributo essencial para a **sustentabilidade** e a **redução das emissões de CO₂**, ajudando a atingir as metas climáticas da União Europeia.

Observe-se abaixo gráfico em anexo que apresenta a evolução da produção elétrica das fontes renováveis em Portugal de 2020 a 2023 disponível no site A Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG), é possível observar uma tendência crescente na utilização das fontes renováveis, com destaque para a **biomassa**. A biomassa, representada pela terceira barra mais alta ao longo dos anos, desempenha um papel relevante na produção de eletricidade. Em 2023, embora tenha ocorrido uma ligeira queda na sua produção, essa redução foi mínima.

Parte da energia proveniente da biomassa, conforme descrito na figura 4.6, inclui a utilização do licor negro, um subproduto do cozimento dos cavacos de eucalipto. Este processo, conduzido pelas caldeiras de recuperação, tem um papel significativo na produção de energia, ao aproveitar a energia térmica do licor e promover uma maior eficiência e sustentabilidade no setor energético.

Entre 2022 e 2024, observou-se um crescimento médio anual de aproximadamente 2,97% na contribuição da biomassa para o consumo final de energia, o que evidencia a sua valorização crescente enquanto fonte renovável. Esta evolução reforça a relevância das caldeiras de recuperação na otimização do aproveitamento de resíduos industriais, consolidando a biomassa como uma componente cada vez mais estratégica na matriz energética nacional.

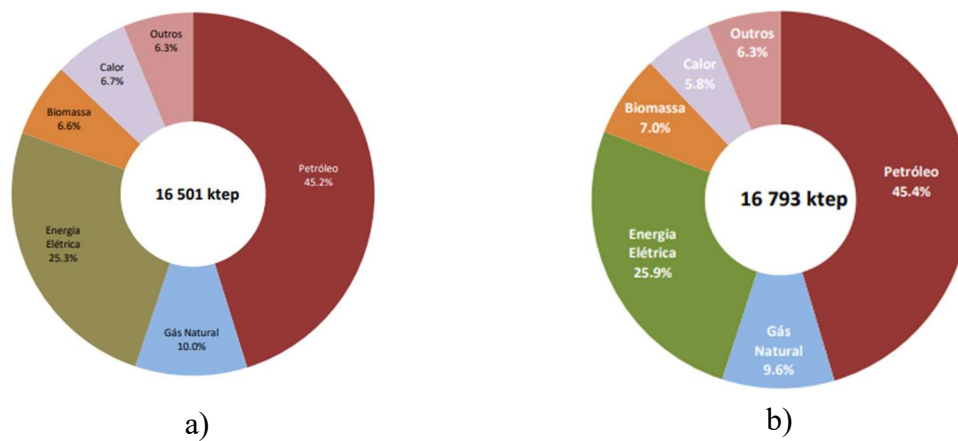


Figura 4.6— a) Consumo de energia final em 2022; b) Consumo de energia final em 2024. Fonte: DGEG, 2024.

4.12 Conceitos Teóricos da Manutenção

4.12.1 Introdução à Manutenção

Segundo a AFNOR, a manutenção é um conjunto de ações que permitem manter ou restabelecer um bem num estado específico ou com possibilidade de assegurar um serviço determinado (Ferreira, 1998). Por outro lado, a NP EN 13306:2010 define a manutenção como a Combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão ao longo do ciclo de vida de um artigo, com o objetivo de mantê-lo ou restaurá-lo a um estado em que possa desempenhar a função necessária.

Em termos práticos, a manutenção é um conjunto de atividades planeadas e executadas com o objetivo de garantir que os equipamentos e sistemas produtivos operem de forma eficiente e com o menor custo possível, preservando a sua funcionalidade e prolongando a sua vida útil.

Envolve a implementação de ações corretivas, preventivas e preditivas, assegurando que os bens se mantenham aptos a desempenhar as suas funções com elevada performance, minimizando falhas e paragens inesperadas. Este processo é fundamental para manter a qualidade do produto final e a segurança dos operadores, além de melhorar a imagem e a competitividade da empresa.

4.12.2 Evolução da Manutenção

Em primeiro lugar, é essencial entender que a manutenção, em qualquer organização, deve estar em contínuo processo de evolução. Ao longo do tempo, a sua importância tem vindo a crescer, acompanhada de um alargamento dos seus objetivos. Inicialmente vista como uma função básica de correção de falhas, a manutenção tem-se transformado numa ferramenta estratégica que contribui para a otimização dos recursos, aumento da eficiência operacional e redução de custos, desempenhando um papel fundamental na sustentabilidade e competitividade das empresas.

A manutenção pode ser dividida em quatro gerações, de forma semelhante às revoluções industriais, conforme a figura 4.7. (Machado *et. al*, 2023).



Figura 4.7– Revoluções industriais. Fonte: (Machado et. al, 2023).

A primeira geração de manutenção, que surge durante a Segunda Guerra Mundial, é marcada pelas primeiras otimizações nas linhas de produção. Até então, os equipamentos eram simples, sobredimensionados e de fácil operação, e a manutenção limitava-se a rotinas de limpeza e lubrificação. A intervenção ocorria apenas quando surgiam avarias, refletindo a baixa fiabilidade dos equipamentos e o elevado desperdício devido ao seu sobredimensionamento. Este período revelou a necessidade de uma abordagem mais eficiente para a gestão da manutenção.

4.12.2.1 SEGUNDA GERAÇÃO

Durante o período entre as décadas de 1950 e 1970, a intensificação da procura por bens industriais, aliada à diminuição da disponibilidade de mão-de-obra, incentivou a automação das linhas de produção. Este avanço contribuiu para uma maior complexidade nos processos industriais e, consequentemente, para o aumento dos custos associados à reparação de equipamentos. Para minimizar esses custos, as empresas passaram a adotar a manutenção preventiva, com intervenções programadas e o desenvolvimento de sistemas de planeamento e controlo de manutenção. A procura por prolongar a vida útil dos ativos tornou-se uma prioridade devido ao elevado custo de capital. Estas mudanças marcaram a segunda geração de estratégias de manutenção industrial.

4.12.2.2 TERCEIRA GERAÇÃO

A terceira geração da manutenção, iniciada na década de 1970, foi impulsionada pela adoção do sistema Just-in-Time, que reduziu os stocks e tornou as paragens mais impactantes para a produção. Neste período, aumentaram as preocupações com a segurança e o meio ambiente, e a manutenção preditiva começou a ser implementada. Apesar dos avanços, persistiam falhas de comunicação entre engenharia, manutenção e operações, resultando em falhas prematuras nos equipamentos. Novos desafios exigiram o desenvolvimento de técnicas de manutenção mais eficazes.

4.12.2.3 QUARTA GERAÇÃO

A quarta geração da manutenção, que teve início na década de 1990, preservou alguns elementos da geração anterior, mas passou a centrar-se na fiabilidade dos ativos como objetivo principal, sendo a disponibilidade considerada um dos indicadores de desempenho mais relevantes. A engenharia da manutenção foi consolidada na gestão e planeamento, com o intuito de garantir confiabilidade e manutenibilidade. A análise de falhas surgiu como uma metodologia importante para melhorar o desempenho dos equipamentos, enquanto a manutenção preventiva programada deu lugar à utilização de métodos preditivos e à monitorização contínua. A transição de abordagens reativas para preventivas e preditivas reflete uma mudança de mentalidade, priorizando a antecipação de falhas e a redução do tempo de inatividade. Isto resultou em maior produtividade e na redução dos custos de manutenção.

4.12.3 Conceito Gerais da Manutenção

A manutenção corretiva refere-se à intervenção realizada após a ocorrência de uma avaria (Ferreira, 1998). Este tipo de manutenção pode assumir diferentes abordagens, dependendo do objetivo da intervenção. A manutenção corretiva paliativa tem como finalidade resolver temporariamente a falha, permitindo restabelecer o funcionamento do equipamento o mais rapidamente possível. No entanto, não oferece uma solução definitiva, sendo de carácter provisório.

Por outro lado, a manutenção corretiva pode ser planeada ou não planeada, tendo como objetivo a resolução definitiva da avaria. Neste caso, procura-se restabelecer o equipamento às suas condições ideais de funcionamento, com a máxima qualidade possível. Ao contrário da abordagem paliativa, esta intervenção centra-se em reparações duradouras, como a substituição de componentes danificados, podendo envolver reparos, alinhamentos, balanceamentos ou até a substituição total do equipamento.

Para além da manutenção corretiva, destaca-se a manutenção preventiva, que consiste na realização de intervenções em intervalos pré-determinados ou de acordo com critérios definidos, com o objetivo de reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um equipamento (EN 13306:2010). No âmbito da manutenção preventiva, distinguem-se diferentes abordagens, nomeadamente a **manutenção preventiva sistemática**, a **manutenção preventiva condicional**, a **manutenção preventiva preditiva** e a **manutenção preventiva prescritiva**.

A **manutenção preventiva sistemática** é realizada com base em intervalos de tempo ou utilização previamente definidos, sem investigação do estado do equipamento (EN 13306:2010). Esta abordagem assenta em recomendações do

fabricante e no histórico de funcionamento, permitindo prevenir falhas mesmo na ausência de sinais evidentes.

Por sua vez, a **manutenção preventiva condicional** baseia-se na monitorização e inspeção do estado dos equipamentos, bem como na realização de ensaios e análises, sendo as intervenções definidas com base nos resultados obtidos (EN 13306:2010), permitindo uma atuação mais eficiente e direcionada.

A **manutenção preventiva preditiva** é baseada na condição do equipamento e realizada a partir de previsões obtidas através da análise de parâmetros de degradação (EN 13306:2010), recorrendo a técnicas como vibração e termografia para antecipar falhas e evitar paragens não programadas.

Por fim, a **manutenção preventiva prescritiva** constitui uma evolução da preditiva, pois para além de prever falhas, recomenda ações específicas com base na análise de dados e modelos avançados, contribuindo para uma manutenção mais proativa e eficiente (Machado et al., 2023).



Figura 4.8 – Pilares e ferramentas da manutenção prescritiva. Fonte: (Machado et. al, 2023).

Tabela 4.1– Comparação entre tipos de manutenção. Fonte: Adapta de (Machado *et. al*, 2023).

ESTRATÉGIA	RESUMO	CUSTO PARA IMPLEMENTAR	VANTAGENS	DESVANTAGENS
CORRETIVA	Corrige quando ocorre uma falha	Baixo	Custos iniciais inferiores aos da manutenção preventiva	Elevados custos com mão-de-obra, peças e serviços
PREVENTIVA	Manutenção realizada de acordo com um cronograma	Médio	Maior facilidade no cumprimento dos programas de produção	Requer planeamento detalhado e uma estratégia bem definida
PREDITIVA	Baseada na monitorização e acompanhamento por sensores	Alto	Monitorização contínua em tempo real	Elevado custo e viável sobretudo para equipamentos críticos
PRESCRITIVA	Baseada no uso de ML e IA	Alto	Suporte à tomada de decisão mais informada e eficiente	Elevados custos de implementação e tempo até atingir eficácia

No âmbito dos conceitos gerais da manutenção, para além dos tipos de manutenção, destacam-se propriedades fundamentais como a manutenibilidade e a fiabilidade, bem como a disponibilidade, essencial para a avaliação do desempenho dos equipamentos.

A **manutenibilidade** refere-se à capacidade de um item, sob determinadas condições de utilização, de ser mantido ou restaurado a um estado em que possa desempenhar a função requerida, quando a manutenção é realizada sob condições específicas e utilizando procedimentos e recursos definidos (EN 13306:2010).

Por sua vez, a **fiabilidade** corresponde à capacidade de um item executar a função necessária sob determinadas condições, durante um intervalo de tempo especificado (EN 13306:2010).

A **disponibilidade**, também designada por *uptime*, diz respeito à capacidade de um sistema ou equipamento estar pronto para funcionar quando necessário, assumindo que os recursos externos requeridos estão disponíveis (EN 13306:2010). Este indicador mede a probabilidade de um sistema operar de forma satisfatória

durante o seu período de funcionamento, tendo em consideração o tempo necessário para reparações (Souza, 2008). O valor ideal deste índice é 1, correspondendo a um funcionamento contínuo sem interrupções, sendo um parâmetro fundamental para a eficiência operacional e redução de tempos de inatividade.

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100 \quad (1)$$

MTBF – (Mean Time Between Failures), ou **Tempo Médio Entre Falhas**: é uma métrica para usada para medir a fiabilidade de um sistema ou equipamento. A fórmula básica para calcular o MTBF é:

$$MTBF = \frac{\text{Total de falhas}}{\text{Número total de período de tempo}} \quad (2)$$

MTTR – Mean Time to Repair: o tempo médio para reparo medido em horas. Engloba todo o período de tempo em que o equipamento está indisponível para utilização (Souza, 2008).

$$MTTR = \frac{\text{Tempo total de reparação}}{\text{Numeros de reparação}} \quad (3)$$

Relativamente aos conceitos gerais da manutenção, destacam-se ainda conceitos como a inspeção, o defeito e a falha, fundamentais para a caracterização do estado dos equipamentos.

A **inspeção** consiste no exame da conformidade através da medição, observação ou ensaio das características relevantes de um elemento (EN 13306:2010), sendo uma atividade essencial para a deteção precoce de anomalias e apoio à tomada de decisão em manutenção.

O **defeito** corresponde ao estado de um item caracterizado pela incapacidade de desempenhar uma função requerida, excluindo situações associadas a manutenção planeada ou à falta de recursos externos (EN 13306:2010). Trata-se de uma alteração nas condições do equipamento que, embora não implique uma falha imediata, pode evoluir para uma situação mais crítica caso não seja corrigida.

Por sua vez, a **falha** define-se como a cessação da capacidade de um item desempenhar a função requerida (EN 13306:2010). Esta condição representa a perda total ou parcial da funcionalidade de um equipamento, conduzindo geralmente à sua indisponibilidade e à necessidade de intervenção de manutenção.

4.12.4 Ciclo de Vida

Ciclo de vida – série de fases pelas quais um item passa, desde a sua conceção até à sua eliminação. (EN 13306:2010).

O ciclo de vida de um equipamento inclui várias etapas, desde a sua conceção até ao descarte final. Começa com a aquisição, onde são definidas as especificações e a compra do item. Segue-se com a instalação e operação, garantindo que o equipamento funcione conforme o esperado. A fase de manutenção visa prolongar a vida útil do equipamento, com ações preventivas e corretivas. Por fim, o ciclo termina com a desativação e descarte, garantindo o reaproveitamento ou eliminação adequada do equipamento.



Figura 4.9 – Ciclo de vida do equipamento.

4.12.5 Plano de Manutenção

Conjunto estruturado e documentado de tarefas que inclui as atividades, os procedimentos, os recursos e a calendarização necessários para realizar a manutenção. (EN 13306:2010).

Um plano de manutenção é um conjunto estruturado e documentado de tarefas que visa garantir o bom funcionamento dos equipamentos ao longo do tempo. Inclui atividades específicas, procedimentos detalhados, recursos necessários e o tempo estimado para a execução das manutenções. Este plano pode abranger manutenção preventiva, corretiva e preditiva, conforme as necessidades do equipamento. A sua elaboração é fundamental para minimizar falhas inesperadas, aumentar a eficiência dos sistemas e prolongar a vida útil dos ativos. Em Engenharia Mecânica, um plano bem desenvolvido contribui significativamente para a redução de custos operacionais e para o aumento da fiabilidade dos equipamentos.

4.12.6 Gestão da Manutenção

O fluxograma de manutenção, de acordo com a norma portuguesa NP EN 13460:2009, organiza o processo de gestão das atividades de manutenção de forma sistemática e eficiente, com o objetivo de maximizar a disponibilidade e o desempenho dos equipamentos. Abrange desde a definição e planeamento das tarefas até à execução e análise dos resultados, permitindo um controlo rigoroso sobre as operações. Este processo estruturado garante a resposta adequada tanto a necessidades preventivas como corretivas, promovendo a continuidade das operações e a redução de avarias.

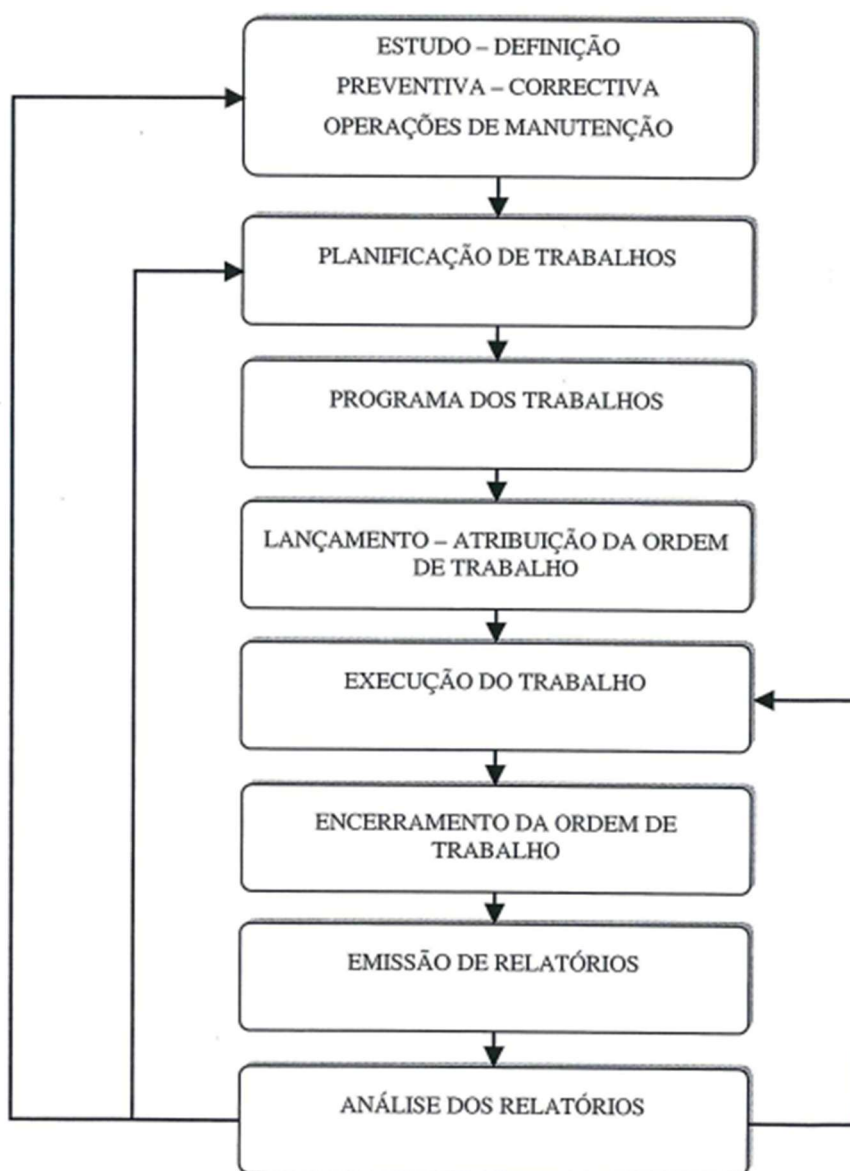


Figura 4.10 – Diagrama de fluxo da manutenção. Fonte: NP EN 13460:2009.

4.12.7 Manutenção Estratégica

Estratégia de manutenção - Método de gestão utilizado para alcançar os objetivos da manutenção. (EN 13306:2010).

Não existe uma solução única ou universal que resolva todos os desafios associados à gestão da manutenção. Nenhuma metodologia ou estratégia de manutenção pode ser considerada superior em todas as situações. Cada abordagem tem o seu contexto e aplicação específicos, sendo que o verdadeiro desafio está em identificar qual a mais adequada para cada realidade organizacional.

A escolha da estratégia ideal dependerá das necessidades concretas da empresa, do nível de criticidade dos seus processos e dos custos associados, seja em termos de produção, seja devido a eventuais perdas causadas por interrupções não planeadas. Além disso, distintas organizações podem adotar definições próprias: aquilo que uma considera manutenção corretiva planeada, outra pode classificar como manutenção preventiva. Estas variações, muitas vezes influenciadas por fatores culturais ou estruturais, devem ser bem compreendidas, pois impactam diretamente a aceitação e eficácia de novas práticas de manutenção.

A manutenção, quando integrada de forma estratégica, deve alinhar-se com os objetivos globais da organização. Não se trata apenas de reparar rapidamente um equipamento avariado, mas sim de garantir que esse equipamento esteja disponível e funcional sempre que necessário, reduzindo ao mínimo as paragens imprevistas e garantindo a continuidade operacional.

Para orientar a definição de metas e a evolução da função de manutenção, recomenda-se a utilização do benchmarking — a comparação com práticas de referência no setor. Quando essa abordagem não for viável, as metas podem ser definidas com base numa análise realista do ambiente competitivo em que a organização está inserida.

4.12.8 Fase Preparatória da Manutenção: Documentação, Procedimentos e Recursos

O diagrama apresenta a estrutura organizacional e documental definida na norma **NP EN 13460:2009 – Documentação para a Manutenção**, referente à fase preparatória das atividades de manutenção industrial. Esta fase contempla a elaboração e atualização dos planos de manutenção preventiva e corretiva, a identificação e gestão de peças sobressalentes, bem como a estimativa e afetação de recursos humanos e materiais. Inclui ainda os procedimentos e formulários de apoio necessários, como as ordens de trabalho, as folhas de planificação e de programação, que garantem a rastreabilidade e o controlo das intervenções de manutenção.

A implementação adequada desta fase visa assegurar a disponibilidade de toda a informação e dos meios indispensáveis à execução eficiente das tarefas de manutenção, promovendo a continuidade operacional, a fiabilidade dos equipamentos e a redução de paragens não planeadas. Além disso, contribui para uma gestão mais eficaz dos recursos e para a melhoria contínua do sistema de manutenção, alinhando as práticas operacionais com as exigências normativas e os objetivos estratégicos da organização. (Ver Figura 4.11).

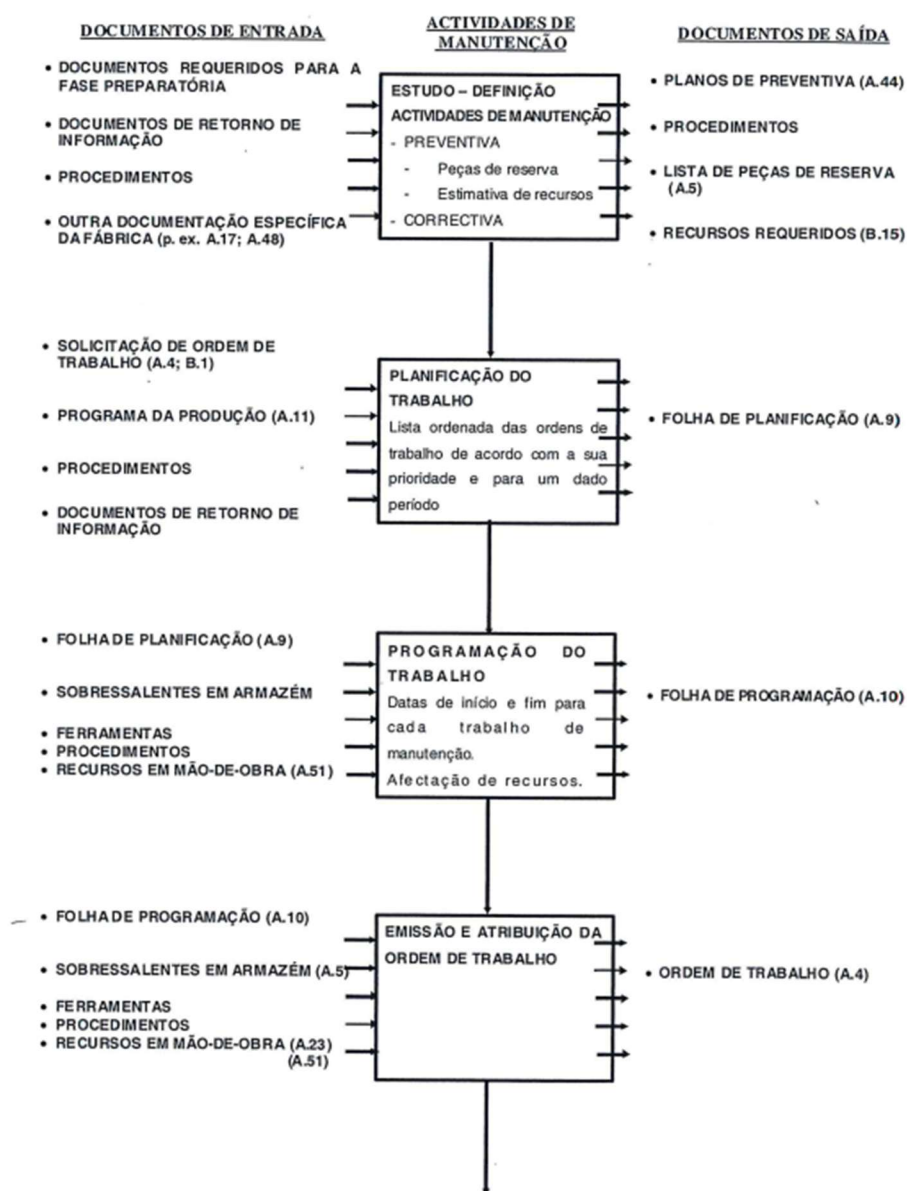


Figura 4.11 - Fase Preparatória da Manutenção: Documentação, Procedimentos e Recursos. Fonte: NP EN 13460:2009 — Documentação para a Manutenção.

4.12.9 Gestão da Manutenção com Base em KPI

A norma **NP EN 15341:2009** estabelece um sistema estruturado de **indicadores de desempenho da manutenção (KPI)**, permitindo avaliar e monitorizar a eficácia e eficiência das atividades de manutenção. Estes indicadores consideram a influência de diversos fatores — económicos, técnicos e organizacionais — e constituem uma ferramenta fundamental para apoiar a **tomada de decisão e a melhoria contínua** na gestão da manutenção.

A aplicação destes KPIs é particularmente relevante para a **manutenção preventiva**, uma vez que permite identificar antecipadamente falhas potenciais, otimizar a alocação de recursos e reduzir paragens não planeadas. Ao medir o desempenho da manutenção preventiva de forma sistemática, as organizações conseguem assegurar a fiabilidade dos equipamentos, prolongar a vida útil dos ativos e promover a excelência na gestão dos bens imobilizados, em linha com as melhores práticas definidas pela norma. (NP EN 15341:2009 – *Manutenção: Indicadores de desempenho da manutenção (KPI)*).

Indicador

Característica medida (ou conjunto de características) de um fenómeno, de acordo com uma específica que avalia a sua evolução. (NP EN 15341:2009).

4.12.10 Melhores Práticas

Segundo Paschoal et al. (2009), a implementação de uma gestão de manutenção eficaz, com o objetivo de melhorar a competitividade, deve ser sustentada por um conjunto de melhores práticas. Estas práticas são essenciais para garantir que as organizações consigam fazer a transição da sua "Situação Atual" para a "Visão de Futuro", atingindo as metas estabelecidas. O sucesso não depende apenas de identificar essas práticas, mas sobretudo de ter a capacidade de liderar a sua implementação de forma rápida e eficiente, garantindo que a organização esteja alinhada com os seus objetivos estratégicos.

Algumas das melhores práticas de gestão da manutenção incluem:

- a) Os líderes, em todos os níveis da organização, devem ser responsáveis pela condução do processo de sensibilização, formação, implementação e auditoria das melhores práticas de Saúde, Meio Ambiente e Segurança (SMS).

b) A gestão deve ser orientada por indicadores empresariais, como disponibilidade, fiabilidade, impacto ambiental, custos, qualidade, segurança e outros indicadores específicos, que devem ser analisados de forma crítica e periódica.

c) A gestão integrada do orçamento (manutenção e operação) deve ser centrada nos resultados empresariais, através de uma análise detalhada das receitas e custos. Além disso, é crucial realizar uma análise crítica e priorizar as intervenções com base na disponibilidade, fiabilidade operacional e nos resultados desejados para o negócio.

d) A utilização de pessoal qualificado e certificado deve ser garantida, para assegurar a eficácia das operações de manutenção.

e) A contratação de serviços deve ser, sempre que possível, orientada por resultados e parcerias, com indicadores de desempenho alinhados às metas da organização, como disponibilidade, fiabilidade, custos, segurança, prazos de atendimento e preservação ambiental.

Estas práticas são fundamentais para a gestão da manutenção, e a sua implementação estratégica é um meio de garantir maior competitividade.

4.12.11 Níveis de Manutenção

➤ Segundo Ferreira (1998, p.7) a AFNOR descreve 5 níveis de manutenção:

1º Nível – Afinação simples prevista pelo construtor sem desmontagem do equipamento ou substituição de elementos acessíveis com toda a segurança. Operador.

2º Nível – Reparações através de substituição de elementos standard previsto para este efeito ou operações menores de manutenção preventiva (Rondas). Técnicos habilitados. Em algumas situações, o operador.

3º Nível – Identificação e diagnóstico das avarias, reparação por substituição de componentes funcionais, reparações mecânicas menores. Técnicos especializado no local ou equipa de manutenção.

4º Nível – Trabalhos importantes de manutenção curativas, corretivas ou preventivas. Equipa de manutenção

5º Nível – Trabalhos de renovação, de construção ou reparações importantes numa oficina central ou por subcontratação. Equipa completa de manutenção polivalente.

- Assim como a AFNOR, a norma europeia EN 13306:2010 fala sobre 5 níveis da manutenção.

O nível 1 é caracterizado por ações simples realizadas com treinamento mínimo.

O nível 2 é caracterizado por ações básicas que devem ser realizadas por pessoal qualificado usando procedimentos detalhados.

O nível 3 é caracterizado por ações complexas realizadas por pessoal técnico qualificado usando procedimentos detalhados.

O nível 4 é caracterizado por ações que implicam o know-how de uma técnica ou tecnologia e realizadas por pessoal técnico especializado.

Nível 5 caracteriza-se por ações que implicam um conhecimento detido pelo fabricante ou por uma empresa especializada com equipamentos de apoio logístico industrial.

A comparação entre os níveis de manutenção descritos pela AFNOR e pela norma Portuguesa EN 13306:2010 permite uma análise mais detalhada das práticas e competências necessárias em cada estágio de manutenção. Ambas as abordagens identificam cinco níveis, mas com diferenças nas definições e ênfases.

- **1º Nível (AFNOR) e Nível 1 (EN 13306:2010):** Ambos envolvem tarefas simples e de baixo nível técnico. Na AFNOR, são afinações simples realizadas pelo operador, sem necessidade de desmontagem, enquanto na EN 13306:2010, são ações realizadas com formação mínima, podendo também ser executadas pelo operador.

- **2º Nível (AFNOR) e Nível 2 (EN 13306:2010):** A AFNOR descreve o nível 2 como reparações menores realizadas por técnicos qualificados ou, em alguns casos, pelo operador. Na EN 13306:2010, este nível envolve ações básicas, sempre executadas por pessoal qualificado, com procedimentos específicos detalhados.

- **3º Nível (AFNOR) e Nível 3 (EN 13306:2010):** Ambos os níveis envolvem diagnósticos e reparações mais complexas, como a substituição de componentes funcionais ou mecânicos. A principal diferença é que, na AFNOR, a reparação pode ser realizada no local, enquanto na EN 13306:2010, há um foco mais claro em ações realizadas por pessoal técnico qualificado.

- **4º Nível (AFNOR) e Nível 4 (EN 13306:2010):** A AFNOR descreve este nível como envolvendo trabalhos significativos de manutenção curativa, corretiva ou preventiva realizados por equipas de manutenção. Na EN

13306:2010, o nível 4 é caracterizado por ações que requerem know-how técnico especializado, realizadas por pessoal altamente qualificado.

• **5º Nível (AFNOR) e Nível 5 (EN 13306:2010):** Ambos os níveis se referem a tarefas de maior complexidade, como renovação, construção ou reparações importantes, com a AFNOR a destacar o uso de uma equipa polivalente ou a subcontratação. Na EN 13306:2010, este nível envolve ações que exigem conhecimento especializado, muitas vezes detido pelo fabricante ou empresas especializadas, com equipamentos de apoio logístico industrial.

A principal semelhança entre ambas as normas é a categorização dos níveis de manutenção com base na complexidade e especialização dos serviços. A diferença principal reside na terminologia e nos detalhes de implementação, sendo que a AFNOR foca mais na atribuição das responsabilidades, enquanto a EN 13306:2010 detalha mais explicitamente os requisitos de qualificação técnica e procedimentos.

4.12.12 Expectativas Económicas da Manutenção

A dimensão económica da manutenção está diretamente associada ao controlo de custos e à melhoria da eficiência operacional. A adoção de estratégias de manutenção preventiva e preditiva permite reduzir a ocorrência de paragens imprevistas e minimizar custos associados a intervenções corretivas.

Uma manutenção adequada contribui para a redução de custos diretos relacionados com avarias e interrupções de produção, aumentando a fiabilidade dos equipamentos e, consequentemente, a produtividade. Por exemplo, a manutenção regular de componentes críticos, como o soprador de fuligem de uma caldeira, permite evitar problemas como a acumulação de cinzas ou corrosão, que podem originar falhas graves no sistema.

Adicionalmente, uma manutenção planeada possibilita uma gestão mais eficiente das peças de reposição, permitindo antecipar necessidades e evitar tanto a falta de componentes como o excesso de stock. Do mesmo modo, a manutenção adequada contribui para a redução do consumo energético, nomeadamente através da deteção e correção de fugas em sistemas de vapor ou ar comprimido, promovendo uma maior eficiência dos processos.

Para além dos aspetos económicos diretos, a manutenção desempenha também um papel importante na gestão do conhecimento, através do registo de procedimentos e experiências, facilitando a sua transmissão entre operadores e garantindo a continuidade operacional.

Por fim, importa considerar os impactos intangíveis associados à manutenção, uma vez que falhas no desempenho dos equipamentos podem comprometer a qualidade do produto, os prazos de entrega e a satisfação do cliente. Situações como

falhas recorrentes numa caldeira de recuperação podem conduzir a interrupções na produção e a perdas financeiras significativas (Paschoal et al., 2009).

4.12.13 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva constitui uma abordagem estratégica centrada na deteção precoce de sinais de desgaste ou falhas em equipamentos, através da monitorização contínua ou periódica de parâmetros operacionais. Esta metodologia baseia-se na recolha e análise de dados provenientes de sensores e históricos de funcionamento, permitindo uma avaliação precisa do estado real dos sistemas.

Ao contrário da manutenção corretiva, que apenas intervém após a ocorrência de uma avaria, e da manutenção preventiva, baseada em planos previamente definidos, a manutenção preditiva permite um planeamento mais eficaz, ajustado às condições reais dos equipamentos. Desta forma, contribui para a redução de paragens não planeadas, diminuição de custos operacionais e aumento da segurança e fiabilidade dos processos industriais.

Tradicionalmente, os ambientes industriais adotavam uma abordagem reativa, intervindo apenas após a ocorrência de falhas, o que resultava em elevados custos e tempos de inatividade. Neste contexto, a manutenção preditiva surge como uma solução eficaz, permitindo antecipar necessidades de intervenção com base na análise contínua do desempenho dos equipamentos (Raza, 2023).

Com o desenvolvimento da Indústria 4.0, nomeadamente através da Internet das Coisas (IoT), sistemas ciberfísicos, Big Data e Inteligência Artificial, a manutenção preditiva tem vindo a assumir um papel cada vez mais relevante. A integração destas tecnologias permite melhorar a capacidade de previsão e diagnóstico, transformando dados em informação útil e promovendo uma gestão mais eficiente e sustentável dos ativos industriais (PricewaterhouseCoopers, 2017).



Figura 4.12 – Matriz de Maturidade do PDM. Fonte: Adaptado (PricewaterhouseCoopers, 2017).

4.12.13.1 Princípios Fundamentais da Manutenção Preditiva

A filosofia da manutenção preditiva parte do princípio de que a maioria das falhas nos sistemas mecânicos e eletromecânicos apresenta sinais precoces de degradação, detetáveis através de técnicas apropriadas de monitorização da condição. O objetivo é identificar esses sinais com antecedência suficiente para permitir uma intervenção planeada, reduzindo significativamente o risco de paragens imprevistas e de avarias catastróficas.

Entre os parâmetros mais frequentemente monitorizados destacam-se:

- Vibrações mecânicas
- Temperatura de funcionamento
- Pressão de operação
- Propriedades físico-químicas de lubrificantes

A análise destas variáveis, quando integrada num sistema de gestão da manutenção, permite inferir o estado funcional dos equipamentos e prever o tempo de vida útil remanescente (*Remaining Useful Life – RUL*).

4.12.13.2 Técnicas de Diagnóstico e Monitorização

A eficácia da manutenção preditiva está intimamente ligada à correta seleção e aplicação das técnicas de diagnóstico. Entre as mais comuns, destacam-se:

➤ Análise Vibrações

Durante o seu funcionamento, todas as máquinas produzem vibrações, fenómeno que resulta da Ação de forças dinâmicas sobre os seus componentes. Com o passar do tempo, estas vibrações contribuem para o desgaste progressivo dos elementos mecânicos, manifestando-se numa alteração do comportamento vibratório da estrutura da máquina.

A monitorização da evolução dos níveis de vibração permite obter informações relevantes sobre o estado de funcionamento do equipamento. O princípio da análise de vibrações baseia-se no facto de que, quando sujeitas a excitações dinâmicas, as estruturas das máquinas respondem com sinais vibratórios cuja frequência está relacionada com a frequência das forças excitadoras.

Para possibilitar esta monitorização, são instalados sensores de vibração em pontos estratégicos da máquina. Estes sensores captam os sinais vibratórios transmitidos através da estrutura, permitindo o seu registo e posterior análise.

Através desta técnica, é possível detetar de forma precoce a presença de anomalias ou falhas em desenvolvimento, que poderão comprometer o desempenho ou a integridade da máquina. Entre os principais problemas identificáveis encontram-se desbalanceamentos, desalinhamentos, folgas mecânicas, falhas em rolamentos e irregularidades em engrenagens ou ainda lubrificação deficiente, folga excessiva em buchas, falta de rigidez, problemas aerodinâmicos, problemas hidráulicos e cavitação.

Desta forma, a análise de vibrações assume um papel fundamental na manutenção preditiva, contribuindo significativamente para o aumento da fiabilidade e da durabilidade dos equipamentos industriais (Neves, 2008).

➤ Termografia Infravermelha

A termografia é uma técnica de diagnóstico não destrutiva que permite identificar falhas em sistemas elétricos e mecânicos através da medição de temperatura. Utilizando câmaras termográficas sensíveis à radiação infravermelha —

invisível ao olho humano — esta tecnologia converte as variações térmicas em imagens a cores, que representam um "mapa térmico" da superfície observada.

Os equipamentos eletromecânicos funcionam dentro de uma faixa de temperatura ideal. Qualquer desvio em relação a essa faixa, seja superior ou inferior, pode ser indicativo de anomalias e comprometer tanto o desempenho como a durabilidade dos componentes. O aumento da temperatura acima do recomendado acelera o desgaste dos materiais, podendo levar a avarias ou falhas prematuras.

A termografia é amplamente utilizada em ambientes industriais, nomeadamente na inspeção de quadros elétricos de média e alta tensão, motores, subestações, sistemas de alimentação ininterrupta (UPS) e outras instalações elétricas. Entre as anomalias mais comuns detetadas encontram-se ligações soltas, oxidação de componentes, sobrecargas, falhas de isolamento e resistência elétrica elevada.

No domínio mecânico, a técnica permite a deteção de problemas como desalinhamentos, atrito excessivo, falhas em rolamentos e deficiente lubrificação. Assim, a análise termográfica constitui uma ferramenta eficaz na manutenção preditiva, possibilitando intervenções planeadas e prevenindo paragens inesperadas dos equipamentos (Okada, 2020).

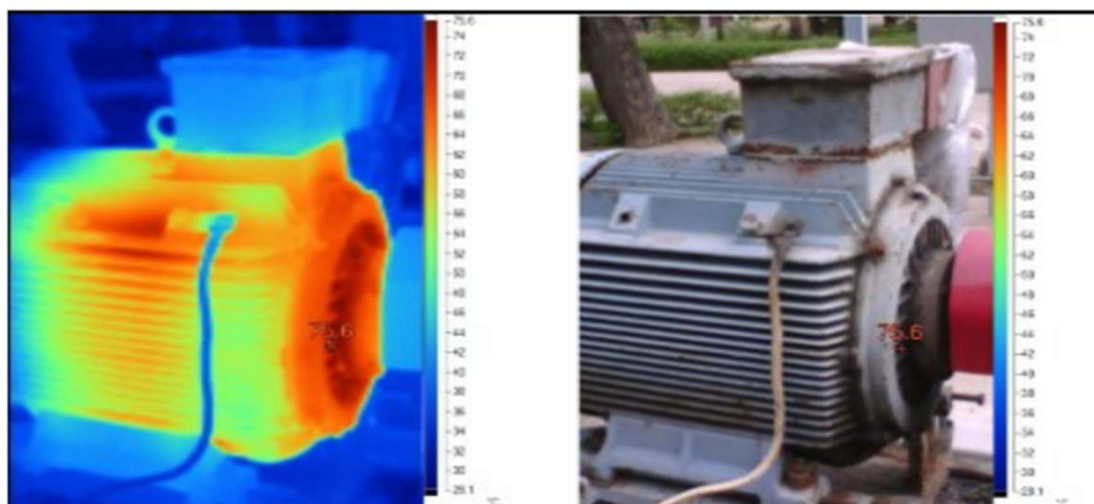


Figura 4.13 – Termografia em Motor elétrico. Fonte: (Okada, 2020).

➤ **Análise de Óleos e Lubrificantes**

A análise de óleos e lubrificantes constitui uma ferramenta fundamental no âmbito da manutenção preditiva de sistemas mecânicos e hidráulicos (Neves, 2008). Este processo permite obter informações valiosas sobre o estado interno dos componentes, o nível de contaminação do sistema e as condições do próprio lubrificante.

Recorrendo a técnicas laboratoriais especializadas — que envolvem o uso de equipamentos como viscosímetros, espectrómetros, reagómetros, centrífugas, entre outros — é possível avaliar propriedades essenciais dos óleos, tais como o índice de viscosidade, acidez, alcalinidade, ponto de fulgor e ponto de congelamento. Para além destas características físico-químicas, a análise permite igualmente identificar contaminantes críticos, como partículas metálicas provenientes do desgaste de componentes, resíduos de carbono e presença de água (Neves, 2008).

A monitorização contínua destas variáveis permite não só determinar o momento ideal para a substituição do lubrificante, evitando trocas prematuras ou tardias, como também detetar precocemente sinais de falha ou degradação de componentes internos, contribuindo assim para uma gestão mais eficiente da manutenção, com ganhos significativos em termos de fiabilidade, durabilidade dos equipamentos e redução de custos operacionais.

➤ **Monitorização Ultrassónica**

Os ensaios ultrassónicos são amplamente utilizados na indústria para a deteção de falhas internas em materiais, como metais e não-metais. Este método baseia-se na emissão de ondas acústicas de alta frequência através de um transdutor, que transmite as ondas para o interior do material. As ondas acústicas são refletidas pelas discontinuidades e os ecos retornados são analisados para identificar a localização e as características das falhas presentes.

A monitorização por ultrassons é utilizada para detetar:

- **Falhas internas em materiais**
- **Fugas em sistemas pressurizados**
- **Defeitos em soldaduras e rolamentos**

Trata-se de uma técnica não destrutiva altamente eficaz, amplamente utilizada em manutenção preditiva para garantir a integridade estrutural e funcional dos activos industriais (Barulho, 2011). Esta técnica permite inspecionar grandes volumes de material, sem comprometer a sua estrutura, o que a torna uma ferramenta indispensável em várias indústrias.



Figura 4.14 – Aplicação de análise ultrassónica. Fonte: (Barulho, 2011).

4.12.14 Vantagens da Abordagem Preditiva

A implementação eficaz da manutenção preditiva pode traduzir-se em diversos benefícios operacionais e económicos:

- Diminuição significativa das paragens não programadas
- Redução de custos associados à manutenção corretiva
- Prolongamento da vida útil dos ativos
- Melhoria da segurança operacional
- Maior previsibilidade na gestão de recursos e peças sobressalentes
- Aumento da eficiência energética dos sistemas

4.12.15 Desafios e Limitações

Apesar dos seus reconhecidos benefícios, a adoção da manutenção preditiva não está isenta de constrangimentos, entre os quais se salientam:

- ✓ Investimento inicial elevado em sensores, equipamentos de aquisição de dados e plataformas de análise
- ✓ Complexidade na integração com sistemas existentes (como ERPs ou sistemas de gestão da manutenção – CMMS)
- ✓ Necessidade de formação especializada para a interpretação dos dados
- ✓ Gestão e tratamento de grandes volumes de dados em tempo real

Aplicação de Técnicas de Análise de Falhas para Reestruturação de Planos de Manutenção: Caso de Estudo numa Caldeira de Recuperação na Biotek

Além disso, a eficácia da manutenção preditiva depende fortemente da qualidade e frequência da recolha de dados, bem como da fiabilidade dos algoritmos preditivos utilizados.

5 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

5.1 Manutenção na Biotek

O **Serviço de Manutenção** é um organismo dentro da Biotek, estruturado em diversas secções. O **Diretor de Manutenção** é responsável pela organização e gestão global das atividades de manutenção. Os **Chefes de Serviço** coordenam e supervisionam a execução das operações, enquanto os **Preparadores de Trabalho** garantem o fornecimento de todo o material necessário, incluindo o aprovisionamento e a elaboração dos planos de manutenção. Por fim, os **Encarregados** são os responsáveis pela intervenção direta nos equipamentos, emitindo as ordens de execução e assegurando que as tarefas sejam realizadas de acordo com as diretrizes estabelecidas.

O **Serviço de Manutenção** da Biotek colabora com empresas externas para apoiar diversas vertentes da manutenção. Um exemplo disso é a realização de manutenção preditiva, onde a empresa contratada efetua medições regulares nas linhas de produção, elaborando relatórios detalhados com os resultados obtidos. Esses relatórios são depois enviados ao gabinete de fiabilidade, que procede à sua análise. Com base nas medições e nas recomendações do técnico responsável pela manutenção preditiva, são tomadas as medidas corretivas necessárias.

5.1.1 Departamento da Manutenção

O Departamento de Manutenção está estruturado em várias áreas: Mecânica, Elétrica e Instrumentação. Cada uma dessas áreas é responsável pela inspeção, preparação e planeamento das atividades de manutenção, tanto para as linhas de produção e de energia, sistemas auxiliares, como a estação de tratamento de águas residuais e industriais (ETAR e ETARI).

Como ilustrado no Organograma Hierárquico, estes departamentos têm a responsabilidade de preparar e planear a manutenção de todas as áreas, zonas ou serviços da fábrica. As três áreas têm as seguintes funções principais:

- Gestão dos equipamentos em operação ou em armazém;
- Elaboração dos planos de manutenção preventiva;
- Planeamento e calendarização das atividades de manutenção;
- Realização de inspeções técnicas aos equipamentos;
- Gestão dos contratos relacionados com a manutenção;
- Supervisão do "STOP11", incluindo os desenhos técnicos e a manutenção preditiva (sob responsabilidade da Mecânica);
- Gestão dos sistemas Q+S+A (incluindo emissões, calibrações, grupos de socorro, entre outros).

5.1.2 Organização dos Tipos de Manutenção - Biotek

O Organograma Hierárquico figura 3.1 descreve a estrutura de manutenção na Biotek, detalhando as diferentes categorias e conceitos subjacentes aos processos de gestão e conservação na empresa. Este modelo tem como objetivo otimizar as operações de manutenção, assegurando a eficiência e fiabilidade dos sistemas e equipamentos, através de uma abordagem sistemática e integrada.

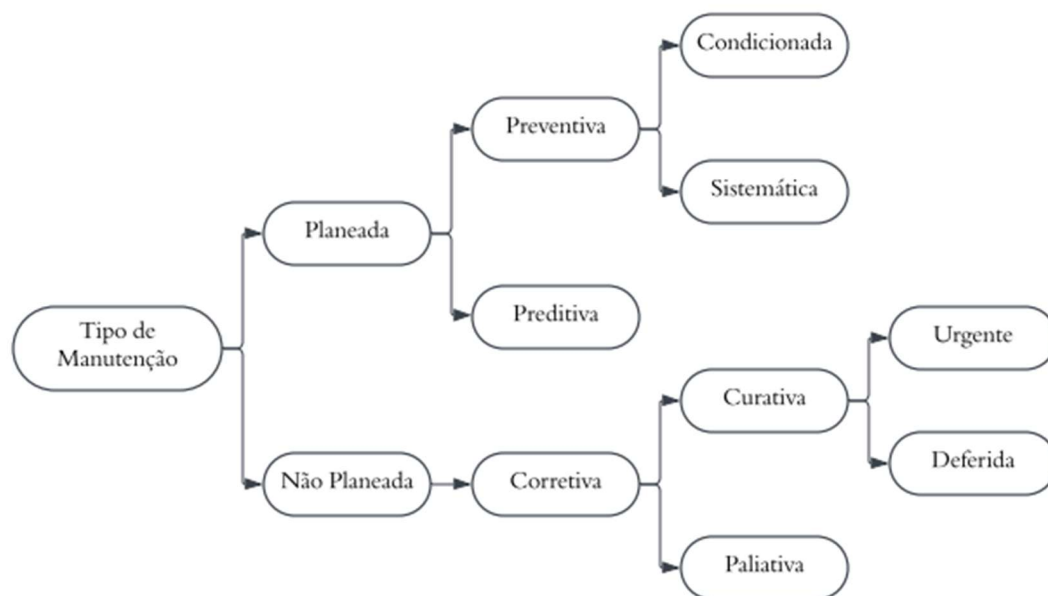


Figura 5.1– Organograma Hierárquico - Tipos de manutenção existentes na Biotek.

Os diferentes tipos de manutenção e as suas variantes são implementados através de métodos procedimentais específicos, que possibilitam uma organização e execução mais eficaz das atividades de manutenção. A seguir, é apresentada a descrição do processo de execução de cada um desses métodos.

5.1.2.1 Manutenção Preventiva

Nos departamentos mencionados acima são elaborados, para cada unidade funcionais (equipamento), um plano mecânico, elétrico e de instrumentação para manutenção preventiva sistemática. De seguida, em forma de ordem de execução (OE), os planos são enviados para a equipa de execução com as, respetivas, tarefas de manutenção.

Os técnicos executam os planos, registando as anomalias encontradas em forma de relatório no sistema informático onde serão armazenados toda a

informação para que, se necessária posterior consulta, como, por exemplo, desgastes, fugas etc, mencionado o tipo de equipamento e a sua localização.

➤ **Intervenção com execução interna**

Os engenheiros preparadores e os responsáveis pela manutenção de cada departamento são encarregues de elaborar a memória descritiva, que inclui desenhos, croquis e especificações dos materiais necessários. Com base nesta documentação, são preenchidas as fichas de consignação, que são posteriormente enviadas para a sala de controlo da produção, onde o equipamento será efetivamente consignado para manutenção.

Caso a intervenção implique a aquisição de materiais ou equipamentos adicionais, segue-se um processo semelhante, mas com uma etapa adicional. Antes da consignação, toda a documentação relevante é encaminhada para análise do chefe de serviço de manutenção. Se a compra for aprovada, procede-se à aquisição dos materiais necessários, é criada uma ordem de execução (OE), consigna-se o equipamento e, finalmente, a manutenção é realizada internamente.

Após a intervenção, o equipamento é desconsignado. O executante elabora o relatório de reparação e disponibiliza-o no sistema informático, tornando-o acessível a todo o departamento.

➤ **Intervenção com execução externa**

Os engenheiros preparadores e os responsáveis pela manutenção de cada departamento são incumbidos de elaborar a memória descritiva, que inclui desenhos, croquis e especificações dos materiais necessários. Com base nesta documentação, são preenchidas as fichas de consignação, que são posteriormente enviadas para a sala de controlo da produção, onde o equipamento será efetivamente consignado para manutenção. Este processo assegura que todos os aspetos técnicos e operacionais da intervenção sejam devidamente considerados antes da execução.

Caso a intervenção implique a aquisição de materiais ou equipamentos adicionais, segue-se um processo semelhante ao da execução interna, mas com uma etapa adicional. Antes da consignação, toda a documentação relevante é encaminhada para análise do chefe de serviço de manutenção. Se a compra for aprovada, procede-se à aquisição dos materiais necessários, cria-se uma ordem de execução (OE) e, após a consignação, a intervenção será realizada por uma empresa ou prestador de serviços externo especializado.

Após a realização da manutenção externa, o equipamento é desconsignado. O prestador de serviços elabora o relatório de reparação, que inclui todos os detalhes sobre os trabalhos realizados, os materiais utilizados e as eventuais melhorias implementadas no equipamento. Este relatório é disponibilizado no departamento

responsável; neste caso, se a manutenção for mecânica, é disponibilizado no Departamento de Mecânica (DM-M), tornando-o acessível a todos os responsáveis pelo planeamento e execução de tarefas. A documentação gerada durante a execução externa é essencial para garantir a rastreabilidade e o acompanhamento das intervenções, permitindo um controlo mais rigoroso dos processos.

Além disso, o chefe de serviço de manutenção ou outro responsável pela área interna pode realizar uma inspeção para validar a qualidade e a conformidade do trabalho executado, garantindo que todos os requisitos e normas de segurança tenham sido cumpridos. Se necessário, ajustes ou correções poderão ser solicitados ao prestador de serviços. Esta etapa de validação é importante para assegurar que a manutenção externa não só atenda às especificações técnicas, mas também assegure o bom funcionamento contínuo do equipamento ou sistema.

5.1.2.2 Manutenção Preditiva

Na Biotek, a manutenção preditiva é atualmente assegurada por uma empresa externa especializada, que atua de forma contínua nas instalações, permitindo uma resposta célere e eficaz na monitorização dos equipamentos críticos. Esta manutenção baseia-se num plano estruturado que define a periodicidade das análises, podendo também ser realizada de forma pontual sempre que exista suspeita de anomalias no funcionamento de algum equipamento.

➤ Análise de Vibrações

A análise de vibrações constitui uma ferramenta essencial na deteção precoce de anomalias mecânicas. Entre os principais tipos de falhas que podem ser identificadas por esta técnica destacam-se: excentricidade de eixos, desalinhamento de componentes (como juntas e rolamentos), desgaste por abrasão, erosão localizada, fenómenos de ressonância e folgas em sistemas mecânicos.

As medições são realizadas com base num plano de inspeção de rotina (IR), que orienta as intervenções periódicas. Os equipamentos sujeitos a monitorização são previamente identificados e codificados, facilitando a sua localização e permitindo uma análise comparativa dos dados atuais com os históricos registados. Esta abordagem sistemática assegura uma gestão eficiente das medições, promovendo a rastreabilidade e a continuidade da avaliação das condições operacionais de cada unidade. As medições são realizadas nas direções axial e radial, garantindo uma caracterização abrangente do estado vibracional dos equipamentos.

➤ Lubrificação

A lubrificação dos equipamentos também é assegurada por uma empresa externa, que atua com base num plano periódico, elaborado de acordo com as recomendações dos fabricantes ou ajustado conforme as especificidades de cada equipamento. Todas as intervenções são registadas e documentadas num relatório detalhado, posteriormente enviado ao Departamento de Projetos, responsável pela análise da fiabilidade e do desempenho dos ativos. Este procedimento visa garantir a eficiência e longevidade dos equipamentos, assegurando simultaneamente o cumprimento das normas técnicas e de manutenção vigentes.

5.1.2.2.1 Aplicação no Contexto do Estágio

Durante o estágio desenvolvido na Biotek, a manutenção preditiva revelou-se um elemento fundamental na gestão de ativos críticos. As atividades são integralmente realizadas por empresas subcontratadas, que operam dentro das instalações da empresa, permitindo uma monitorização contínua e eficaz.

A monitorização dos equipamentos pode ser realizada através de sistemas offline, com recurso a diversas técnicas especializadas, entre as quais se destacam:

- Amplificação de Movimento (DIPROTOS): Técnica baseada em captação de vídeo e processamento de imagem, permitindo visualizar e amplificar microvibrações invisíveis a olho nu, facilitando a identificação de anomalias estruturais e funcionais.
- Emissões Acústicas (DMC): Técnica que permite detetar defeitos internos ou alterações no material através da análise de ondas acústicas geradas por microfissuras, atrito ou impacto entre componentes.
- Análise Baker de Motores Elétricos (SKF): Método de diagnóstico que avalia a integridade elétrica e a performance de motores, através de testes como resistência de isolamento, rigidez dielétrica e impedância.
- Análise de Óleos (GALP): Permite monitorizar o estado de lubrificantes e identificar sinais de contaminação, degradação ou desgaste interno dos componentes, contribuindo para intervenções mais direcionadas.

Estas técnicas complementam a análise de vibrações convencional, enriquecendo o processo de diagnóstico e reforçando a estratégia de manutenção preditiva da empresa. A sua aplicação prática no contexto do estágio permitiu um contacto direto com metodologias avançadas de monitorização e diagnóstico, essenciais para a prevenção de falhas e para o aumento da fiabilidade operacional dos sistemas mecânicos.

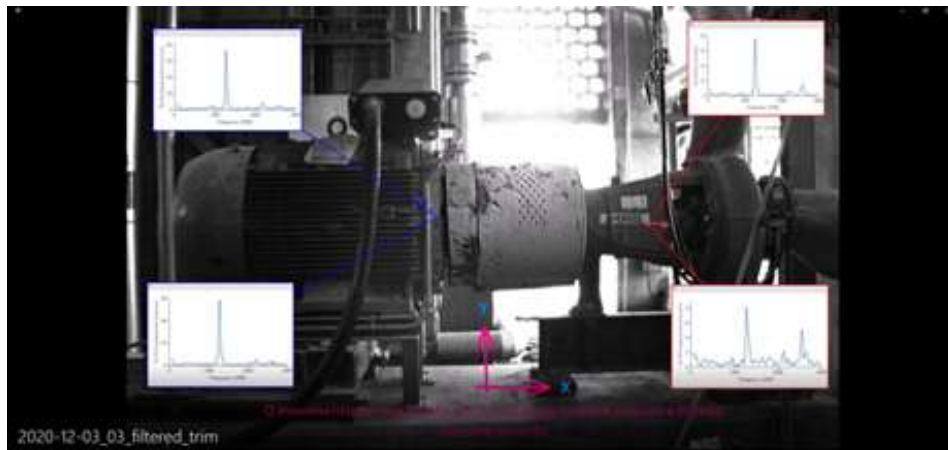


Figura 5.2 – Análise de amplificação de movimento (Vibração). Fonte: Biotek, 2025.

Emissões Acústicas

Os serviços de medição por emissão acústica têm como objetivo detetar indícios de falhas em equipamentos, especialmente aqueles que operam a baixas rotações, como é o caso de rolamentos com defeitos, uma vez que estas anomalias se manifestam através de sinais acústicos característicos. (Altri, 2025).



Figura 5.3 – Análise acústica (Ruido anormais). Fonte: Biotek, 2025.

Análise Baker

Este tipo de sistema permite efetuar uma monitorização dinâmica do equipamento em funcionamento, possibilitando a análise de zonas específicas de um motor com base em parâmetros que refletem o seu comportamento real durante as condições normais de operação (Altri, 2025). Neste tipo de análise são analisados os seguintes parâmetros:

Qualidade de energia (Nível de tensão; Desequilíbrio de tensões; Distorção harmónica total; Distorção total; Potências (Ativa, reativa e aparente); Sobre-correntes e etc.

Carga (Ripple de torque eléctrico e Espectro de torque.)

Condição do motor (Fator de serviço efetivo; Níveis de carga; Condição de operação e Estimativa da eficiência).

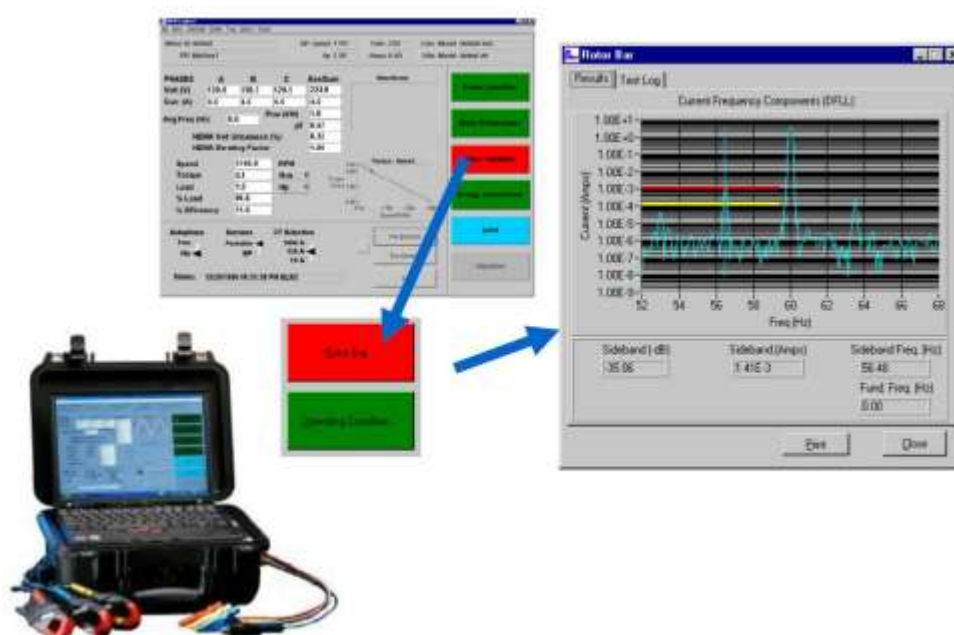


Figura 5.4 – Análise Baker. Fonte: Biotek, 2025.

Alguns sistemas de monitorização ONLINE que apesar de serem mencionado não serão desenvolvidos são:

- a) SKF – IMX
- b) SKF – AXIOS
- c) ABB
- d) SPM
- e) ENGING

- f) WSBP
- g) Andritz OPP METRIS

Adicionalmente, durante a paragem anual programada da fábrica, são contratadas empresas externas especializadas, como o ISQ, para realizar ensaios não destrutivos. Estas intervenções incluem:

- ✓ Ensaios por ultrassons (UT)
- ✓ Líquidos penetrantes (PT)
- ✓ Partículas magnéticas (MT)

O principal objetivo destas inspeções é a deteção precoce de anomalias estruturais, contribuindo para o aumento da segurança e da fiabilidade dos equipamentos. As áreas avaliadas incluem a caldeira de recuperação química, tanques auxiliares e vasos de pressão, com foco na verificação de corrosão, espessura residual e falhas em soldaduras.

Durante a última paragem anual, a empresa ISQ realizou uma inspeção completa à caldeira de recuperação química, incluindo:

- ✓ Lado dos gases de combustão (tubos da fornalha, economizadores e feixes tubulares).
- ✓ Lado da água e vapor (tambor, coletor inferior e tanque de alimentação).
- ✓ Componentes estruturais e zonas críticas como soldaduras e bicos de inspeção.

As técnicas aplicadas revelaram zonas com **corrosão de alta temperatura, falhas em soldaduras de montagem e afinamento excessivo de tubos** devido a compostos agressivos como cloretos e potássio. Estas observações permitiram proceder a intervenções específicas e fundamentar decisões sobre substituições de componentes.

Este tipo de abordagem demonstra claramente os benefícios da manutenção preditiva, permitindo agir antes que ocorram falhas, reduzindo o impacto operacional e melhorando a eficiência global da instalação.

Além das técnicas de manutenção preditiva mencionada anteriormente como sendo a mais comum, a empresa tem outras técnicas preditiva e procura sempre melhorar ou implementar novas técnicas que de um modo geral facilitem a monitorização e a otimização do processo.

Algumas das muitas técnicas usadas pela empresa são:

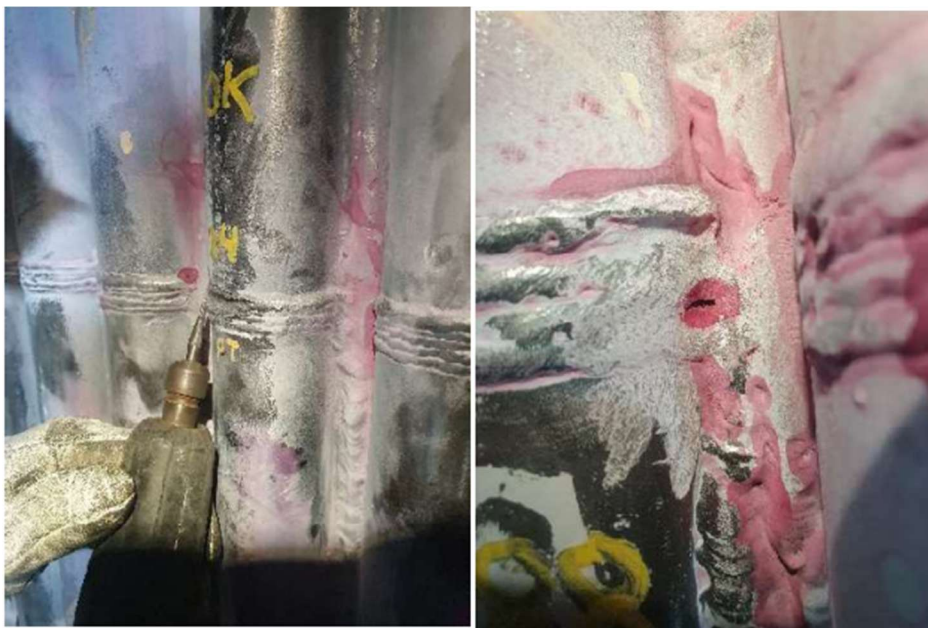


Figura 5.5– Teste de líquido penetrante. Fonte: Biotek, 2025

Importa salientar que todas as referências técnicas, nomenclatura e critérios de avaliação utilizados durante a inspeção foram baseados na documentação técnica do fabricante, fornecida pela Biotek, bem como nas normas europeias e internacionais em vigor. Entre estas, destacam-se a Diretiva Europeia de Equipamentos sob Pressão (PED – 2014/68/UE) e as normas EN ISO 17638 (ensaios por partículas magnéticas), EN ISO 17636 (radiografia industrial), EN ISO 17640 (ultrassons) e EN ISO 3452 (líquidos penetrantes).

Estas atividades inserem-se numa abordagem estruturada de manutenção preditiva, orientada para a melhoria contínua da fiabilidade e da segurança operacional da instalação, promovendo simultaneamente a longevidade dos equipamentos e o cumprimento rigoroso das exigências legais e normativas aplicáveis ao setor industrial.

5.1.2.3 Manutenção Curativa

Quando a manutenção preditiva e preventiva não consegue evitar a falha de um equipamento, torna-se necessário proceder a uma intervenção para restabelecer a sua operacionalidade. Habitualmente, são os técnicos de produção que identificam as anomalias e, após essa deteção, emitem uma requisição de trabalho (RT) para o Departamento de Manutenção.

No Departamento de Manutenção, após o registo da avaria, realiza-se uma avaliação detalhada do tipo de falha. Se a avaria for considerada urgente, procede-se com uma intervenção imediata para garantir a rápida reposição do equipamento em funcionamento. Caso não existam meios ou recursos internos suficientes para

efetuar a reparação, poderá ser necessário recorrer a serviços externos especializados (via compras).

O colaborador interno responsável pela reparação realiza a consignação do equipamento e executa as ações necessárias para a reparação. Após a conclusão do trabalho, o técnico deve proceder à desconsignação do equipamento, registrar no sistema a conclusão ou pendência da reparação e elaborar um relatório detalhado da intervenção no sistema informático.

No caso de falhas recorrentes no equipamento, é realizada uma análise aprofundada para identificar as causas subjacentes. Consoante os resultados dessa análise, podem ser implementadas ações corretivas, como a otimização do equipamento ou, se necessário, a sua substituição por uma versão mais robusta, de forma a minimizar a ocorrência de falhas futuras e maximizar a fiabilidade do sistema.

5.1.3 Gestão da manutenção

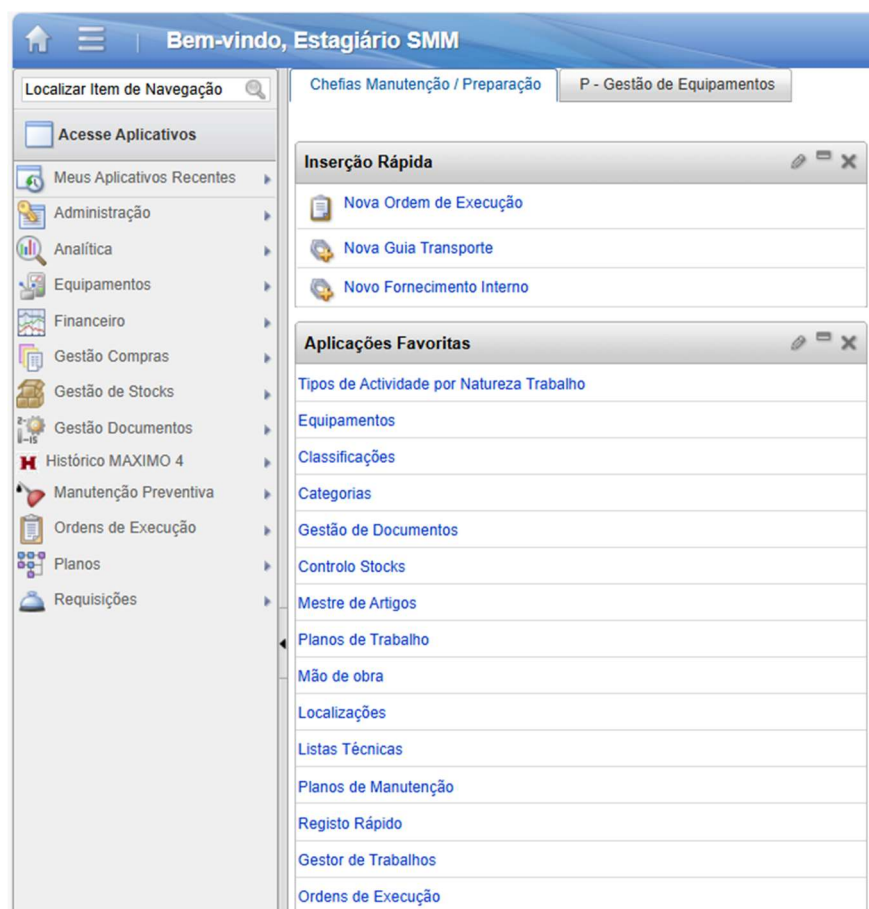


Figura 5.6 - Interface principal do software de gestão IBM Maximo. Fonte: Biotek, 2025.

A empresa, embora utilize o SAP como software integrado de gestão empresarial, adota o **MAXIMO** como plataforma especializada para a gestão e planejamento das operações de manutenção. O **IBM Maximo** é uma solução robusta de **Gestão de Ativos Empresariais (EAM)**, que permite o acompanhamento completo do ciclo de vida dos ativos e facilita o planejamento, execução e controle das atividades de manutenção preventiva e corretiva. Este sistema oferece funcionalidades abrangentes para a gestão de **requisições de compras**, incluindo a aquisição de materiais e serviços necessários para a execução das intervenções de manutenção.

Adicionalmente, o **MAXIMO** permite o acompanhamento detalhado de todos os serviços realizados, fornecendo **indicadores de desempenho** e relatórios analíticos que facilitam a avaliação das ocorrências, **custos operacionais** e a eficiência das operações de manutenção. Através dos seus módulos de **business intelligence**, o sistema possibilita a extração de **relatórios gerenciais**, contribuindo para a análise e tomada de decisões estratégicas relacionadas com os custos de manutenção e a otimização dos processos. A integração destas funcionalidades ajuda na melhoria contínua da gestão de ativos e na **redução de custos** associados à manutenção, garantindo maior eficiência operacional.

- **MAXIMO – Gestão de stock:**

"Na área de gestão de stock, o **MAXIMO** permite o controle integral dos inventários, possibilitando a **solicitação (ou reserva)** de equipamentos e ferramentas, bem como a gestão das respectivas **peças de reposição**. O sistema também permite a identificação detalhada de **desenhos técnicos e documentação associada** aos ativos, facilitando a organização e o acesso à informação crítica para a execução das intervenções de manutenção. Esta funcionalidade é fundamental para garantir a disponibilidade e o correto alinhamento dos recursos necessários, contribuindo para a otimização dos processos e a redução de tempos de inatividade."

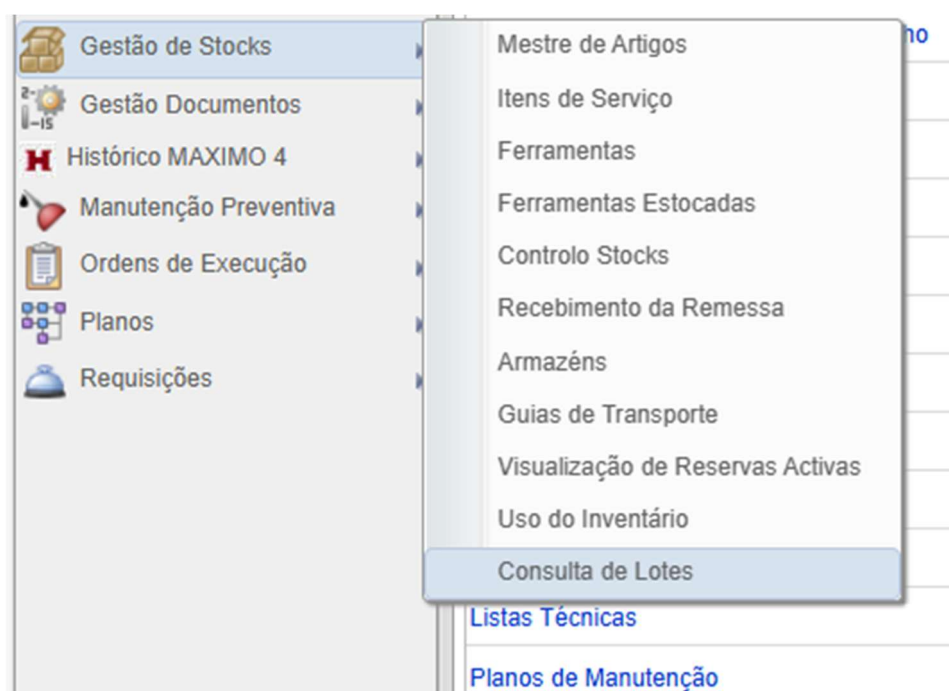


Figura 5.7 – Interface do IBM Maximo para gestão de inventário e pedidos de material. Fonte: Biotek, 2025.

- MAXIMO– Ordens de execução:

"Quando é necessária a execução de uma intervenção de manutenção, o sistema **MAXIMO** gera automaticamente as **ordens de execução**, as quais estão associadas diretamente aos **equipamentos** ou aos **locais de instalação** dos ativos. Este procedimento é fundamental, pois permite a **atribuição de custos** diretamente relacionados com a intervenção, incluindo, quando aplicável, **mão-de-obra, materiais e serviços externos**. A criação das ordens de execução garante o **registo e a alocação correta dos custos operacionais**, facilitando uma gestão eficiente dos recursos e o acompanhamento do desempenho das operações. Adicionalmente, este processo permite a extração de relatórios detalhados, promovendo a **análise de custos** e a tomada de decisões fundamentadas sobre a otimização das atividades de manutenção."

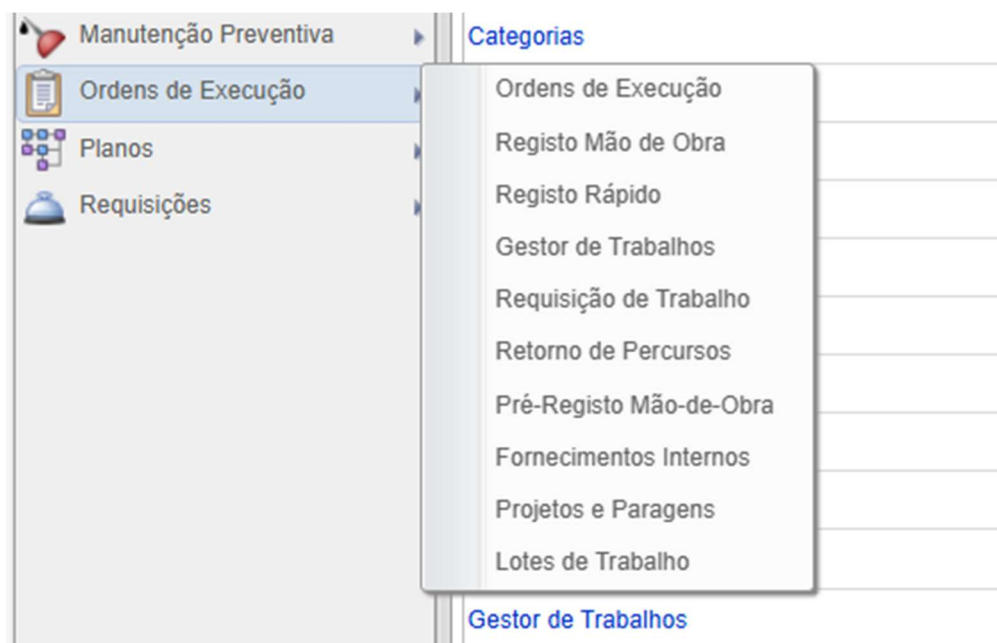


Figura 5.8 – Interface do IBM Maximo para emissão e controlo de ordens de trabalho. Fonte: Biotek, 2025.

5.1.4 Fiabilidade na Biotek

Na Biotek, existe uma equipa dedicada à fiabilidade, que desempenha um papel fundamental na otimização e no desempenho dos ativos da empresa. A equipa de fiabilidade é responsável por implementar práticas e estratégias que asseguram o funcionamento contínuo e eficiente dos equipamentos e sistemas críticos, minimizando falhas inesperadas e maximizando a disponibilidade e a vida útil dos ativos.

O principal objetivo da equipa de fiabilidade é identificar e eliminar as causas das falhas recorrentes, através da implementação de técnicas avançadas de manutenção preditiva e preventiva, com vista à redução de paragens não programadas e à otimização dos custos operacionais. Para alcançar este objetivo, a equipa utiliza metodologias como Análise de Causa Raiz (RCA) e Monitorização de Condição dos equipamentos, para prever possíveis falhas antes que ocorram e garantir que os processos de manutenção sejam realizados de forma eficiente e eficaz.

Além disso, a equipa de fiabilidade também trabalha em estreita colaboração com **empresas externas** especializadas em áreas específicas, como serviços de **fornecimento de peças** e **serviços especializados de manutenção (preditiva e lubrificação)**. Esta cooperação permite à Biotek aceder a conhecimentos e tecnologias de ponta, bem como a uma rede mais ampla de especialistas, garantindo a implementação de soluções inovadoras e eficientes para a manutenção dos seus ativos.

Aplicação de Técnicas de Análise de Falhas para Reestruturação de Planos de Manutenção: Caso de Estudo numa Caldeira de Recuperação na Biotek

A equipa de fiabilidade também está envolvida na gestão de dados relacionados com os ativos, utilizando ferramentas como o MAXIMO e outros sistemas de gestão, para monitorizar o desempenho dos equipamentos e identificar tendências que possam indicar a necessidade de intervenções ou ajustamentos. Este processo de gestão da fiabilidade também se traduz em análises estatísticas que permitem melhorar continuamente os processos de manutenção e contribuir para a tomada de decisões estratégicas relacionadas com a aquisição de novos ativos ou com a renovação dos existentes.

Dessa forma, a equipa de fiabilidade na Biotek tem um papel essencial na redução de custos de manutenção, no aumento da eficiência operacional e na melhoria contínua da gestão dos ativos da empresa, alinhando-se aos objetivos globais de sustentabilidade e competitividade da organização.

5.2 Estudo de Caso – Aplicação de Técnicas de Análise de Falhas para Reestruturação de Planos de Manutenção numa Caldeira de Recuperação

Este estudo de caso, desenvolvido no âmbito do estágio realizado na empresa Biotek, centrado na aplicação de técnicas de análise de falhas com vista à reestruturação dos planos de manutenção de uma caldeira de recuperação. O estágio teve como principal finalidade otimizar os processos de manutenção preventiva, assegurando a fiabilidade e o desempenho operacional da caldeira, sobretudo nas unidades funcionais críticas que suportam o processo de queima de licor negro.

A caldeira em questão encontra-se localizada na **Zona 2** da unidade industrial, uma das três áreas operacionais em que a empresa está organizada. Esta zona é responsável pela recuperação de energia térmica e valorização dos subprodutos provenientes do processo de fabrico de pasta celulósica, tendo assim um papel essencial na eficiência energética e sustentabilidade da operação global.

Composta por cerca de **90 unidades funcionais**, a caldeira integra um sistema complexo de equipamentos auxiliares, tais como ventiladores, pré-aquecedores de ar, injetores de licor, sistemas de limpeza de fuligem, trocadores de calor e instrumentos de controlo, que operam de forma integrada para garantir uma combustão eficaz e contínua do licor negro.

Durante o estágio, procedeu-se a um levantamento técnico das condições operacionais destes equipamentos, com especial enfoque na análise do seu histórico de falhas, impacto na produção e potencial de melhoria. Através de trabalho conjunto com a equipa técnica da empresa, foram recolhidos dados operacionais, efetuadas observações diretas e realizadas entrevistas com operadores e técnicos de manutenção.

Com base na informação recolhida, foram identificados os ativos mais vulneráveis e proposta a **reestruturação das rotinas de manutenção preventiva**. As propostas foram definidas tendo em consideração a viabilidade técnica, o custo de implementação e o retorno esperado em termos de fiabilidade e disponibilidade.

A abordagem adotada permitiu alinhar a gestão da manutenção com princípios de fiabilidade e melhoria contínua, promovendo uma atuação mais estratégica e menos reativa. Estima-se que a implementação das ações recomendadas possa contribuir para uma **redução significativa das paragens não planeadas**, bem como para uma maior eficiência no uso de recursos.

Este estudo de caso permitiu consolidar conhecimentos técnicos adquiridos ao longo do mestrado em Engenharia Mecânica, particularmente nas áreas de

manutenção industrial, análise de falhas, gestão de ativos e tomada de decisão baseada em dados.

Abaixo, são apresentados alguns dos principais equipamentos que integram este sistema.

Tabela 5.1 – Algumas unidades funcionais da caldeira de recuperação Biotek.

Nº	Descrição
1	Fornecimento de Ar Primário
2	Unidade de Sopragem Parede Esquerda
3	Unidade de Sopragem Parede Direita
4	Queimador de Licor
5	Evacuação de Smelt
6	Fornecimento de Ar Secundário
7	Recolha de Derrame de Licor Negro
8	Armazenagem de Água de Alimentação da Caldeira
9	Fornecimento de Água de Alimentação para Atemperação de Vapor
10	Armazenagem de Smelt
...	...
90	Queimadores Arranque

5.3 Ferramentas e Metodologias Utilizadas

A realização do projeto descrito no ponto anterior assentou numa abordagem estruturada, com recurso a diversas **ferramentas de análise técnica e metodologias de apoio à decisão**, fundamentais para fundamentar as propostas de reestruturação do plano de manutenção da caldeira de recuperação.

Estas ferramentas permitiram uma análise crítica, baseada em dados e evidências, possibilitando a identificação dos pontos de falha mais relevantes, bem como das causas subjacentes, e contribuindo para a definição de intervenções corretivas mais eficazes.

a) Análise das Unidades Funcionais

Foi realizada uma análise aprofundada e estatística do histórico de manutenção das unidades funcionais da caldeira de recuperação, abrangendo o

período entre 2018 e 2024. Utilizando ferramentas analíticas, nomeadamente o Microsoft Excel, procedeu-se ao registo e quantificação das ocorrências de avarias em cada unidade funcional, permitindo identificar padrões e avaliar a frequência das falhas ao longo dos anos.

Esta avaliação detalhada possibilitou hierarquizar os equipamentos de acordo com o volume de ocorrências, destacando os ativos com maior número de falhas e maior impacto no desempenho da caldeira. Com base nesta hierarquização, foi possível delimitar o campo de estudo, concentrando os esforços nas áreas mais críticas para a fiabilidade do sistema.

Através deste levantamento, obteve-se uma visão clara da fiabilidade dos equipamentos, servindo como base fundamental para as análises subsequentes e para a definição de estratégias de manutenção mais eficazes.

	Unidades Funcionais	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Total	Média
T018-09-01*	Fornecimento De Ar Primário	21	89	55	45	34	19	12	275	39
T018-05-01*	Unidade De Sopragem Parede Esquerda	0	18	34	26	21	21	31	151	22
T018-05-03*	Unidade De Sopragem Parede Direita	2	14	15	32	20	15	27	125	18
T018-19-09*	Queimador De Licor	4	10	14	9	11	18	14	80	11
T018-21-01*	Evacuação De Smelt	7	13	12	13	13	4	7	69	10
T018-09-03*	Fornecimento De Ar Secundário	7	15	20	4	11	4	6	67	10
T018-19-11*	Recolha De Derrame De Licor Negro	0	2	11	13	13	16	12	67	10
T018-01-01*	Armazenagem De Água De Alimentação Da Caldeira	0	6	9	12	12	11	13	63	9
T018-01-11*	Fornecimento De Água De Alimentação Para Atemperação De Vapor	0	1	8	14	12	16	12	63	9
T018-21-05*	Armazenagem De Smelt	2	10	11	9	10	7	10	59	8
T018-01-09*	Alimentação De Emergência Da Água Da Caldeira	1	2	12	9	11	11	11	57	8
T018-23-03*	Queimadores Arranque	1	9	10	13	9	6	1	49	7
T018-21-07*	Tratamento De Gases De Tanque De Smelt	0	2	0	3	5	17	14	41	6

Figura 5.9 – Análise estatística de ocorrência de avarias das unidades funcionais

Com base no levantamento das unidades funcionais, recorreu-se à ferramenta de análise conhecida como **gráfico de Pareto**, que possibilitou uma avaliação crítica e a identificação das unidades que requerem atenção prioritária. Esta abordagem permitiu destacar os componentes mais críticos que impactam diretamente o funcionamento da caldeira, os quais podem comprometer a sua operação caso não sejam devidamente geridos.

A aplicação do gráfico de Pareto evidenciou que, apesar de algumas unidades funcionais representarem uma pequena percentagem do total de componentes, estas têm um impacto desproporcionado nas falhas operacionais do sistema. Consequentemente, esta análise possibilitou a focalização dos esforços de manutenção e otimização nas unidades com maior influência na disponibilidade e eficiência da caldeira, promovendo uma melhoria significativa na fiabilidade global do equipamento.

Aplicação de Técnicas de Análise de Falhas para Reestruturação de Planos de Manutenção: Caso de Estudo numa Caldeira de Recuperação na Biotek

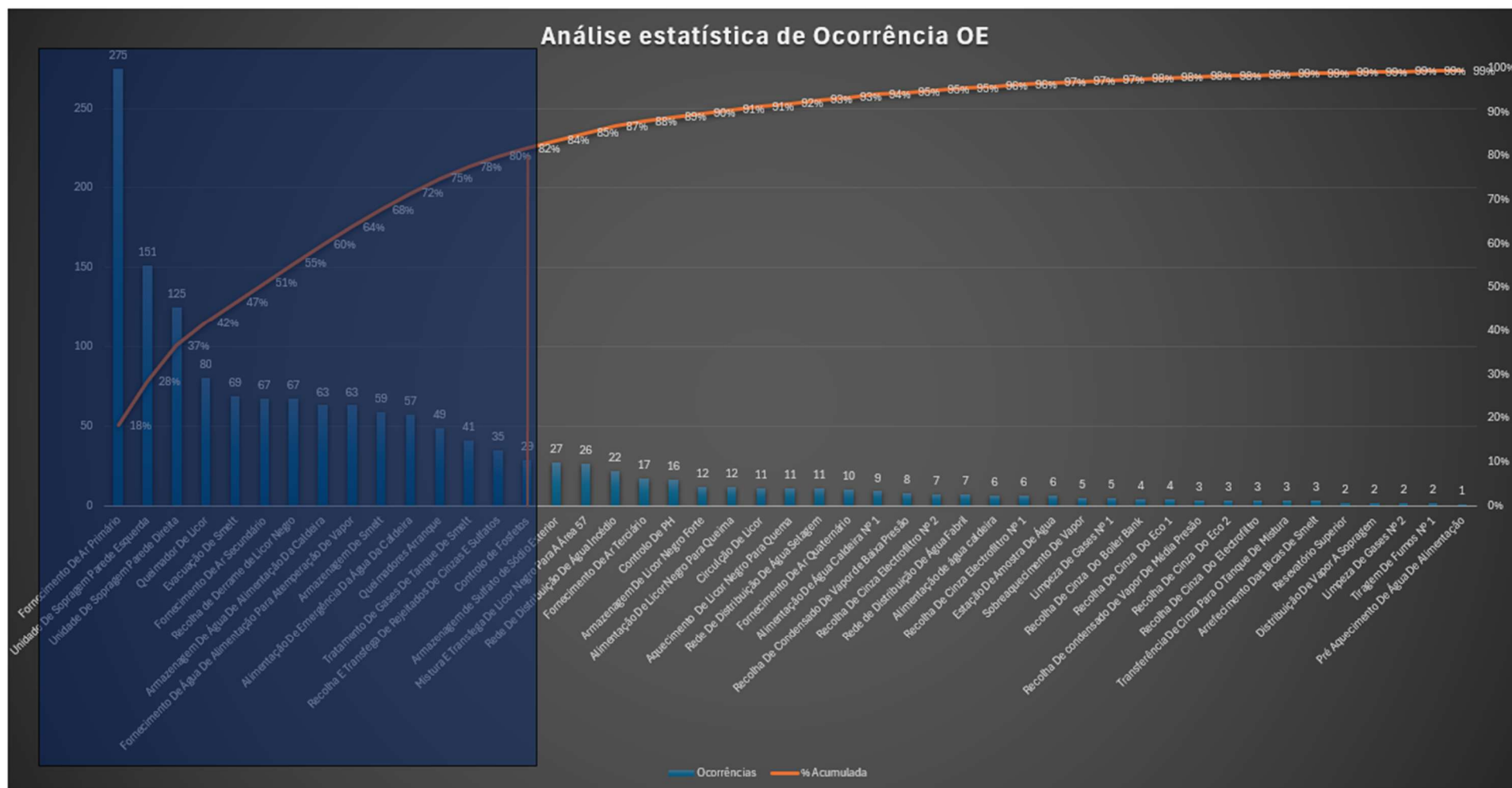


Figura 5.10 – Aplicação de gráfico de Pareto para análise estatística de avarias.

5.3.1 Aplicação da Análise de Pareto na Zona 2 da Caldeira de Recuperação

Apesar de o gráfico original não ter proporcionado uma visualização totalmente clara da aplicação da Análise de Pareto, esta metodologia foi implementada com sucesso, permitindo identificar as unidades funcionais mais críticas da Zona 2 da caldeira de recuperação. Através desta análise, tornou-se possível priorizar as unidades com maior número de ocorrências de avarias.

Esta abordagem facilitou o direcionamento dos esforços de manutenção para os equipamentos que mais influenciam o desempenho operacional da caldeira, tornando o processo de intervenção mais eficiente e possibilitando a obtenção de resultados mais céleres.

A seguir, apresentam-se as unidades funcionais com maior número de ocorrências de avarias, segundo a análise realizada.

Tabela 5.2 – Unidades Funcionais com maior número de ocorrências por avarias.

Nº	Unidade Funcional
1	Fornecimento de Ar Primário
2	Unidade de Sopragem Parede Esquerda
3	Unidade de Sopragem Parede Direita
4	Queimador de Licor
5	Evacuação de Smelt
6	Fornecimento de Ar Secundário
7	Recolha de Derrame de Licor Negro
8	Armazenagem de Água de Alimentação da Caldeira
9	Fornecimento de Água de Alimentação para Atemperação de Vapor
10	Armazenagem de Smelt
11	Alimentação de Emergência da Água da Caldeira
12	Queimadores Arranque
13	Tratamento de Gases de Tanque de Smelt
14	Recolha e Transferência de Rejeitados de Cinzas e Sulfatos
15	Controlo de Fosfatos

5.3.2 Análise dos Tipos de Avarias nas Unidades Funcionais

Após a aplicação da Análise de Pareto, tornou-se necessário aprofundar a compreensão dos diferentes tipos de avarias associadas a cada unidade funcional. Para tal, procedeu-se ao agrupamento das diversas categorias de avarias, contabilizando a frequência de ocorrência de cada uma nas unidades em questão ao longo do período analisado.

Este procedimento permitiu calcular a percentagem relativa de falhas associadas a cada tipo de avaria em cada unidade funcional, proporcionando uma análise detalhada das principais causas de falhas e ineficiências operacionais do sistema.

Desta forma, foi possível identificar não só as unidades mais críticas, mas também os tipos de avarias que mais impactam o seu desempenho. Com base nesta informação, as estratégias de manutenção foram orientadas de forma mais precisa, focando-se nas falhas que comprometem significativamente o funcionamento das unidades e, conseqüentemente, permitindo otimizar a eficiência e fiabilidade global da caldeira.

Seguem-se algumas das unidades funcionais analisadas, acompanhadas dos respetivos tipos de avarias observados.

Por exemplo, os autómatos de limpeza, que integram a unidade funcional do fornecimento de ar — tanto primário como secundário —, são mecanismos utilizados para efetuar a limpeza das portas de ar da caldeira de recuperação, desempenhando um papel fundamental na manutenção do desempenho do sistema.



Figura 5.11 – Autómatos de limpeza de caldeira de recuperação.

Tabela 5.3 – Tipos de avarias nos autómatos de Limpeza.

Código	Unidade funcional	Tipos Avarias	Nº de Ocorrência	%
T018-09-01	Fornecimento De Ar Primário	Reparações no autómato de limpeza do ar primário	142	51,60%
		Hastes do ar primário danificadas	43	15,60%
		Parafusos de apoio danificados	26	9,50%
		Suportes/apoios danificados	24	8,70%
		Vidros e óculos de inspeção partidos	15	5,50%
		Fugas e problemas em purgadores e válvulas	6	2,20%
		Limpeza de autómatos e mecanismos	12	4,40%
		Desalinhamentos, danos no mecanismo de limpeza	7	2,60%
			275	100

Os **sopradores de fuligem** da caldeira de recuperação são dispositivos utilizados para a remoção de depósitos de cinzas e fuligem acumulados nas superfícies de troca de calor. Funcionam através da aplicação de jatos de vapor ou ar comprimido, que varrem as superfícies internas da caldeira, mantendo a eficiência térmica e prevenindo obstruções no fluxo de gases.

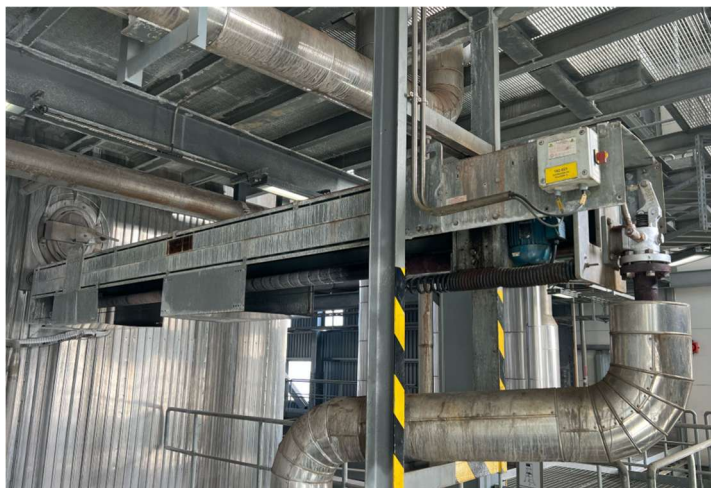


Figura 5.12 – Sopradores de fuligem da caldeira de recuperação.

Tabela 5.4 – Tipos de avarias nos sopradores de fuligem.

Código	Unid funcional	Tipos Avarias	Nº de Ocorrência	%
T018-05-01	Unidade De Sopragem Parede Esquerda	Substituições de Válvulas Poppet	27	17,9
		Substituições de Empanques	22	14,6
		Fugas de Vapor e Problemas de Selagem	23	15,2
		Problemas de Prisão e Dificuldade de Movimentação	17	11,3
		Ajustes no mecanismo de válvula poppet ou reposicionamento de motores	8	5,3
		Problemas no Motor	5	3,3
		Substituição de Redutores	6	4
		Reparos de Chapas de Proteção	1	0,7
		Calibração e Ajustes de Válvulas Poppet	8	5,3
		Sopradores com amperagem alta e falhas	5	3,3
		Sopradores com dificuldade para sair da caldeira ou presos	9	6
		Sopradores com dificuldades no deslocamento	8	5,3
		Adaptação de fechos rápidos, melhorias no acesso	5	3,3
		Reparo no esticador de corrente do soprador	7	4,6
			151	100

A **evacuação de smelt** na caldeira de recuperação é realizada através das **bicas de smelt**, que são canais localizados na parte inferior da fornalha, por onde escoam o smelt – uma mistura fundida de sais inorgânicos resultante da queima do licor negro. Estas bicas conduzem o smelt derretido até ao dissolvedor, onde é misturado com água para formar o licor verde.

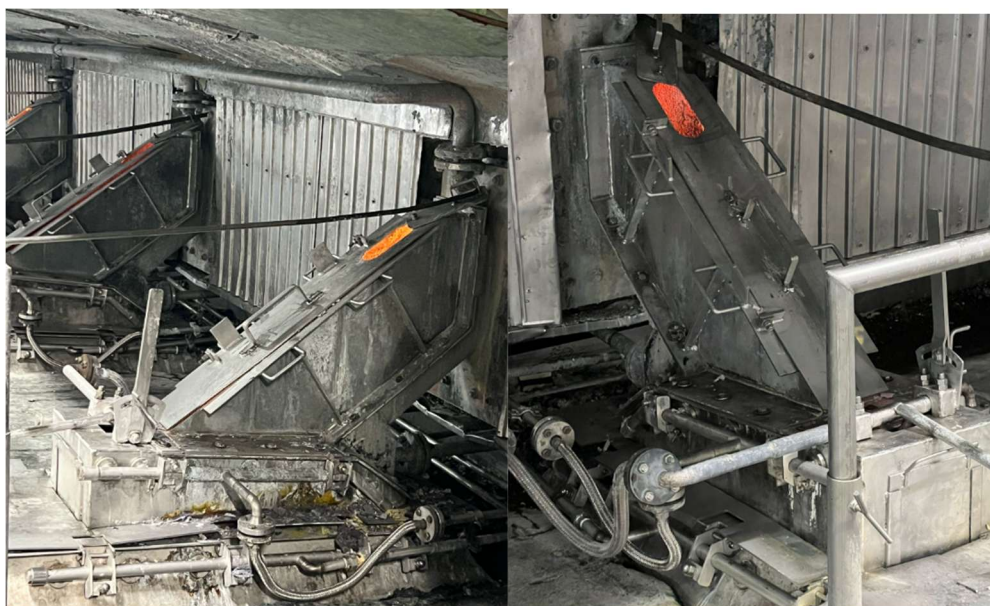


Figura 5.13 – Evacuação de smelt na caldeira de recuperação.

Tabela 5.5 – Tipos de avarias, Evacuação de smelt.

Código	Unid funcional	Tipos Avarias	Nº de Ocorrência	%
T018-21-01	Evacuação De Smelt	Fugas de vapor no destroçador e mangas da bica de smelt	21	30,4
		Chuveiros da bica smelt danifica	6	8,7
		Tampas, Janelas de Inspeção e Peças Danificadas	15	21,7
		Reparo/substituição de Válvulas de Sistema de Arrefecimento	8	11,6
		Reparar tampa/manzeira da bica smelt	10	14,5
		desalinhamento no Destroçador	7	10,1
		Reforço do suportes e patins das linhas de água de arrefecimento das bicas de smelt.	1	1,4
		Tampa da bica de smelt danificada	1	1,4
			69	100

Queimador de licor é um componente fundamental da caldeira de recuperação, responsável pela injeção e queima do licor negro concentrado proveniente do processo de fabrico de pasta. A sua função principal é promover a combustão eficiente do licor, permitindo a recuperação de energia térmica e de produtos químicos utilizados no processo.

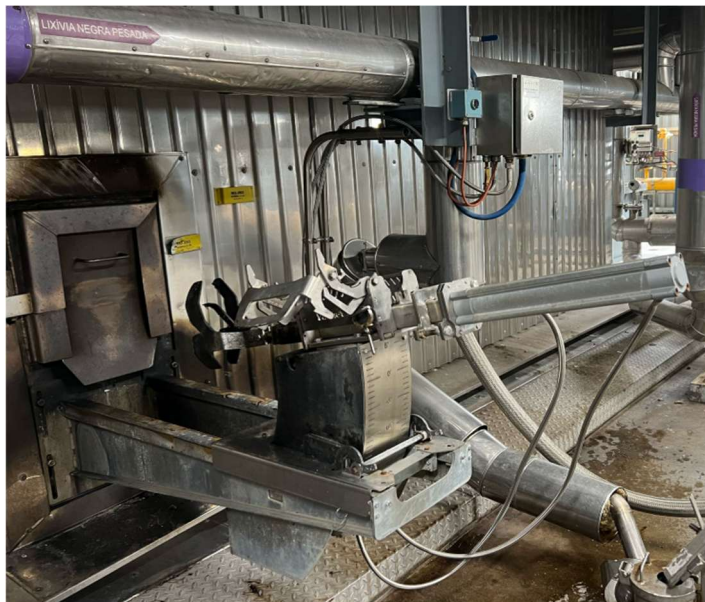


Figura 5.14 – Queimador de licor da caldeira de recuperação.

Tabela 5.6 – Tipos de avarias Queimador de licor

Código	Unidade funcional	Tipos Avarias	Nº de Ocorrência	%
T018-19-09	Queimador De Licor	Reparar/substituir hastes de limpeza dos queimadores de licor	11	13,8
		Autômato de limpeza do queimador de licor com haste danificada	15	18,8
		Isolamento da porta de segurança do queimador licor negro danificado	2	2,5
		Mal funcionamento do Regulador de altura do queimador licor	11	13,8
		Mecanismo de orientação do ângulo do queimador de licor	8	10
		Fuga na linha de vapor de limpeza do queimador de licor	15	18,8
		Válvula de licor para alimentação ao queimador	5	6,3
		Válvula de licor negro para queimadores com muita prisão.	8	10
		Reparar suporte de apoio ao queimador de licor	2	2,5
		Mola e parafuso do queimador de licor em falta.	3	3,8
			80	100

Queimadores de arranque da caldeira de recuperação são equipamentos utilizados para iniciar o processo de combustão durante o arranque da caldeira. Funcionam através da queima controlada de combustível (normalmente óleo ou gás), elevando a temperatura da fornalha até que estejam reunidas as condições adequadas para o início da queima dos gases provenientes do processo. São essenciais para garantir um arranque seguro e estável da caldeira.

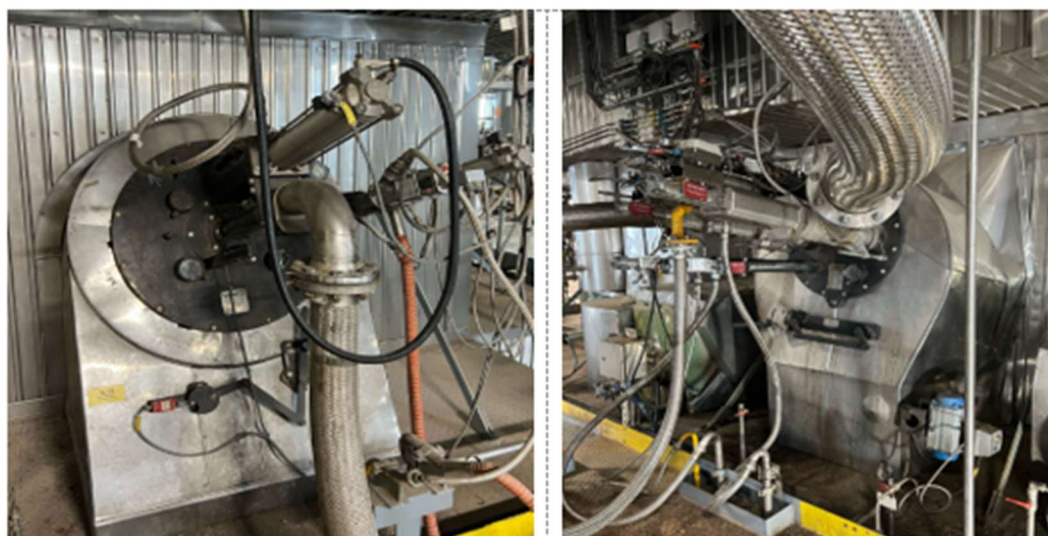


Figura 5.15 – Queimadores de arranque da caldeira de recuperação.

Tabela 5.7 – Tipos de avarias Queimador de Arranque

Código	Unid funcional	Tipos Avarias	Nº de Ocorrência	%
T018-23-03	Queimadores Arranque	Reparação e substituição de queimadores e mangueiras de Gás	18	36,7
		Vidros e Óculos de Inspeção Danificados	7	14,3
		Difusores e Filtros Danificados	17	34,7
		Reposicionar suporte da linha do gás da CRII se encontra fora do lugar.	3	6,1
		Tubagem de gás para os ignitores com fuga	2	4,1
		Nozzle do queimador de gás danificado	1	2
		Soldar ferro limpeza queimadores GN da CR2	1	2
			49	100

5.3.3 Análise Temporal das Ocorrências de Avarias nas Unidades Funcionais

Após a realização do agrupamento dos tipos de avarias, procedeu-se à análise do comportamento temporal das ocorrências de falhas nas unidades funcionais ao longo do período compreendido entre 2018 e 2024. Através da utilização do Excel, foi possível elaborar gráficos de tendência que possibilitaram a identificação de padrões no comportamento das avarias ao longo dos anos. O principal objetivo desta análise foi verificar se, de facto, houve um aumento nas ocorrências de falhas durante o período em estudo, permitindo assim avaliar a fiabilidade das unidades e fornecer dados relevantes para a tomada de decisões quanto a possíveis ações corretivas ou preventivas a serem implementadas.

No que diz respeito à unidade funcional de **Fornecimento de Ar Primário e Secundário**, observou-se uma redução significativa no número de avarias ao longo do período analisado. Este decréscimo pode ser atribuído à implementação de melhorias técnicas, bem como à adoção de um plano de manutenção preventiva mais eficaz, o qual contribuiu para a otimização do desempenho das unidades e, consequentemente, para o aumento da sua fiabilidade e redução das ocorrências de falhas. Observe o gráfico abaixo.

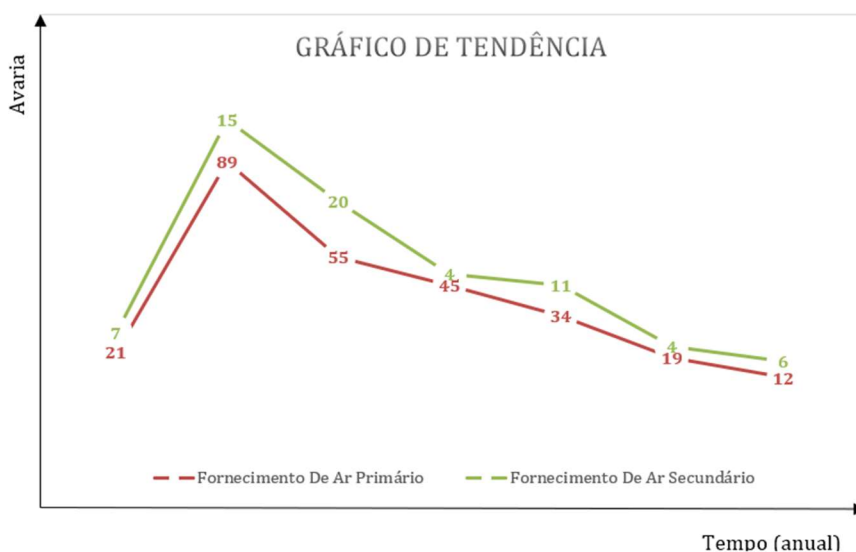


Figura 5.16 – Análise temporal do fornecimento de ar primário e secundário.

Com a implementação das melhorias como mostra a figura 5.16, verificou-se uma redução consistente nos números de ocorrência ao longo dos anos. A tabela abaixo apresenta a variação percentual anual entre 2019 e 2024, destacando o impacto direto das ações corretivas aplicadas. Esta tendência decrescente confirma a eficácia das intervenções, refletindo uma gestão mais eficiente dos recursos e uma significativa diminuição da frequência de falhas.

Tabela 5.8 – Redução percentual anual fornecimento de ar (2019–2024).

Período	Redução (%)
2019–2020	38%
2020–2021	18%
2021–2022	24%
2022–2023	44%
2023–2024	37%
Média	32%



Figura 5.17 – Melhorias implementadas nos sopradores da unidade funcional de fornecimento de ar.

Em contraste com as unidades funcionais de Fornecimento de Ar, que demonstraram uma redução nas avarias, as unidades de Sopro de Parede Esquerda e Direita apresentam, através da linha de tendência, um aumento no número de falhas ao longo dos anos. Este crescimento pode refletir uma degradação progressiva na fiabilidade dessas unidades, possivelmente devido a fatores como o envelhecimento dos componentes, a sobrecarga operacional ou a inadequação das práticas de manutenção preventiva. Tal situação exige uma análise mais aprofundada, com vista à implementação de medidas corretivas.

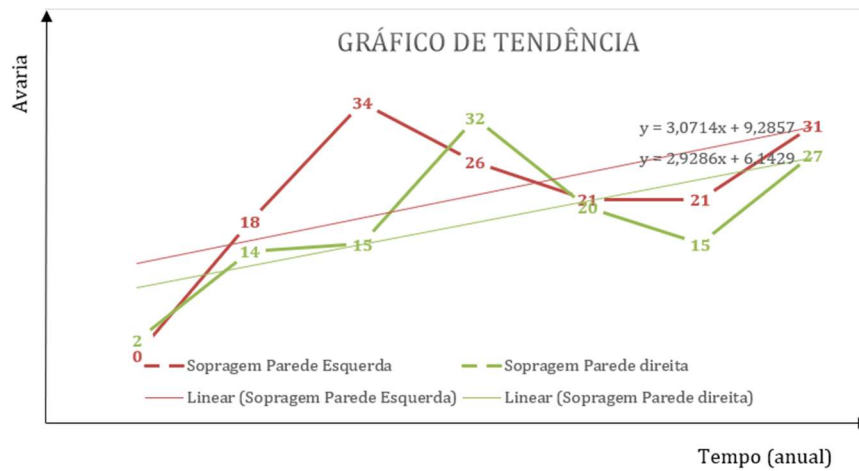


Figura 5.18 – Análise temporal dos sopradores da parede esquerda e direita da caldeira de recuperação.

De igual modo, o queimador de licor apresenta um crescimento no número de avarias



Figura 5.19 – Número de avarias anuais do queimador de licor.

5.3.4 Identificação e Análise das Causas de Falhas

Com o objetivo de aprofundar a análise das falhas detetadas, foi utilizado o Diagrama de Ishikawa, também conhecido como diagrama de espinha de peixe, com vista à identificação das causas-raiz associadas às avarias nas unidades críticas. Esta ferramenta permitiu agrupar as possíveis causas em categorias fundamentais, nomeadamente: materiais, medição, mão de obra, máquinas, métodos e ambiente.

A análise efetuada revelou que as principais origens das falhas estavam relacionadas com o **desgaste prematuro de componentes mecânicos, deficiências no controlo dos parâmetros operacionais** (tais como temperatura, pressão e fluxo), **maturidade dos equipamentos, contaminação dos fluidos e falta de calibração adequada dos sistemas de medição e controlo.**

Um exemplo ilustrativo desta situação são as **unidades de sopragem de fuligem**, onde se verificaram diversas ocorrências associadas a estes fatores. Consultar figura 5.20.

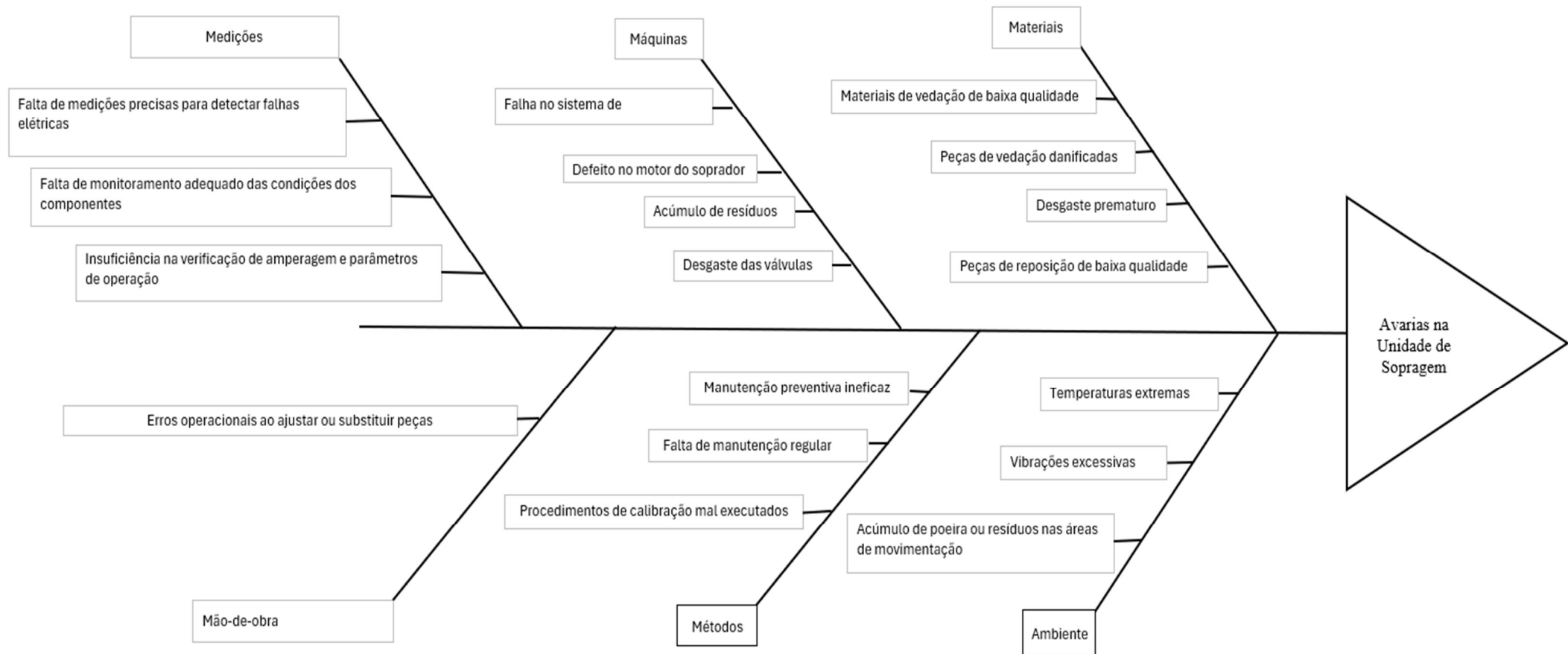


Figura 5.20 – Análise de avarias com Diagrama de Ishikawa.

5.3.5 Integração da Análise de Ishikawa com a Metodologia dos 5 Porquês

A aplicação do Diagrama de Ishikawa permitiu identificar e representar visualmente as principais causas das avarias no sistema de manutenção, organizando-as em categorias distintas. Contudo, para aprofundar a análise e assegurar a definição de soluções eficazes, recorreu-se também à metodologia dos 5 Porquês.

Esta técnica foi aplicada de forma complementar ao Diagrama de Ishikawa, permitindo investigar, de forma sistemática, as causas subjacentes de cada uma das falhas identificadas. Através da repetição da pergunta "porquê", foi possível ultrapassar os sintomas imediatos e alcançar uma compreensão mais profunda das origens dos problemas, clarificando as interações entre diferentes fatores e a cadeia de eventos que conduz às avarias.

A combinação destas duas metodologias revelou-se particularmente eficaz ao nível de:

1. **Identificação precisa das causas raiz** – O Diagrama de Ishikawa ofereceu uma visão abrangente das causas potenciais, enquanto os 5 Porquês permitiram aprofundar a análise e destacar as causas fundamentais que, à primeira vista, poderiam passar despercebidas.
2. **Eliminação de causas superficiais** – Através da técnica dos 5 Porquês foi possível filtrar as causas inicialmente identificadas, descartando aquelas de menor relevância e focando a atenção nas que efetivamente originam os problemas.
3. **Definição de ações corretivas mais eficazes** – Ao compreender as causas profundas das falhas, foi possível propor medidas corretivas direcionadas, orientadas não apenas para a resolução dos efeitos, mas sobretudo para a prevenção da recorrência.
4. **Redução da recorrência de falhas** – Esta abordagem integrada permitiu detetar falhas sistémicas e desenvolver soluções preventivas, com vista à minimização de avarias semelhantes no futuro.

Este método de análise permitiu a transição de uma abordagem reativa para uma abordagem proativa na gestão da manutenção, promovendo uma visão sistémica e orientada para a melhoria contínua.

Um exemplo concreto desta aplicação refere-se à unidade funcional dos sopradores de fuligem. Através da análise efetuada, concluiu-se que alguns dos problemas recorrentes estavam relacionados com o funcionamento da unidade abaixo dos parâmetros estabelecidos em projeto. Em particular, verificou-se que

a pressão de entrada se encontrava aquém do valor recomendado, exigindo um esforço acrescido para atingir a pressão de saída necessária. Para além disso, foi identificada a utilização de um lubrificante com características distintas das especificadas pelo fabricante, o que tem originado:

1. Excesso de viscosidade;
2. Desgaste prematuro dos componentes;
3. Problemas nos sistemas de vedação, com potenciais fugas.

A análise conjunta destas ferramentas contribuiu significativamente para uma compreensão mais robusta das falhas e para o desenvolvimento de um plano de manutenção mais eficaz e sustentável.

Tabela 5.9 – Comparação entre Condições de Operação, Projeto e Propriedades dos Lubrificantes dos sopradores.

Parâmetro	Operação Atual	Projeto (Fabricante)	Bomba PLEX G2	Moligrase Especial
Temperatura (°C)	280 – 289	320 – 400	-20 a 130	-20 a 150
Pressão (bar g)	20 – 23	24 – 40	—	—
Viscosidade (mm ² /s)	—	—	460	160
Ponto de gota (°C)	—	—	280	190
Pressão mínima de entrada (bar g)	—	23	—	—

5.3.6 Análise de Fiabilidade com a Distribuição de Weibull

Após as análises iniciais realizadas no âmbito deste relatório — nomeadamente a identificação dos principais modos de falha através do **Diagrama de Pareto**, a quantificação dos tempos médios de reparação (**MTTR**) e de tempo médio entre falhas (**MTBF**), análise temporal das ocorrências (gráfico de tendência), bem como a utilização da técnica dos **5 Porquês** para determinação das causas-raiz — procedeu-se a uma abordagem mais aprofundada da **fiabilidade dos equipamentos**, recorrendo à **distribuição de Weibull**.

Esta ferramenta estatística permite caracterizar o comportamento das falhas ao longo do tempo e identificar, com maior precisão, **em que fase do ciclo de vida** se encontram os diversos equipamentos da empresa Biotek.

A distribuição de Weibull, sendo uma distribuição de probabilidade contínua, é amplamente aplicada em engenharia para modelar tempos de vida de componentes e sistemas. A sua flexibilidade permite representar três fases distintas do ciclo de vida

de um equipamento: **mortalidade infantil** ($\beta < 1$), **aleatoriedade** ($\beta \approx 1$) e **envelhecimento** ($\beta > 1$). Figura 5.20

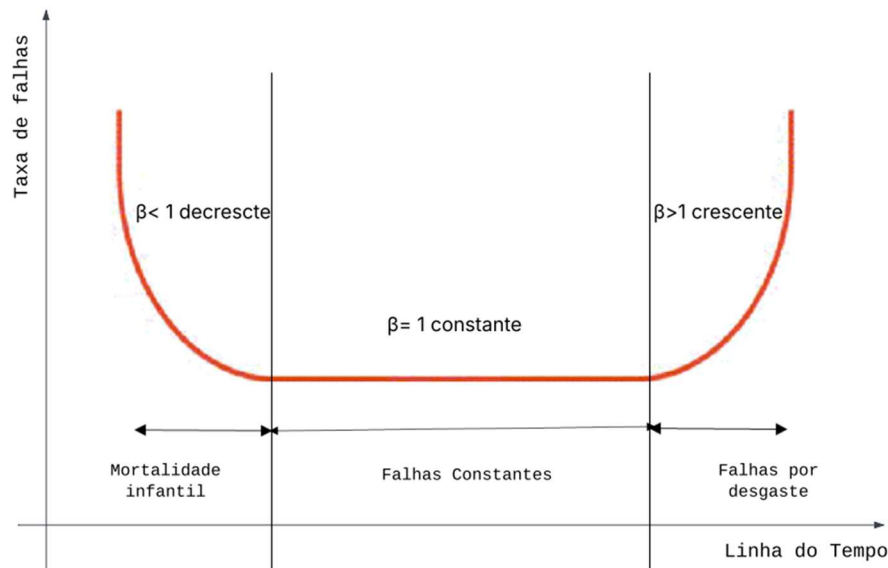


Figura 5.21 – Distribuição de Weibull.

Com base nos dados recolhidos durante o estágio, foi possível aplicar esta metodologia aos seguintes equipamentos:

- **Sopradores:** A análise revelou que estes equipamentos apresentam um **parâmetro de forma (β) superior a 1**, o que indica uma tendência crescente na taxa de falha ao longo do tempo. Isto é **típico da fase de envelhecimento, em que os componentes se vão desgastando com o uso e começam a falhar com mais frequência**. Este resultado está em consonância com os dados de **MTBF decrescentes** e com os registos de manutenção corretiva, reforçando a necessidade de estratégias de **manutenção preventiva baseada na condição**. A forma da curva da função densidade de Weibull para os sopradores corrobora este comportamento, em que a degradação progressiva exige maior atenção.
- **Autómatos de limpeza:** Estes equipamentos demonstraram uma elevada taxa de falha nos primeiros ciclos de operação. A aplicação da distribuição de Weibull apontou para um **parâmetro de forma (β) inferior a 1**, característico da **fase de mortalidade infantil**. Esta fase é geralmente associada a **falhas de projeto, montagem incorreta ou materiais defeituosos**, o que foi confirmado através da aplicação da técnica dos **5 Porquês**, que identificou causas-raiz relacionadas com deficiências na instalação e fornecimento de componentes. Esta identificação permite à equipa técnica tomar medidas

corretivas como a **revisão do processo de comissionamento e seleção mais criteriosa de fornecedores**.

A integração da distribuição de Weibull com os indicadores de **MTTR/MTBF** e a análise causal qualitativa (5 Porquês) proporciona uma **visão robusta e fiável do comportamento dos sistemas**. Esta abordagem cruzada permite não apenas reagir às falhas, mas **antecipar padrões de comportamento** e, assim, melhorar significativamente os índices de disponibilidade e produtividade dos equipamentos na Biotek.

Esta continuidade entre métodos quantitativos e qualitativos reforça o papel do engenheiro mecânico na implementação de soluções técnicas com impacto direto na eficiência operacional e na sustentabilidade dos processos industriais. Consultar **Anexo C** para informações adicionais sobre aplicação do método

5.3.7 Avaliação do Nível de Criticidade das Unidades Funcionais e Priorização das Ações

Com base na análise das causas das falhas nas unidades funcionais, que envolveu a utilização do Diagrama de Ishikawa e da metodologia dos 5 Porquês, foi realizada uma avaliação detalhada do nível de criticidade de cada unidade funcional. O objetivo desta avaliação foi identificar e priorizar as unidades com maior impacto na operação da caldeira de recuperação, de forma a concentrar os esforços de manutenção nas áreas que poderiam comprometer de forma mais significativa a eficiência e a segurança do sistema.

A empresa dispõe de toda a informação relativa às unidades funcionais, com os respetivos níveis de criticidade. Foi com base nesta informação que se verificou o nível de criticidade das unidades determinadas como prioridade na análise de Pareto.

Observa-se na tabela abaixo a classificação de algumas unidades como críticas, as quais requerem atenção especial.

Tabela 5.10 – Descrição do nível de criticidade.

Nível	Descrição	Indicador
1	Muito crítico / grave	
2	Crítico / importante	
3	Menos crítico / normal	
4	Insignificante	

Tabela 5.11 – Descrição do nível de criticidade.

Código	Unidade Funcional	Criticidade
T018-21-01	Evacuação de Smelt	1
T018-19-09	Queimador de Licor	1
T018-19-03	Circulação de Licor	1
T018-01-05	Alimentação de Água da Caldeira	1
T018-01-09	Alimentação de Emergência de Água	1
T018-01-03	Alimentação de Água da Caldeira N° 1	1
T018-01-11	Fornecimento de Água de Alimentação para Atemperação de Vapor	1
T018-03-05	Reservatório Superior	1
T018-19-01	Armazenagem de Licor Negro Forte	1
T018-19-05	Alimentação de Licor Negro para Queima	1
T018-19-07	Aquecimento de Licor Negro para Queima	1

5.3.8 Análise de Custo de Manutenção

Com o objetivo de avaliar os principais focos de despesa na área da manutenção, foi realizado um estudo detalhado sobre as unidades funcionais, com vista à identificação das áreas com maior impacto financeiro. Esta análise teve como finalidade apoiar a tomada de decisões estratégicas, orientadas para uma gestão mais eficiente dos recursos e para a melhoria da fiabilidade operacional.

O levantamento envolveu a quantificação dos custos associados a cada unidade funcional, incluindo intervenções de manutenção corretiva e preventiva. Foram considerados fatores como o tempo de inatividade dos equipamentos, o custo das peças de substituição e a mão-de-obra envolvida. Esta abordagem permitiu identificar as unidades que representam um maior consumo de recursos, apontando para a necessidade de atuações específicas nestes pontos críticos.

A análise evidenciou uma forte concentração de custos nas unidades com maior incidência de falhas, conforme demonstrado pela aplicação da análise de Pareto. Estas unidades, devido à elevada frequência de avarias, exigem intervenções recorrentes, o que se traduz diretamente num aumento dos custos operacionais. A correlação entre a frequência das falhas e os custos de manutenção, ilustrada nos gráficos correspondentes, reforça a necessidade de rever as atuais estratégias de manutenção.

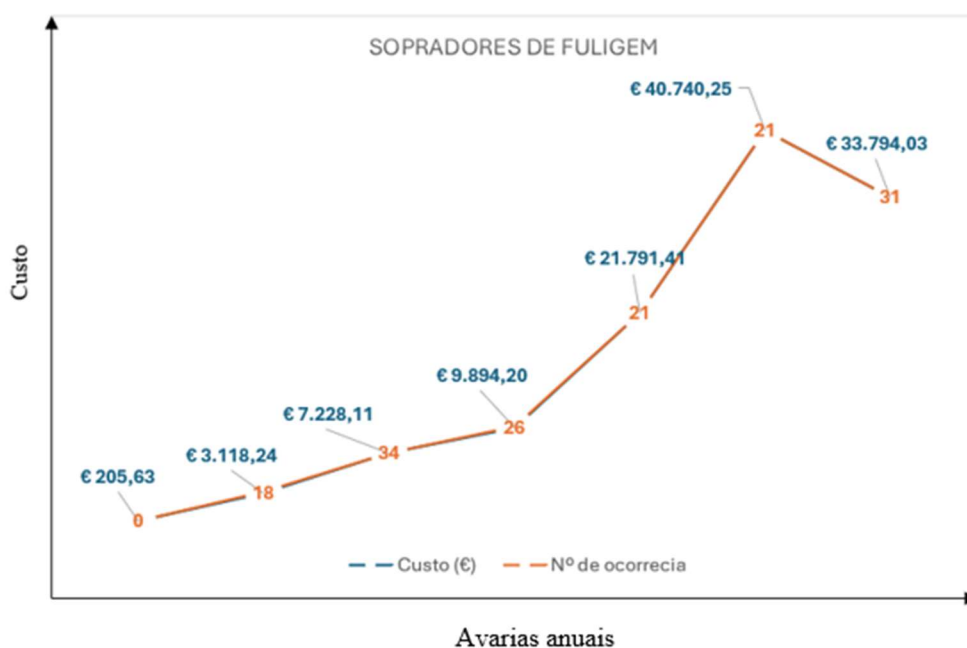


Figura 5.22 – Correlação entre a frequência das falhas e os custos de manutenção.

A identificação destes padrões permite uma abordagem mais focada, quer através do reforço da manutenção preventiva, quer pela otimização dos processos internos, ou ainda pela adoção de soluções tecnológicas mais robustas. A melhoria da gestão da manutenção nestas unidades poderá conduzir a reduções significativas nos custos, ao mesmo tempo que aumenta a disponibilidade e a fiabilidade dos sistemas.

5.4 Estudo de Caso: Sistema de Fornecimento de Ar Primário

Um exemplo ilustrativo desta correlação verifica-se no sistema de fornecimento de ar primário. Entre 2018 e 2020, registou-se um aumento expressivo dos custos de manutenção, que passaram de €163,10 para €31.745,80. Esta variação resulta, essencialmente, do aumento da frequência de avarias nos autómatos de limpeza e da necessidade de intervenções corretivas não planeadas. Importa referir que os valores percentuais elevados se devem também a uma base de comparação muito reduzida nos primeiros anos do período analisado.

A partir de 2021, observa-se uma tendência sustentada de redução dos custos, atingindo €18.882,60 em 2024. Esta melhoria está diretamente associada à implementação de melhorias estruturais nos autómatos de limpeza e ao reforço das ações de manutenção preventiva, o que permitiu uma diminuição significativa do número de falhas e, consequentemente, dos encargos financeiros.

Tabela 5.12 – Avaliação do custo de manutenção Fornecimento de ar primário.

Ano	Custo (€)	Variação Anual (%)
2018	€ 163,10	—
2019	€ 7.094,23	4250%
2020	€ 31.745,80	347,49%
2021	€ 28.553,40	-10%
2022	€ 41.798,80	46,39%
2023	€ 28.718,57	-31%
2024	€ 18.882,60	-34%

Entre 2018 e 2020, os custos de manutenção no sistema de fornecimento de ar primário registaram um aumento significativo, passando de €163,10 para €31.745,80. Esta variação deve-se, sobretudo, ao aumento da frequência de avarias nos autómatos de limpeza e à necessidade de intervenções corretivas não planeadas. Os valores percentuais elevados decorrem também de uma base de comparação muito baixa nos anos iniciais, amplificando o impacto das variações absolutas.

A partir de 2021, verifica-se uma tendência consistente de redução dos custos, atingindo €18.882,60 em 2024. Esta diminuição está diretamente relacionada com a melhoria estrutural e o reforço dos autómatos de limpeza de ar primário, o que contribuiu para uma significativa redução do número de falhas nestas unidades funcionais.

5.5 Estudo de Caso: Sopradores de Fuligem na Caldeira de Recuperação

A análise económica dos sopradores de fuligem da caldeira de recuperação, referente ao período de 2019 a 2024, permitiu quantificar os custos anuais com manutenção corretiva e preventiva, substituição de componentes e paragens não programadas.

Verificou-se que os sopradores localizados na parede esquerda representaram um custo acumulado de €116.771,87, enquanto os da parede direita totalizaram €86.130,65. No total, o custo associado a esta unidade funcional ascende a €202.902,52.

Este valor evidencia o impacto económico significativo destes equipamentos no desempenho da caldeira. A elevada frequência de falhas justifica a adoção de medidas de otimização, quer ao nível técnico, como a substituição por modelos mais fiáveis, quer ao nível da gestão da manutenção, com reforço das ações preventivas.

5.6 Análise do Plano de Manutenção das Unidades Funcionais

No âmbito da análise das 90 unidades funcionais, foi realizado um levantamento minucioso com o objetivo de identificar as unidades que já dispunham de um plano de manutenção formalizado, assim como aquelas que ainda não possuíam essa estrutura. O propósito desta análise foi duplo: por um lado, assegurar a melhoria contínua dos planos de manutenção existentes; por outro, desenvolver e implementar planos adequados de manutenção para as unidades que ainda não dispunham de tal organização.

O processo envolveu uma avaliação rigorosa dos planos de manutenção preexistentes, com a finalidade de identificar eventuais deficiências, lacunas ou oportunidades de otimização. Para as unidades que não possuíam planos de manutenção, foi elaborada uma proposta personalizada, tendo em conta as especificidades de cada unidade e as melhores práticas aplicáveis no setor.

A análise baseou-se em parâmetros como a análise de Pareto, a criticidade das unidades, a frequência de falhas, o histórico de manutenções e as recomendações de fabricantes. A partir dessa avaliação, foram definidos os requisitos essenciais para o desenvolvimento de planos de manutenção eficazes e sustentáveis, alinhados com os objetivos estratégicos da organização e com os padrões de qualidade e segurança exigidos. Em seguida, apresentam-se alguns exemplos realizados:

Plano de Manutenção Queimador de Arranque		
Inspeção/Manutenção	Ação	Periodicidade
Garganta do queimador	Limpar a garganta do queimador e visores.	Mensal
Bicos das Lanças	Verificar se os orifícios dos bicos estão limpos. Remover a lança, se necessário, limpeza.	Mensal
Scanner de Chama	Limpar o scanner de chamas.	Mensal
Sistema de Ignição e Lança	Verificar o funcionamento da ignição e da lança, retraindo-a quando não em uso.	Mensal
Impulsor	Verificar estado do impulsor.	Mensal

Figura 5.23 – Plano de manutenção unidade funcional queimador de arranque.

Plano de Manutenção Evacuação De Smelt		
Inspeção/Manutenção	Ação	Periodicidade
Porta Bica de smelt	Verificar o estado da porta	Mensal
Destroçador	Verificar o estado do destroçador	
Válvulas do Sistema de Arrefecimento	Verificar a existência de fugas nas válvulas e tubulações.	
Suportes e Patins das Linhas de Arrefecimento	- Verificar e reforçar, se necessário, os suportes e patins das linhas de arrefecimento.	
Tampa/Manzeira da Bica Smelt	- Inspeccionar a tampa da Bica Smelt (fissuras ou falhas).	
	- Ajustar a vedação para evitar perdas de calor.	
Destroçador e Mangas da Bica de Smelt	- Verificar as zonas de vedação no destroçador e mangas da Bica de Smelt para prevenir fugas de vapor.	

Figura 5.24 – Plano de manutenção unidade funcional evacuação de smelt.

5.7 Proposta de Otimização do Plano de Manutenção Preventiva

O foco foi a implementação de uma estratégia de manutenção centrada na fiabilidade (RCM - Reliability-Centered Maintenance), que considera a importância de cada componente no sistema e os custos associados às falhas não planeadas.

Para tal, foi realizado o cálculo do MTBF (Mean Time Between Failures) para cada unidade funcional, com o objetivo de determinar a frequência ideal das intervenções preventivas. O cálculo do MTBF forneceu uma métrica essencial para otimizar os ciclos de manutenção, ajustando-os à realidade operacional e ao comportamento histórico das falhas.

5.7.1 Cálculo do MTBF e Taxa de Falha com Base em Dados de Falhas Mensais: Exemplo Prático para o Ano de 2024

No presente estudo, utilizou-se o Python para efetuar o cálculo. Considerou-se o período de 12 meses (ano de 2024) para analisar o número de falhas ocorridas em cada mês. A partir dos dados mensais de falhas, foi calculado o MTBF (Mean Time Between Failures - Tempo Médio Entre Falhas) e a Taxa de Falha (λ), utilizando os seguintes passos:

1. **Falhas por Mês:** A lista de falhas, representando o número de falhas ocorridas em cada mês do ano de 2024, foi organizada da seguinte forma: [0, 2, 0, 1, 0, 2, 0, 1, 3, 2, 1, 0].
2. **Total de Falhas:** O total de falhas no ano foi obtido através da soma dos valores na lista de falhas. A função `sum(Falhas)` forneceu o resultado de 12 falhas ao longo de 12 meses.
3. **Número Total de Meses:** O número de meses foi determinado utilizando a função `len(Falhas)`, que devolveu 12 meses.
4. **Cálculo do MTBF:** O MTBF foi calculado dividindo o total de falhas pelo número de meses:

$$\text{MTBF} = \frac{12 \text{ Falhas}}{12 \text{ meses}} = 1 \text{ falhas/mês} \quad (2)$$

5. **Cálculo da Taxa de Falha (λ):** A Taxa de Falha foi calculada como o inverso do MTBF, ou seja, a média de falhas por mês:

$$\lambda = \frac{1}{1} = 1 \text{ mês} \quad (4)$$

Isto indica que, em média, o sistema falha uma vez por mês.

MTBF em Dias: Para calcular o MTBF em dias, considerando que cada mês tem, em média, 30 dias:

$$1 \times 30 = 30 \text{ dias}$$

Ou seja, em média, o sistema apresenta uma falha a cada 30 dias.

Este exemplo ilustra como os cálculos do MTBF e da Taxa de Falha foram feitos, fornecendo uma visão clara sobre o comportamento do sistema durante o ano de 2024. Consultar anexo B.

5.7.2 Análise de Desempenho das Unidades Funcionais

Adicionalmente, foram identificadas unidades que, até ao momento, não possuíam planos de manutenção específicos, como já foi referido anteriormente. Estas unidades passaram a ser contempladas com planos de manutenção preventiva detalhados, que incluem procedimentos de inspeção, substituição de componentes críticos e calibração de sistemas, com o objetivo de permitir a deteção precoce de falhas e prevenir a ocorrência de avarias graves.

Na elaboração deste plano de manutenção, foram também considerados fatores como os recursos humanos disponíveis. Após o cálculo do MTBF, avaliou-se se o intervalo entre intervenções era adequado para a equipa de técnicos, tendo em conta a quantidade de profissionais disponíveis e o tamanho da fábrica/equipamentos. Esta análise é fundamental para garantir que a equipa de manutenção tenha capacidade para cumprir os planos de manutenção sem comprometer a eficiência operacional.

Além disso, foi realizado o cálculo do MTTR (Mean Time to Repair - Tempo Médio de Reparo) para avaliar o tempo necessário para que as equipas de intervenção efetuem a correção ou reversão das falhas. O cálculo do MTTR é essencial para perceber a rapidez da resposta da equipa de manutenção e como isso impacta na disponibilidade das unidades.

Tabela 5.13 – Dados dos cálculos de MTBF e MTTR dos Sopradores.

Período de Análise	Número de Falhas	Total de Tempo de Operação (horas)	MTBF (horas)	Total de Tempo de Reparação (horas)	MTTR (horas)
2019–2020	18	8760	480	42	2
2020–2021	34	8760	264	59	2
2021–2022	26	8760	336	103	4
2022–2023	21	8760	624	58	3
2023–2024	21	8760	408	58	3
2024–2025	31	8760	288	83	3

Posteriormente, foi efetuado o cálculo da disponibilidade das unidades, um indicador fundamental para compreender o estado funcional dos equipamentos. A disponibilidade foi determinada com base no tempo total de operação em comparação com o tempo total disponível, levando em consideração o impacto de falhas e o tempo de reparo necessário. Esta análise foi crucial para garantir que as unidades permanecessem operacionais dentro dos parâmetros desejados, permitindo

a continuidade da produção e minimizando os períodos de inatividade. Como título de exemplo observa a tabela abaixo.

Tabela 5.14 – Dados dos cálculos de MTBF, MTTR e disponibilidade dos autômatos e sopradores.

Unidades Funcionais	Tempo Total de Operação (MTBF) (Horas)	Tempo Total de Paragem (MTTR) (Horas)	Número de Falhas (média mensal)	Disponibilidade (%)
Sopradores de fuligem	408	3	4	99,27%
Autômatos de Limpeza	264	1,4	2	99,47%

5.8 Propostas de Melhorias Operacionais e nas Unidades Funcionais

Com base nas intervenções acompanhadas e nas análises realizadas durante o período de estágio, foi possível identificar diversas áreas críticas com potencial de otimização. A utilização de ferramentas como o Diagrama de Pareto, MTBF (Mean Time Between Failures), MTTR (Mean Time To Repair) e outras métricas de desempenho operacional permitiu uma avaliação objetiva dos sistemas, contribuindo para a definição de propostas de melhoria.

A observação direta dos processos e o estudo das falhas recorrentes conduziram à elaboração de um conjunto de sugestões com vista à **melhoria da eficiência, redução do tempo de inatividade e aumento da fiabilidade dos equipamentos**.

Apresentam-se de seguida as principais propostas identificadas:

5.8.1 Padronização das Montagens (Exemplo: Montagem da Válvula Polpet)

A análise das falhas e das paragens não programadas revelou que, em determinadas situações, o processo de montagem da válvula *polpet* não seguia um procedimento padronizado, o que resultava em erros operacionais e aumento do tempo necessário para a sua manutenção.

A ausência de uniformidade no processo de montagem contribuiu para a ocorrência de avarias recorrentes, diminuição da fiabilidade e maior tempo de inatividade dos equipamentos. Neste contexto, a padronização do procedimento de montagem surge como uma medida fundamental para assegurar intervenções mais eficientes e com maior qualidade.

A implementação desta padronização pode ser realizada através das seguintes ações:

- **Desenvolvimento de um manual técnico de montagem**, com instruções detalhadas e ilustradas, descritas passo a passo;
- **Realização de ações de formação específicas** para a equipa de manutenção, focadas nas melhores práticas de montagem da válvula;
- **Criação de uma lista de verificação (checklist)** que assegure a inspeção de todos os pontos críticos durante o processo.

A execução inadequada da montagem pode originar diversas falhas operacionais, conforme ilustrado na imagem abaixo. Para mitigar este tipo de ocorrências, foi elaborada uma **POP (Procedimento Operacional Padrão)** específica para a montagem da válvula *polpet*, com o objetivo de uniformizar o processo, reduzir erros e aumentar a fiabilidade do sistema. A versão completa deste procedimento pode ser consultada no **Anexo D**.



Figura 5.25 – Fuga na válvula polpet.

5.8.2 Melhoria nos Autómatos de Limpeza do Ar Secundário (Adição de Suporte)

Durante o processo de limpeza do ar secundário, verificou-se que a **falta de suporte adequado** para os atuadores automáticos provocava **oscilações** durante o funcionamento. Esta instabilidade levava a **travamentos, desgaste prematuro** e, em alguns casos, à **falha total do atuador**.

Como ilustrado na **Figura 5.17**, a vibração excessiva durante a operação comprometia o alinhamento e a fiabilidade do sistema, originando **paragens não programadas** e **aumento do tempo de manutenção**.



Figura 5.26 – Desgaste prematuro dos autômatos de limpeza.

A proposta de melhoria inclui:

- **Análise e implementação de um suporte robusto e bem dimensionado**, garantindo a estabilidade do equipamento durante o ciclo de limpeza;
- **Avaliação do impacto da modificação** na eficiência do processo e na redução do tempo de inatividade;
- **Adoção de soluções de monitorização** para assegurar o bom funcionamento e a integridade do sistema de suporte ao longo do tempo.

Estas medidas visam assegurar uma limpeza mais eficaz, reduzir o risco de falhas operacionais e melhorar a fiabilidade do sistema.

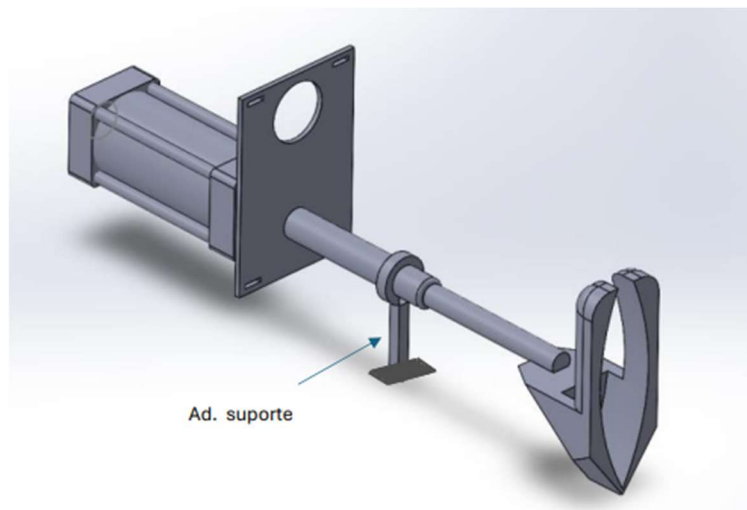


Figura 5.27 – Desgaste prematuro dos autômatos de limpeza.

Dimensões do suporte

Este desenho é para os mecanismos com as hastes maiores. Para os mecanismos com as hastes menores, a altura seria de 272,5 mm.

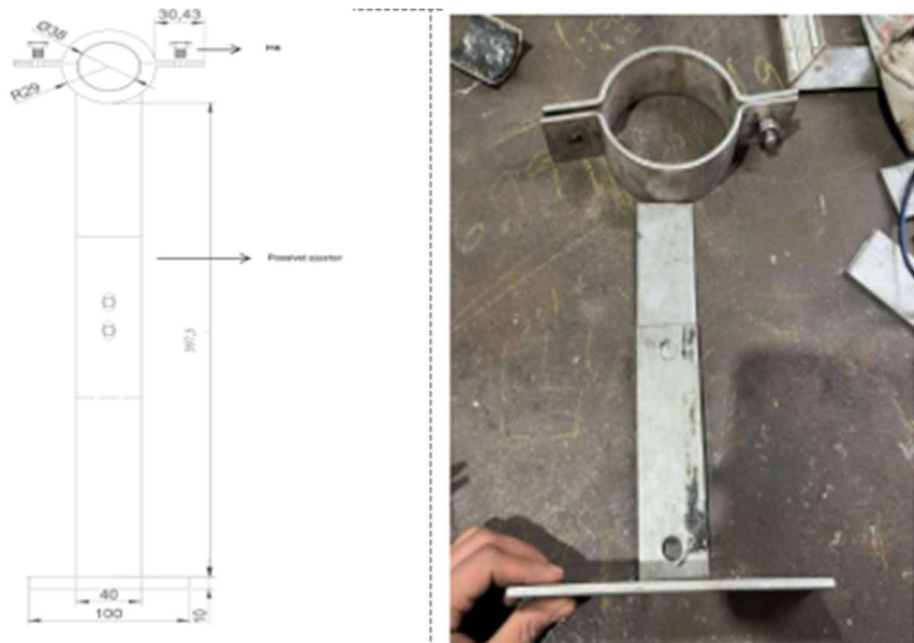


Figura 5.28 - Desgaste prematuro dos autómatos de limpeza.

Objetivo do Suporte

- Guiar o movimento do atuador para evitar desalinhamento.
- Suportar parte do peso da haste e da carga que o atuador movimenta.
- Reduzir o atrito lateral entre a haste e as paredes da caixa de ar.
- Evitar flexão da haste, aumentando a vida útil do sistema.

Como Funciona esse Suporte?

- O suporte seria fixado na parte estática do atuador (ou na estrutura que o segura).
- Esse suporte serviria como um ponto de apoio, reduzindo a carga diretamente na haste do atuador.

Benefícios desse Suporte

Redução do esforço na haste → diminui a tendência de flexão e desgaste. **Manutenção do alinhamento** → evita que a haste sofra deslocamentos laterais. Solução simples e econômica → fácil de instalar e ajustar.

5.8.3 Proposta de Modificação da Proteção dos Sopradores de Fuligem

Os sopradores de fuligem desempenham um papel crucial no funcionamento das caldeiras de recuperação, sendo responsáveis pela remoção eficiente da fuligem acumulada nos tubos da caldeira. Este processo é essencial para manter a eficiência térmica e evitar o comprometimento do desempenho da caldeira. Contudo, a inspeção e o processo de manutenção destes sopradores são, frequentemente, demorados, devido à complexidade e ao tempo necessário para a desmontagem das suas proteções.

Durante as atividades de inspeção e reparação dos sopradores de fuligem, foi observada uma demora considerável na desmontagem das proteções, o que resulta num aumento do tempo de inatividade do sistema, impactando diretamente na produtividade e nos custos operacionais.

A modificação proposta visa otimizar o processo de manutenção, promovendo uma redução significativa no tempo necessário para desmontar as proteções dos sopradores. A redução deste tempo de intervenção contribuirá para uma maior disponibilidade da caldeira, com menor impacto nos ciclos de operação.

5.8.3.1 Proposta Técnica de Modificação

Redesenho das Proteções: O novo design das proteções dos sopradores de fuligem será focado em facilitar a desmontagem rápida e segura. Isso incluirá:

Sistemas de fixação rápida: A incorporação de dispositivos de fixação rápida, como encaixes de fechos rápidos, reduzirá significativamente o tempo de desmontagem e montagem das proteções.

Para garantir que a modificação proposta esteja em conformidade com as normas e regulamentações aplicáveis, foi consultado o Decreto-Lei nº 50/2005, de 25 de fevereiro, com o intuito de verificar possíveis restrições e requisitos técnicos ou de segurança que possam influenciar a implementação do novo design. A análise incluiu:

Verificação de requisitos de segurança relacionados com riscos operacionais, como possíveis exposições a temperaturas elevadas e risco de danos físicos durante as operações de manutenção.

Exame das normas relativas à manutenção e substituição de componentes críticos, garantindo que a alteração proposta não viole disposições relativas à segurança e operação da caldeira.

Após a aprovação do redesenho e a validação da conformidade regulatória, será realizada uma fase piloto de implementação do novo sistema de proteção numa unidade de caldeira. Serão feitos testes operacionais para avaliar a eficácia do design em reduzir o tempo de desmontagem e montagem, além de monitorar o seu desempenho ao longo do tempo.

Resultados Esperados:

- Redução do tempo de manutenção: Com as proteções redesenhadas e os sistemas de fixação mais eficientes, espera-se uma redução substancial no tempo de intervenção, aumentando a disponibilidade dos sopradores e, consequentemente, da caldeira.
- Conformidade regulatória e segurança: A modificação atenderá a todas as exigências legais e de segurança, minimizando riscos operacionais e garantindo que a intervenção esteja em conformidade com as normas técnicas.

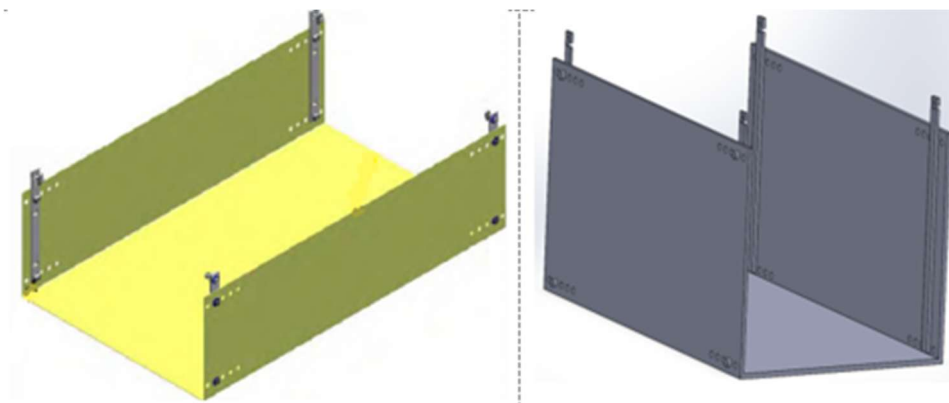


Figura 5.29 – Modificação dos encaixes das proteções dos sopradores.

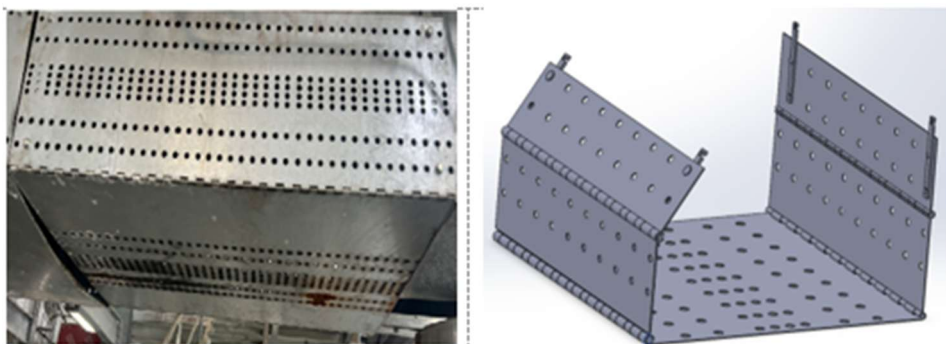


Figura 5.30– Implementação de partes moveis nos sopradores.

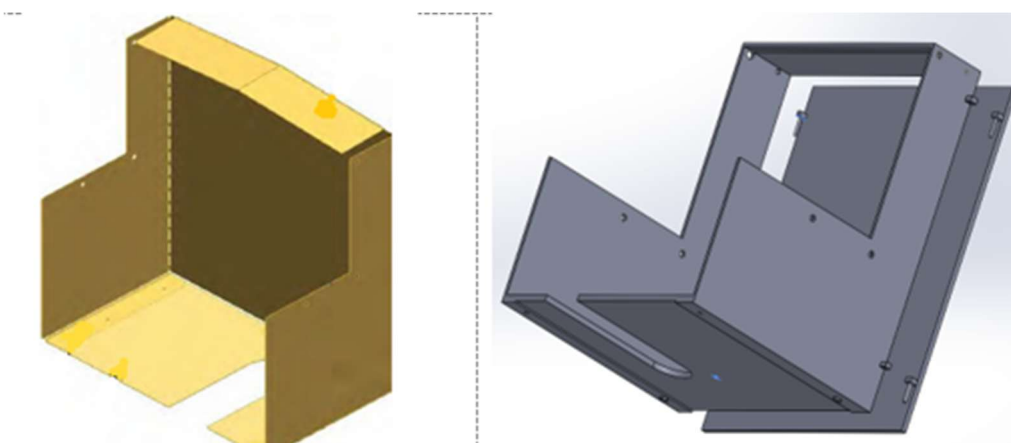


Figura 5.31 – Modificação de partes traseira dos sopradores.

5.9 Paragem Anual da Caldeira de Recuperação 2025

A paragem anual da caldeira de recuperação constitui uma etapa crítica no ciclo de manutenção industrial, sendo determinante para garantir a segurança operacional, a eficiência energética e a durabilidade do equipamento. Durante o estágio desenvolvido na Biotek, tive a oportunidade de participar ativamente na preparação desta intervenção, assegurando que todas as ações fossem devidamente planificadas e executadas, de forma a assegurar o funcionamento contínuo do sistema até à próxima paragem programada.

A preparação para esta paragem requer uma abordagem metódica, baseada na análise de informação técnica relevante e na avaliação do estado real do equipamento. Este processo incluiu a revisão de registos históricos, a identificação de componentes com maior criticidade e a inspeção detalhada das zonas mais suscetíveis a desgaste.

5.9.1 Análise de Registos de Intervenções Anteriores

A primeira fase consistiu na consulta e análise dos relatórios de manutenção de anos anteriores. Estes documentos revelaram-se fundamentais para compreender padrões de falha, identificar recorrências e avaliar a eficácia das intervenções anteriormente realizadas. Esta informação permitiu estabelecer prioridades e delinear ações corretivas e preventivas com base em evidências, contribuindo para uma abordagem mais robusta e proactiva à manutenção.

5.9.2 Avaliação de Componentes Críticos

Com base nos dados históricos e nas inspeções realizadas, foi possível identificar os componentes com maior impacto no desempenho e na segurança da caldeira. Elementos como válvulas, bombas, sensores e dispositivos de controlo foram avaliados quanto ao seu estado de conservação e proximidade do fim da vida útil. Os componentes com maior risco de falha foram incluídos no plano de substituição ou manutenção preventiva, minimizando a probabilidade de ocorrências imprevistas durante o ciclo operativo seguinte.

5.9.3 Inspeção de Áreas Vulneráveis

Paralelamente, foi realizada uma inspeção minuciosa às zonas com maior propensão a desgaste ou acumulação de resíduos. Entre estas destacam-se as superfícies de troca térmica, os sistemas de exaustão e os circuitos de alimentação de água e vapor. A monitorização destas áreas permitiu identificar necessidades específicas de intervenção, nomeadamente substituição de componentes degradados, limpeza técnica e calibração de sistemas de controlo de temperatura e pressão.

5.9.4 Avaliação Preditiva dos Tubos da Caldeira

No âmbito da preparação para a paragem anual da caldeira, e em complemento às atividades de análise documental e inspeção visual, foi realizada uma **avaliação preditiva do estado dos tubos da caldeira de recuperação**, com base na medição da sua espessura ao longo dos anos (Recovery Boiler Tube Thickness Measuring).

Esta análise teve por base os resultados constantes num relatório técnico elaborado por uma **entidade externa especializada**, que efetuou diversas inspeções utilizando **ensaios não destrutivos (END)**, com registos disponíveis desde o ano de **2017**. As técnicas aplicadas nestas inspeções, detalhadas anteriormente na secção referente à manutenção preditiva, permitiram obter dados fiáveis sobre a evolução do desgaste dos tubos ao longo do tempo.

A análise envolveu a identificação do ano em que foi registada a menor espessura, a monitorização da espessura mínima dos últimos anos, o cálculo da **taxa média anual de redução**, e a **estimativa do ano em que se prevê atingir o limite admissível de espessura** para operação segura da caldeira.

Esta abordagem preditiva revelou-se fundamental para sustentar decisões de manutenção com base em dados técnicos concretos, contribuindo para o aumento da fiabilidade operacional e para a minimização de riscos associados a falhas inesperadas. A integração de dados históricos obtidos por END reforça a robustez da estratégia de manutenção implementada.

Alguns dados técnicos e detalhes de cálculo da paragem anual encontram-se disponíveis no anexo E para consultar.

5.10 Análise e Resultados

Durante o estágio realizado na unidade industrial Biotek, procedeu-se a uma abordagem sistemática e multidisciplinar ao sistema de manutenção da caldeira de recuperação, com o objetivo de aumentar a eficiência operacional, reduzir falhas recorrentes e otimizar os recursos técnicos e financeiros.

A análise iniciou-se com a aplicação integrada do Diagrama de Ishikawa e da técnica dos 5 Porquês, permitindo uma identificação robusta das causas-raiz das avarias. Esta abordagem qualitativa foi essencial para entender a origem sistémica dos problemas e eliminar causas superficiais, conduzindo a ações corretivas mais eficazes.

A partir destes dados, foi realizada uma avaliação da fiabilidade dos equipamentos através da distribuição de Weibull. Os resultados mostraram que:

- Os sopradores de fuligem encontram-se na fase de envelhecimento ($\beta > 1$), justificando ações de manutenção preditiva baseadas na condição.
- Os autómatos de limpeza revelaram comportamento típico de mortalidade infantil ($\beta < 1$), apontando para deficiências na instalação inicial e necessidade de revisão dos fornecedores e processos de montagem.

Complementarmente, foram calculados indicadores de desempenho como o MTBF e o MTTR, que permitiram uma avaliação quantitativa do comportamento das unidades funcionais. Esta análise fundamentou o redesenho dos ciclos de manutenção preventiva e serviu de base para calcular a disponibilidade dos equipamentos. Os cálculos evidenciaram que a média de falha mensal era de 1 falha/mês, com um tempo médio entre falhas de 30 dias, reforçando a necessidade de uma intervenção sistemática e preventiva.

A análise dos custos de manutenção confirmou a correlação direta entre frequência de avarias e impacto financeiro, conforme ilustrado no estudo de Pareto. As unidades mais críticas foram identificadas, priorizando-se intervenções nas que apresentavam maior criticidade (nível 1) e incidência de falhas, como o queimador de licor, a evacuação de smelt e os sistemas de fornecimento de água da caldeira.

No seguimento desta análise, foram desenvolvidos e otimizados planos de manutenção preventiva para diversas unidades, com destaque para:

- Padronização da montagem da válvula polpet, garantindo intervenções mais rápidas e fiáveis;
- Implementação de suportes para os autómatos de limpeza, reduzindo o desgaste e falhas operacionais;
- Redesenho das proteções dos sopradores de fuligem, com sistemas de fixação rápida para agilizar inspeções.

A preparação da paragem anual da caldeira de recuperação de 2025 incluiu uma revisão exaustiva de intervenções passadas, inspeção de componentes críticos e uma análise preditiva da espessura dos tubos da caldeira com base em ensaios não destrutivos. Esta abordagem técnica e preditiva reforçou a segurança operacional e o planeamento de ações corretivas antes da ocorrência de falhas críticas.

6 REFLEXÕES SOBRE O ESTÁGIO

6.1 Dificuldades Enfrentadas

Durante a realização do estágio curricular na Biotek, surgiram diversas dificuldades que, embora desafiadoras, contribuíram de forma significativa para o processo de aprendizagem. Uma das principais dificuldades iniciais prendeu-se com a complexidade do sistema térmico da caldeira de recuperação, cujos componentes e processos operacionais exigem um elevado grau de conhecimento técnico e compreensão sistêmica. A familiarização com a terminologia específica, os diagramas de processo e os procedimentos de segurança industrial exigiu um período de adaptação e estudo aprofundado.

Adicionalmente, a recolha e análise de dados históricos de falhas apresentaram limitações, devido à existência de registos incompletos ou pouco padronizados, dificultando uma avaliação quantitativa inicial mais rigorosa. A interação com equipas multidisciplinares, embora extremamente enriquecedora, também constituiu um desafio na fase inicial, exigindo o desenvolvimento de competências de comunicação técnica eficaz e de trabalho em equipa num contexto de elevada exigência operacional.

Por fim, a gestão do tempo entre as diversas tarefas práticas em ambiente industrial e a produção do relatório técnico exigiu uma organização rigorosa e disciplina pessoal, especialmente durante as fases de maior intensidade de trabalho.

6.2 Competências Adquiridas

Ao longo do estágio, foram desenvolvidas e reforçadas várias competências técnicas e transversais, essenciais para a formação de um engenheiro mecânico qualificado. Em termos técnicos, destaca-se a aquisição de conhecimentos práticos em **análise de falhas, gestão da manutenção, e interpretação de parâmetros operacionais de caldeiras de recuperação**, tais como pressão, temperatura e fluxo de vapor. A participação em intervenções de **manutenção preventiva, preditiva e corretiva** permitiu compreender a importância da antecipação de falhas e da atuação eficaz na minimização do tempo de paragem de equipamentos críticos.

Foi ainda desenvolvida competência na aplicação de ferramentas de análise de falhas, nomeadamente o Diagrama de Causa-Efeito (Ishikawa), a metodologia dos 5 Porquês, a análise temporal de falhas e a distribuição de Weibull. Paralelamente, foi realizado o levantamento e ajustamento de planos de manutenção com base no estado real das unidades funcionais da caldeira. Estas ferramentas revelaram-se fundamentais para a proposta de reestruturação dos planos de manutenção da caldeira de recuperação.

Do ponto de vista pessoal e profissional, houve um fortalecimento das capacidades de **comunicação técnica, resolução de problemas, trabalho em equipa e adaptação a ambientes industriais exigentes**, competências transversais valorizadas no mercado de trabalho.

6.3 Relação entre Teoria e Prática

O estágio permitiu consolidar a ligação entre os conteúdos teóricos abordados ao longo do mestrado e a sua aplicação prática num contexto real. Conceitos aprendidos em unidades curriculares como **Termodinâmica Aplicada, Manutenção Industrial, Transferência de Calor, e Gestão de Equipamentos Térmicos** foram fundamentais para interpretar o funcionamento da caldeira, identificar falhas potenciais e propor soluções eficazes.

A prática em ambiente industrial revelou-se essencial para perceber as limitações dos modelos teóricos quando aplicados a equipamentos sujeitos a condições reais de operação, como variações de carga, desgaste de componentes e imprevistos operacionais. A experiência permitiu compreender que a teoria fornece as bases fundamentais, mas a prática exige **flexibilidade, capacidade de diagnóstico rápido, e decisões fundamentadas na experiência e nos dados reais** do sistema.

Este contacto direto com a realidade operacional contribuiu decisivamente para o amadurecimento técnico e profissional, reforçando a importância de uma formação integrada entre teoria e prática.

6.4 Contributo para a Empresa e para o Desenvolvimento Pessoal

O trabalho desenvolvido ao longo do estágio representou um contributo relevante para a Biotek, ao fornecer uma análise detalhada do estado atual da caldeira de recuperação e ao propor a **reestruturação dos planos de manutenção** com base em técnicas modernas de análise de falhas. Esta abordagem permitiu à empresa obter uma visão mais clara das áreas críticas do equipamento e identificar oportunidades de melhoria nos procedimentos de manutenção.

Além disso, os dados recolhidos e as recomendações elaboradas durante o estágio poderão servir de base para futuras intervenções e otimizações no sistema, contribuindo para a **redução de falhas inesperadas, melhoria da fiabilidade do equipamento e aumento da eficiência energética**, alinhando-se com os objetivos estratégicos da empresa em termos de sustentabilidade e eficiência operacional.

No plano pessoal, esta experiência foi determinante para o meu desenvolvimento enquanto engenheiro mecânico. O contacto direto com equipamentos complexos, a colaboração com profissionais experientes e a responsabilidade de propor soluções viáveis e fundamentadas permitiram o desenvolvimento de **autonomia, pensamento crítico, e capacidade de decisão**. A consolidação destes aspetos, aliados ao conhecimento técnico adquirido, fortaleceu significativamente o meu perfil profissional e aumentou a minha preparação para os desafios do mercado de trabalho.

7 AUTOAVALIAÇÃO E SUGESTÕES

7.1 Avaliação Global da Experiência

A experiência de estágio curricular na empresa Biotek revelou-se extremamente enriquecedora, tanto a nível técnico como pessoal. A possibilidade de integrar uma unidade industrial de grande dimensão e complexidade permitiu o contacto direto com tecnologias avançadas e equipamentos críticos, como a caldeira de recuperação, cuja importância no processo produtivo é central.

Ao longo do estágio, foi possível aplicar de forma prática os conhecimentos adquiridos durante o percurso académico, especialmente nas áreas de termodinâmica, manutenção industrial e análise de falhas. A integração com a equipa da manutenção mecânica foi particularmente positiva, tendo sido proporcionado um ambiente de aprendizagem colaborativo, onde o conhecimento prático foi constantemente partilhado.

De modo geral, a experiência superou as expectativas iniciais, quer pela diversidade de tarefas executadas, quer pelo grau de envolvimento nas atividades operacionais e estratégicas de manutenção. O estágio permitiu não só o desenvolvimento de competências técnicas, mas também o contacto com a realidade das exigências do setor industrial, reforçando a preparação para o exercício profissional da engenharia.

7.2 Impacto no Percurso Académico e Profissional

A realização deste estágio teve um impacto significativo no meu percurso académico e profissional. No plano académico, permitiu consolidar conhecimentos adquiridos ao longo do mestrado, através da sua aplicação prática, e contribuiu para o desenvolvimento de um pensamento mais crítico e orientado para a resolução de problemas reais.

No plano profissional, a experiência foi essencial para clarificar os meus interesses e aptidões dentro da engenharia mecânica, reforçando a minha motivação para seguir uma carreira na área da **manutenção industrial e gestão de ativos térmicos**. A participação ativa na reestruturação dos planos de manutenção, com base na análise de falhas, constituiu uma oportunidade valiosa de contacto com metodologias utilizadas em contexto real, o que certamente será uma mais-valia na minha inserção no mercado de trabalho.

Além disso, o estágio proporcionou o desenvolvimento de competências transversais, como a capacidade de trabalho em equipa, gestão de tempo, comunicação técnica e adaptação a ambientes exigentes — todas elas fundamentais para uma carreira de sucesso em engenharia.

7.3 Sugestões para Futuros Estagiários

É fundamental assegurar a continuidade do trabalho desenvolvido, garantindo que todas as tarefas se mantenham atualizadas de forma consistente. Para além disso, é recomendável procurar, de forma contínua, novas abordagens e técnicas que contribuam para a otimização dos processos de manutenção, com o objetivo de melhorar a eficiência e a fiabilidade dos sistemas mecânicos da empresa.

Com base nas melhorias implementadas durante o estágio, propõem-se as seguintes ações com vista à otimização da manutenção e do desempenho operacional na Biotek:

1. **Análise Detalhada de Custos de Manutenção:**
Desenvolver um sistema mais preciso para avaliar os custos de manutenção por componente, permitindo uma alocação mais eficiente dos recursos.
2. **Implementação de KPIs Específicos:**
Criar indicadores de desempenho que possibilitem monitorizar a eficácia das intervenções de manutenção e facilitar a tomada de decisões com base em dados concretos.
3. **Aplicação do HMM Modelos Escondidos de Markov:**
Considera-se pertinente a aplicação do método HMM como ferramenta de manutenção preditiva para a caldeira de recuperação. Através da análise de dados históricos de operação, este modelo permitirá identificar estados operacionais ocultos e prever falhas com maior antecedência. Esta abordagem poderá contribuir significativamente para a redução de custos e para o reforço do planeamento da manutenção.

Para futuros estagiários que venham a integrar a Biotek, ou a realizar estágios com características semelhantes, recomenda-se uma preparação prévia sólida nos seguintes temas: funcionamento de caldeiras industriais, técnicas de manutenção (preventiva, preditiva e corretiva), bem como métodos de análise de falhas, como FMEA, árvore de falhas e diagrama de Ishikawa. Esta base teórica facilitará a adaptação ao ambiente industrial e permitirá uma participação ativa desde as primeiras semanas do estágio.

Adicionalmente, é importante desenvolver competências de observação, organização e comunicação, dado que o sucesso do estágio depende não apenas do conhecimento técnico, mas também da forma como o estagiário se integra na equipa e gere as suas responsabilidades.

Relativamente ao plano de trabalhos, sugere-se a inclusão de momentos formais de feedback entre o orientador da empresa e o estagiário, ao longo do período de estágio. Estes momentos serviriam para alinhar expectativas, identificar eventuais dificuldades de forma precoce e maximizar o valor da experiência. A criação de um pequeno projeto paralelo, focado na melhoria contínua ou em inovação, poderá também enriquecer a experiência, estimulando o pensamento crítico e promovendo a autonomia do estagiário.

8 CONCLUSÃO

8.1 Síntese dos Principais Pontos

Este relatório de estágio, desenvolvido no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica, teve como foco a **análise e reestruturação de planos de manutenção** numa caldeira de recuperação da empresa Biotek, com base em técnicas de análise de falhas. Durante o estágio, foram analisadas cerca de 90 unidades funcionais, com destaque para 14 unidades que apresentavam maior número de avarias, identificadas através do Diagrama de Pareto.

As ferramentas utilizadas — como o **Diagrama de Ishikawa**, os **5 Porquês**, e a análise de indicadores como **MTBF (Mean Time Between Failures)** e **MTTR (Mean Time to Repair)** — permitiram identificar causas-raiz e propor soluções eficazes. Foram implementadas melhorias específicas nas duas unidades mais críticas, com destaque para a **redução de 32% nas falhas dos autómatos**.

Além disso, novas propostas de planos de manutenção foram desenvolvidas para unidades sem plano, e os planos existentes foram otimizados. Entre as melhorias destacam-se: modificações nas proteções dos sopradores de fuligem, adição de suportes aos autómatos de limpeza do ar secundário e padronização das montagens da válvula polpet.

8.2 Cumprimento dos Objetivos Iniciais

O objetivo principal do estágio — **analisar e otimizar os processos de manutenção da caldeira de recuperação** — foi plenamente atingido. Foram propostas ações concretas que visam a **redução de falhas, a diminuição de custos operacionais e a melhoria da eficiência e fiabilidade** dos equipamentos.

A aplicação prática dos conceitos de **manutenção centrada na fiabilidade (RCM)**, aliada ao uso de ferramentas de análise de falhas, proporcionou uma abordagem sistemática e fundamentada para a tomada de decisões. Os resultados obtidos comprovam a eficácia da metodologia adotada e a sua contribuição para uma gestão mais eficiente dos recursos de manutenção.

8.3 Considerações Finais

O estágio representou uma experiência enriquecedora, tanto do ponto de vista técnico quanto profissional. A oportunidade de aplicar conhecimentos teóricos em um ambiente industrial real permitiu o desenvolvimento de competências essenciais na área de engenharia de manutenção.

As ações propostas demonstram resultados positivos e indicam um **potencial de melhoria contínua** a longo prazo. O trabalho desenvolvido contribui não apenas para o desempenho da caldeira de recuperação, mas também para a estruturação de uma cultura de manutenção preventiva e orientada por dados dentro da organização.

Por fim, este estágio reforçou a importância de uma abordagem analítica e estratégica na manutenção industrial, evidenciando o papel fundamental da engenharia mecânica na **sustentabilidade, eficiência e competitividade das operações industriais**.

BIBIOGRAFIA

- Ahtila, E. K. (2011). Modern Method to Determine Recovery Boiler Efficiency. *Technical Article / Peer-reviewed Article*, 8.
- Altri. (2025). *Iniciativas de Manutenção Preditiva e Condicionada*. FORUM BIOND.
- Barulho, R. F. (2011). *A utilização da manutenção condicionada no Hotel CS Atlântico – São Rafael - 5 estrelas*. ALGARVE: UNIVERSIDADE DO ALGARVE INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA Departamento de Engenharia Mecânica.
- Cardoso, M. (1998). *Análise da Unidade de Recuperação do Licor Negro de Eucalipto no Processo "Kraft", Avaliando Alternativas de Processamento*. Campinas, SP.
- Committee, T. B. (2016). *Recommended Good Practice Safe Firing of Black Liquor in Black Liquor Recovery Boilers*.
- Cruz, A. J. (2 de Março de 2018). *Elementos de Maquinas*.
- Débora Rodrigues de Souza Paschoal, M. A. (2009). Disponibilidade e confiabilidade: Aplicação da Gestão Da Manutenção na Busca de Maior Competitividade. *Revista da Engenharia de Instalações no mar da FSM4*, 14.
- Ferreira, L. A. (1998). *Uma Introdução à Manutenção*. Porto.
- Instituto Português da qualidade, N. P. (2009). *Manutenção-Documento para a Manutenção*.
- Lahtinen, M. (2019). *Utilization Of Visual Analysis in Recovery Boilers*. LUT University School of Energy Systems Energy Technology.
- Laura Angélica Ardila Rodriguez, C. A. (2016). *Máquinas Térmicas*. São Paulo.
- Machado, Junior, Celestino, Andrade, Junior, C. O. (2023). *MANUTENÇÃOPRESCRITIVA:AEVOLUÇÃOODAMANUTENÇÃON AINDUSTRIA4.0*. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação-REASE.
- Neves, A. L. (2008). *Gestão da Manutenção*. SENAI-CFP.
- Okada, C. A. (2020). Manutenção Preditiva: estratégia de produção e redução de custos. *Interface Tecnológica*, 13.
- Praszkier, S. (2011). *Influence Of DesIgn and Materials With Consideration To The Annual Maintenance Works in Recovery Boilers*. Gotemburgo.
- PricewaterhouseCoopers. (2017). *Predictive Maintenance 4.0 Predict the unpredictable*. PricewaterhouseCoopers.

Aplicação de Técnicas de Análise de Falhas para Reestruturação de Planos de Manutenção: Caso de Estudo numa Caldeira de Recuperação na Biotek

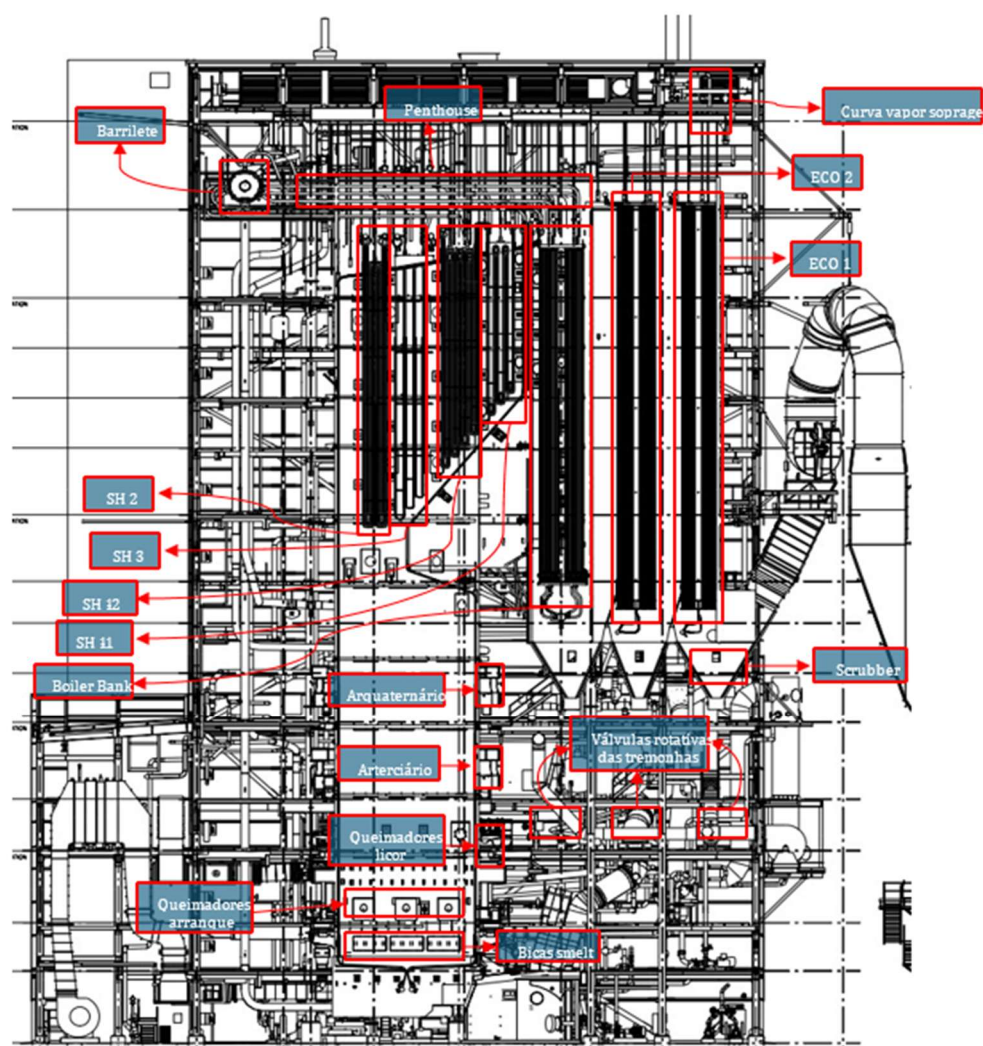
- Raza, F. (2023). AI for Predictive Maintenance in Industrial Systems. *COSMIC BULLETIN OF BUSINESS MANAGEMENT*, 18.
- Souza, A. F. (2008). Análise da Disponibilidade em Equipamentos de ressonância Magnética Baseada em Indicadores de Manutenção. *21º Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica*, 4.
- Standardization, E. C. (2003). EN 12952-15: Water-tube Boilers and Auxiliary Installations-part15: Acceptance tests.
- Vakkilainen, E. K. (2005). *Kraft recovery boilers -Principles and practice.* : Suomen Soodakattilayhdistys r.y.
- Vakkilainen, H. T. (2007). Advances in the Kraft Chemical Recovery Process.
- www.dgeg.gov.pt
- Instituto Português da Qualidade. (2009). *NP EN 13460:2009 – Manutenção: Documentação para a manutenção*
- Instituto Português da Qualidade. (2007). *NP EN 13269:2007 – Manutenção: Instruções para a preparação de contratos de manutenção.*
- Instituto Português da Qualidade. (2009). *NP EN 15341:2009 – Manutenção: Indicadores de desempenho da manutenção (KPI).*
- European Committee for Standardization (CEN). (2010). *EN 13306:2010 – Maintenance: Maintenance terminology*
- Instituto Português da Qualidade. (2010). *NP 4492:2010 – Requisitos para a prestação de serviços de manutenção.*
- Biotek. (2025). Empresa. <https://www.bio-tek.pt/pt/empresa>
- International Organization for Standardization. (2016). EN ISO 17638: Non-destructive testing of welds—Magnetic particle testing. ISO.
- International Organization for Standardization. (2018). EN ISO 17640: Non-destructive testing of welds—Ultrasonic testing, techniques, testing levels, and assessment. ISO.
- International Organization for Standardization. (2013). EN ISO 3452-1: Non-destructive testing—Penetrant testing—Part 1: General principles. ISO.

European Parliament and the Council of the European Union. (2014). Directive 2014/68/EU on pressure equipment. Official Journal of the European Union.

ANEXO A

Principais características da caldeira

Equipment:	Recovery boiler RB2 (VALMET RECOX)		
Registration No.:	20181034/Q		
Manufacturing No.:	518	Steam production:	51,2 kg/s
Start up:	April 2018	Capacity:	1450 tds/24h
Fuel:	Black liquor + natural gas + (DNCG + SOG)		
Modifications:	Boiler prepared to be upgrade to 2100 tds/24h		
Design and operation characteristics:	Operation		Design
Pressure (MPa)	10,05 (drum) ; 9,5 (tertiary)		12,7 (Eco) / 12,5 (Drum to tertiary)
Temperature (°C)	312 (drum) / 495 (tert. outlet)		328 (Eco) / 505 (tertiary outlet)



ANEXO B

Unidades funcionais analisadas

	Unidades Funcionais	Ocorrências	% Acumulada	%
T018-09-01	Fornecimento De Ar Primário	275	18%	18%
T018-05-01	Unidade De Sopragem Parede Esquerda	151	28%	10%
T018-05-03	Unidade De Sopragem Parede Direita	125	37%	8%
T018-19-09	Queimador De Licor	80	42%	5%
T018-21-01	Evacuação De Smelt	69	47%	5%
T018-09-03	Fornecimento De Ar Secundário	67	51%	4%
T018-19-11	Recolha de Derrame de Licor Negro	67	55%	4%
T018-01-01	Armazenagem De Água De Alimentação Da Caldeira	63	60%	4%
T018-01-11	Fornecimento De Água De Alimentação Para Aquecimento De Vapor	63	64%	4%
T018-21-05	Armazenagem De Smelt	59	68%	4%
T018-01-09	Alimentação De Emergência Da Água Da Caldeira	57	72%	4%
T018-23-03	Queimadores Arranque	49	75%	3%
T018-21-07	Tratamento De Gases De Tanque De Smelt	41	78%	3%
T018-17-17	Recolha E Transfega De Rejeitados De Cinzas E Sulfatos	35	80%	2%
T018-27-03	Controlo de Fosfatos	29	82%	2%
T018-17-13	Armazenagem de Sulfato de Sódio Exterior	27	84%	2%
T018-17-15	Mistura E Transfega De Licor Negro Para A Área 57	26	85%	2%
T018-29-05	Rede De Distribuição De Água Incêndio	22	87%	1%
T018-09-05	Fornecimento De Ar Terciário	17	88%	1%
T018-27-01	Controlo De PH	16	88%	1%
T018-19-01	Armazenagem De Licor Negro Forte	12	90%	1%
T018-19-05	Alimentação De Licor Negro Para Queima	12	91%	1%
T018-19-03	Circulação De Licor	11	91%	1%
T018-19-07	Aquecimento De Licor Negro Para Queima	11	92%	1%
T018-29-03	Rede De Distribuição De Água Selagem	11	93%	1%
T018-09-07	Fornecimento De Ar Quaternário	10	93%	1%
T018-01-03	Alimentação De Água Caldeira Nº 1	9	94%	1%
T018-11-01	Recolha De Condensado De Vapor de Baixa Pressão	8	95%	1%
T018-15-03	Recolha De Cinza Electrofiltro Nº 2	7	95%	0%
T018-29-01	Rede de Distribuição De Água Fabril	7	95%	0%
T018-01-05	Alimentação de água caldeira	6	96%	0%
T018-15-01	Recolha De Cinza Electrofiltro Nº 1	6	96%	0%
T018-25-01	Estação De Amostra De Água	6	97%	0%
T018-03-07	Sobreaquecimento De Vapor	5	97%	0%
T018-13-01	Limpeza De Gases Nº 1	5	97%	0%
T018-17-01	Recolha De Cinza Do Boiler Bank	4	98%	0%
T018-17-03	Recolha De Cinza Do Eco 1	4	98%	0%
T018-11-03	Recolha De condensado De Vapor De Média Pressão	3	98%	0%
T018-17-05	Recolha De Cinza Do Eco 2	3	98%	0%
T018-17-09	Recolha De Cinza Do Electrofiltro	3	98%	0%
T018-17-11	Transferência De Cinza Para O Tanque De Mistura	3	99%	0%
T018-21-03	Arrefecimento Das Bicas De Smelt	3	99%	0%
T018-03-05	Reservatório Superior	2	99%	0%
T018-03-11	Distribuição De Vapor A Sopragem	2	99%	0%
T018-13-03	Limpeza De Gases Nº 2	2	99%	0%
T018-13-07	Tiragem De Fumos Nº 1	2	99%	0%
T018-03-01	Pré Aquecimento De Água De Alimentação	1	99%	0%
T018-07-03	Recolha De Purga	1	100%	0%
T018-07-05	Purga Contínua	1	100%	0%
T018-20-06	Tanque De Recolha De GNCC	1	100%	0%
T018-20-30	Queimador Fomalha GNCC-SOG	1	100%	0%
T018-29-07	Rede De Distribuição De Água Lavagem E Chuveiro De Segurança	1	100%	0%
T018-27-05	Controlo De Alimentação de Oxigénio	1	100%	0%
T018-31-01	Rede De Ar Fabril	1	100%	0%
T018-35-01	Elevador De CRII	1	100%	0%
T018-01-07	Reservado Para Bomba 3	0	100%	0%
T018-03-09	Distribuição De Vapor Sobreaquecido	0	100%	0%
T018-03-13	Controlo De Temperatura	0	100%	0%
T018-05-05	Reservado Para Unidade Sopragem Arrefecimento De Gases	0	100%	0%
T018-07-01	Arçamento Da caldeira	0	100%	0%
T018-13-05	Reservado Para Limpeza De Gases Nº 3	0	100%	0%
T018-13-09	Tiragem De Fumos Nº 2	0	100%	0%
T018-13-11	Reservado Para Tiragem De Fumos Nº 4	0	100%	0%
T018-13-13	Chamine Principal	0	100%	0%
T018-13-20	Edifício Electrofiltro CRII	0	100%	0%
T018-15-05	Reservado Para Recolha De Electrofiltro Nº 3	0	100%	0%
T018-17-07	Recolha De Cinza Da caldeira	0	100%	0%
T018-20-01	Recolha De GNCCs Do Cozimento	0	100%	0%
T018-20-02	Recolha De GNCC Dos Tanques De Condensado Sujo	0	100%	0%
T018-20-03	Recolha De GNCCs De Evaporação	0	100%	0%
T018-20-07	Injeção De Vapor De GNCC	0	100%	0%
T018-20-08	Recolha De Condensados Sujos De GNCC	0	100%	0%
T018-20-09	Transfega De Condensado Sujo GNCC Nº 1	0	100%	0%
T018-20-10	Transfega De Condensado Sujo GNCC Nº 2	0	100%	0%
T018-20-13	Distribuição De GNCC Para Queimador	0	100%	0%
T018-20-14	Distribuição De GNCC Para Tocha	0	100%	0%
T018-20-15	Recolha De Gases Do Stripper SOGs	0	100%	0%
T018-20-16	Recolha De Consensado de SOG	0	100%	0%
T018-20-17	Transfega De Consensado De SOG Nº 1	0	100%	0%
T018-20-20	Transfega De Consensado De SOG Nº 2	0	100%	0%
T018-20-21	Distribuição De SOG Para Queima	0	100%	0%
T018-20-22	Distribuição De SOG Para Tocha	0	100%	0%
T018-20-33	Queimador Tocha GNCC-SOG	0	100%	0%
T018-20-40	Rede de Vapor Auxiliar BP	0	100%	0%
T018-31-03	Rede De Ar instrumento	0	100%	0%
T018-33-01	Rede De Distribuição de Vapor	0	100%	0%
T018-38-01	Elevador Principal	0	100%	0%
T018-38-03	Elevação De Carga	0	100%	0%
T018-45-01	Chuveiro De Emergência	0	100%	0%
	TOTAL	1504		

Aplicação de Técnicas de Análise de Falhas para Reestruturação de Planos de Manutenção: Caso de Estudo numa Caldeira de Recuperação na Biotek

	Unidades Funcionais	Criticidade
T018-21-01	Evacuação De Smelt	1
T018-19-09	Queimador De Licor	1
T018-19-03	Circulação De Licor	1
T018-01-05	Alimen. De Água Caldeira	1
T018-01-09	Alimen. Emergent. De Água	1
T018-01-03	Alimentação De Água Caldeira N° 1	1
T018-01-11	Fornecimento De água De Alimentação Para Atemperação De Vapor	1
T018-03-05	Reservatório Superior	1
T018-19-01	Armazenagem De Licor Negro Forte	1
T018-19-05	Alimentação De Licor Negro Para Queima	1
T018-19-07	Aquecimento De Licor Negro Para Queima	1
T018-20-01	Recolha De GNCCs Do Cozimento	1
T018-20-02	Recolha De GNCC Dos Tanques De Condensado Sujo	1
T018-20-03	Recolha De GNCCs De Evaporação	1
T018-20-06	Tanque De Recolha De GNCC	1
T018-20-07	Injeção De Vapor De GNCC	1
T018-20-08	Recolha De Condensados Sujos De GNCC	1
T018-20-09	Transfega De Condensado Sujo GNCC N° 1	1
T018-20-10	Transfega De Condensado Sujo GNCC N° 2	1
T018-20-13	Distribuição De GNCC Para Queimador	1
T018-20-14	Distribuição De GNCC Para Tocha	1
T018-20-15	Recolha De Gases Do Stripper SOGs	1
T018-20-16	Recolha De Consensado de SOG	1
T018-20-17	Transfega De Consensado De SOG N° 1	1
T018-20-20	Transfega De Consensado De SOG N° 2	1
T018-20-21	Distribuição De SOG Para Queima	1
T018-20-22	Distribuição De SOG Para Tocha	1
T018-20-30	Queimador Fornalha GNCC-SOG	1
T018-20-33	Queimador Tocha GNCC-SOG	1
T018-20-40	Rede de Vapor Auxiliar BP	1
T018-21-03	Arrefecimento Das Bicas De Smelt	1
T018-27-01	Controlo De PH	1
T018-27-03	Controlo De Fosfeto	1
T018-27-05	Controlo De Alimentação de Oxigénio	1
T018-45-01	Chuveiro De Emergência	1
T018-09-01	Fornecimento de Ar primário	2
T018-09-03	Fornecimento de Ar secundário	2
T018-21-05	Armazenagem De Smelt	2
T018-23-03	Queimadores Arranque	2
T018-01-01	Armazenagem De Água De Alimentação Da Caldeira	2
T018-03-01	Pré Aquecimento De Água De Alimentação	2
T018-03-07	Sobreaquecimento De Vapor	2
T018-03-09	Distribuição De Vapor Sobreaquecido	2
T018-03-11	Distribuição De Vapor A Sopragem	2
T018-03-13	Controlo De Temperatura	2
T018-09-05	Fornecimento De Ar Terciário	2
T018-09-07	Fornecimento De Ar Quaternário	2
T018-13-01	Limpeza De Gases N° 1	2
T018-13-03	Limpeza De Gases N° 2	2
T018-13-07	Tiragem De Fumos N° 1	2
T018-13-09	Tiragem De Fumos N° 2	2
T018-17-01	Recolha De Cinza Do Boiler Bank	2
T018-17-13	Armazenagem de Sulfato de Sódio Exterior	2
T018-17-15	Mistura E Transfega De Licor Negro Para A Área 57	2
T018-17-17	Recolha E Transfega De Rejeitados De Cinzas E Sulfatos	2
T018-21-07	Tratamento De Gases De Tanque De Smelt	2
T018-31-01	Rede De Ar Fabril	2
T018-33-01	Rede De Distribuição de Vapor	2
T018-05-01	Sopradore P. Esquerda	3
T018-05-03	Sopradore P. Direita	3
T018-07-01	Arejamento Da caldeira	3
T018-07-03	Recolha De Purga	3
T018-07-05	Purga Continua	3
T018-11-01	Recolha De Condensado De Vapor de Baixa Presão	3
T018-11-03	Recolha De condensado De Vapor De Média Presão	3
T018-13-13	Chamine Principal	3
T018-15-01	Recolha De Cinza Electrofiltro N° 1	3
T018-15-03	Recolha De Cinza Electrofiltro N° 2	3
T018-17-03	Recolha De Cinza Do Eco 1	3
T018-17-05	Recolha De Cinza Do Eco 2	3
T018-17-07	Recolha De Cinza Da caldeira	3
T018-17-09	Recolha De Cinza Do Electrofiltro	3
T018-17-11	Transferência De Cinza Para O Tanque De Mistura	3
T018-19-11	Recolha de Derrame de Licor Negro	3
T018-29-01	Rede de Distribuição De Água Fabril	3
T018-29-03	Rede De Distribuição De Água Selagem	3
T018-29-05	Rede De Distribuição De Água Incêdio	3
T018-29-07	Rede De Distribuição De Água Lavagem E Chuveiro De Segurança	3
T018-31-03	Rede De Ar instrumento	3
T018-38-03	Elevação De Carga	3
T018-13-20	Edifício Eletrofiltro CRII	4
T018-35-01	Elevador De CRII	4
T018-25-01	Estação De Amostra De Água	4

Nível	Descrição
-------	-----------

1	Muito Crítico / grave	
2	Crítico / importante	
3	Menos crítico / Normal	
4	Insignificante	

↑
Críticidade

IR	Inspeção de rotina
PP	Próxima paragem
IN	Inspeção
PA	Paragem Anual

Aplicação de Técnicas de Análise de Falhas para Reestruturação de Planos de Manutenção: Caso de Estudo numa Caldeira de Recuperação na Biotek

MP	Codigo	Plano De Manutenção Unidades Funcionais	Frequência		Departamento Serviço Emissor	Tipo			
			Mensal	Anual		IR	PP	IN	PA
180004	T018-09-01	Fornecimento De Ar Primário	2		DM-EP	*			*
	T018-09-03	Fornecimento De Ar Secundário							
	T018-05-01	Sopradores P. Esquerda							
180001	T018-05-03	Sopradores P. Direita	1		DM-M	*			
1821010102	T018-21-01	Evacuação de Smelt		12	DM-M		*		
18210501	T018-21-05	Armaz. De smelt	2		DM-M			*	
-----	T018-23-03	Queimadores Arranque	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
18190902 e 18190903	T018-19-09	Queimador de licor	3	18	DM-EP		*	*	
-----	T018-19-03	Circulação de licor	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-01-05	Alimentação de água caldeira	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-01-09	Alimentação Emergência de água da caldeira	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
18191102	T018-19-11	Recolha de Derrame de Licor Negro	1		DM-M			*	
180005 e 18010301	T018-01-01	Armazenagem De Água De Alimentação Da Caldeira	1	6	DM-M	*		*	
18011101	T018-01-11	Fornecimento De água De Alimentação Para Atemperação	1		DM-EP			*	
-----	T018-21-07	Tratamento De Gases De Tanque De Smelt	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
180006	T018-17-17	Recolha E Transfega De Rejeitados De Cinzas E Sulfatos	2		DM-EP	*			
-----	T018-27-03	Controlo de Fosfeto	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
18171301	T018-17-13	Armazenagem de Sulfato de Sódio Exterior	3		DM-EP			*	
-----	T018-17-15	Mistura E Transfega De Licor Negro Para A Área 57	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-29-05	Rede De Distribuição De Água Incêdio	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
180903	T018-09-05	Fornecimento De Ar Terciário			DM-M				*
-----	T018-27-01	Controlo De PH	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-19-01	Armazenagem De Licor Negro Forte	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-19-05	Alimentação De Licor Negro Para Queima	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-19-07	Aquecimento De Licor Negro Para Quema	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-29-03	Rede De Distribuição De Água Selagem	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-09-07	Fornecimento De Ar Quaternário	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
18010501	T018-01-03	Alimentação De Água Caldeira Nº 1			DM-M				*
-----	T018-11-01	Recolha De Condensado De Vapor de Baixa Presão	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-15-03	Recolha De Cinza Electrofiltro Nº 2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-29-01	Rede de Distribuição De Água Fabril	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-15-01	Recolha De Cinza Electrofiltro Nº 1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-25-01	Estação De Amostra De Água	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-03-07	Sobreaquecimento De Vapor	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
18010	T018-13-01	Limpeza De Gases Nº 1			DM-M				*
-----	T018-17-01	Recolha De Cinza Do Boiler Bank	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-17-03	Recolha De Cinza Do Eco 1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-11-03	Recolha De condensado De Vapor De Média Presão	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-17-05	Recolha De Cinza Do Eco 2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-17-09	Recolha De Cinza Do Electrofiltro	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
18171101	T018-17-11	Transferência De Cinza Para O Tanque De Mistura			DM-M				*
182103	T018-21-03	Arrefecimento Das Bicas De Smelt			DM-M				*
-----	T018-03-05	Reservatório Superior	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-03-11	Distribuição De Vapor A Sopragem	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-13-03	Limpeza De Gases Nº 2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-13-07	Tiragem De Fumos Nº 1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-03-01	Pré Aquecimento De Água De Alimentação	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-07-03	Recolha De Purga	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-07-05	Purga Continua	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-20-06	Tanque De Recolha De GNCC	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-20-30	Queimador Fomalha GNCC-SOG	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-29-07	Rede De Distribuição De Água Lavagem E Chuveiro De S	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-27-05	Controlo De Alimentação de Oxigénio	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-31-01	Rede De Ar Fabril	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-35-01	Elevador De CRII	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-01-07	Resevado Para Bomba 3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-03-09	Distribuição De Vapor Sobreaquecido	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-03-13	Controlo De Temperatura	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-05-05	Reservado Para Unidade Sopragem Arrefecimento De Gas	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-07-01	Arejamento Da caldeira	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-13-05	Reservado Para Limpeza De Gases Nº 3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-13-09	Tiragem De Fumos Nº 2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-13-11	Reservado Para Tiragem De Fumos Nº 4	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-13-13	Chamine Principal	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-13-20	Edificio Electrofiltro CRII	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-15-05	Reservado Para Recolha De Electrofiltro Nº 3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
181701	T018-17-07	Recolha De Cinza Da caldeira			DM-M				*
-----	T018-20-01	Recolha De GNCCs Do Cozimento	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-20-02	Recolha De GNCC Dos Tanques De Condensado Sujo	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-20-03	Recolha De GNCCs De Evaporação	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-20-07	Injeção De Vapor De GNCC	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-20-08	Recolha De Condensados Sujos De GNCC	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-20-09	Transfega De Condensado Sujo GNCC Nº 1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-20-10	Transfega De Condensado Sujo GNCC Nº 2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-20-13	Distribuição De GNCC Para Queimador	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-20-14	Distribuição De GNCC Para Tocha	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-20-15	Recolha De Gases Do Stripper SOGs	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-20-16	Recolha De Consensado de SOG	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-20-17	Transfega De Consensado De SOG Nº 1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-20-20	Transfega De Consensado De SOG Nº 2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-20-21	Distribuição De SOG Para Queima	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-20-22	Distribuição De SOG Para Tocha	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-20-33	Queimador Tocha GNCC-SOG	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-20-40	Rede de Vapor Auxiliar BP	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-31-03	Rede De Ar instrumento	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-33-01	Rede De Distribuição de Vapor	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-38-01	Elevador Principal	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-38-03	Elevação De Carga	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	T018-45-01	Chuveiro De Emergência	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Cálculo do MTBF

```
# Calculo do MTBF para determinar o programa de manutenção
#Foi individualmente calculado os anos: 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024
#Depois foi feito a média

#Dados do ano 2024 fonte MAXIMO_OE Armazenagem de smelt

# Dados fornecidos de falhas por mês
Falhas = [1,1,1,1,2,0,0,1,1,1,1,0];

#somando total de falhas
Total_falhas = sum(Falhas)

#numero total de meses
num_meses = len(Falhas)

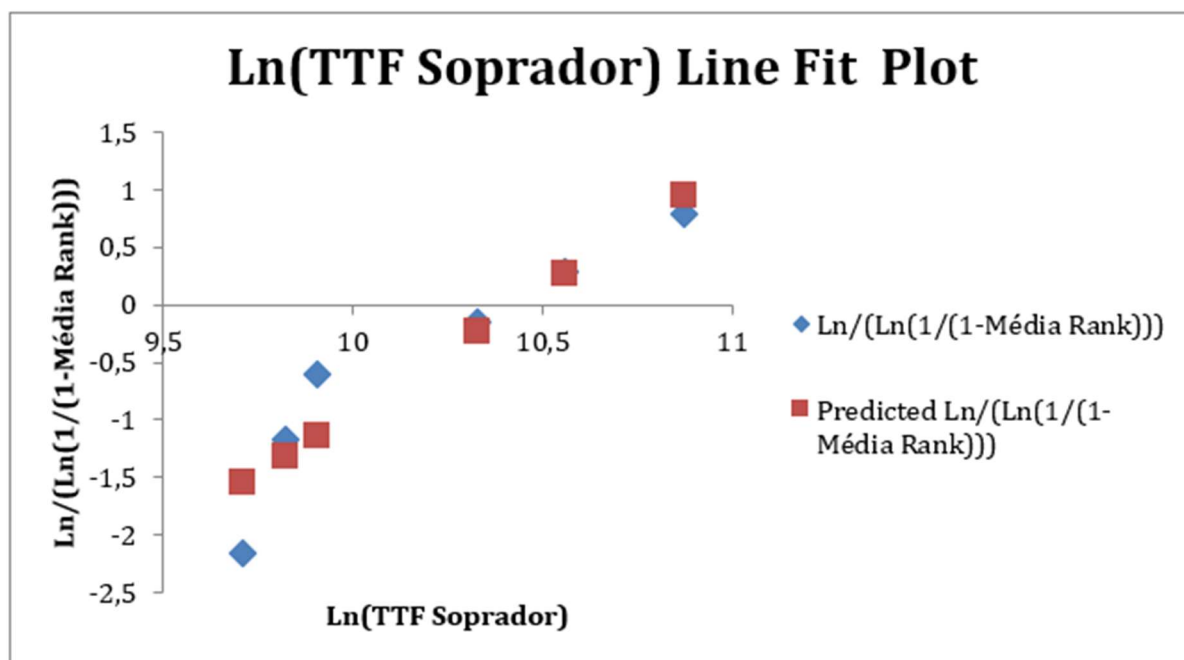
#Calcular MTBF (Média das falhas por mês)
MTBF =Total_falhas/num_meses

#Resultado
print("MTBF é:", MTBF,)
```

MTBF é: 0.8333333333333334

Anos	MTBF	F.PM	Dias	
2018	0,16	6	188	
2019	0,83	1	36	
2020	0,92	1	33	
2021	0,75	1	40	
2022	0,83	1	36	
2023	0,58	2	52	
2024	0,83	1	36	
			36	
	0,83	1		Média

ANEXO C



SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.935687853
R Square	0.875511759
Adjusted R Square	0.844389698
Standard Error	0.418160812
Observations	6

ANOVA

	df	SS	MS
Regression	1	4.919039435	4.919039435
Residual	4	0.699433859	0.174858465
Total	5	5.618473294	

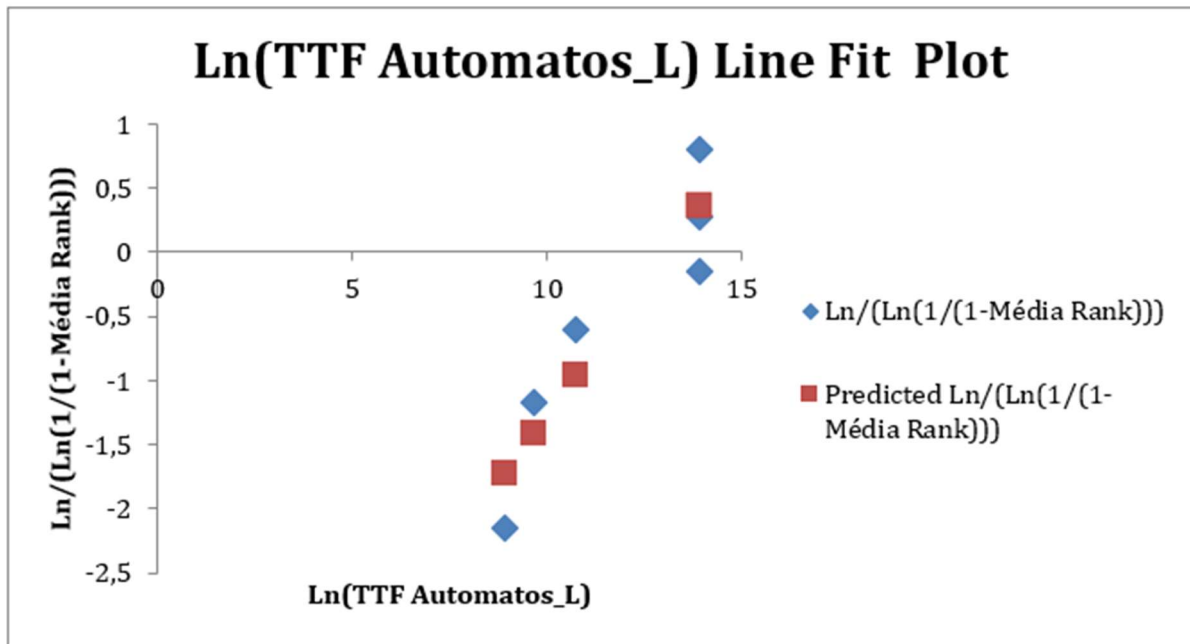
F	Significance F
28.13154881	0.006071079

	Coefficients	Standard Error	t Stat
Intercept	-22.40024034	4.13248703	-5.420522842
Ln(TTF Soprador)	2.146880804	0.404772604	5.303918251
beta	2.146880804		
alfa	33991.09151		

P-value	Lower 95%	Upper 95%	ower 95.0%	Upper 95.0%
0.005615064	-33.87386373	-10.92661696	-33.8739	-10.92661696
0.006071079	1.023051888	3.270709721	1.023052	3.270709721

RESIDUAL OUTPUT

Observation	Predicted $\text{Ln}(\text{Ln}(1/(1-\text{Média Rank})))$	Residuals
1	-1.548927687	-0.60668319
2	-1.309673261	0.134402846
3	-1.133708675	0.532165124
4	-0.229499485	0.08221245
5	0.271584093	0.010333703
6	0.946762635	-0.152425805



SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.924236231
R Square	0.85421261
Adjusted R Square	0.817765763
Standard Error	0.452521424
Observations	6

ANOVA

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	1	4.799370738	4.799371	23.43722	0.008392775
Residual	4	0.819102555	0.204776		
Total	5	5.618473294			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	-5.463240238	1.041603477	-5.24503	0.006319	-8.355195114	-2.571285362	-8.355195114	-2.571285362
Ln(TTF Automatos_L)	0.418829478	0.08651357	4.8412	0.008393	0.178629299	0.659029657	0.178629299	0.659029657
beta	0.418829478							
alfa	462345.678							

RESIDUAL OUTPUT

Observation	Predicted $\text{Ln}/(\text{Ln}(1/(1-\text{Média Rank})))$	Residuals
1	-1.727436573	-0.428179433
2	-1.412400665	0.23713025
3	-0.960617017	0.359073465
4	0.363570881	-0.510857916
5	0.366291088	-0.084373292
6	0.367129905	0.427206926

ANEXO D

Procedimento Operacional Padrão (POP) – Remoção da Válvula Poppet do Soprador de Fuligem DIAMOND IK9M

Objetivo:

Remover a válvula poppet do soprador de fuligem, garantindo a segurança e a integridade dos componentes durante o processo.

Materiais Necessários:

- Ferramentas: Chave inglesa, chave de fenda, chave Allen, alicate de pressão
- Equipamentos de proteção individual (EPIs): Luvas de segurança, óculos de proteção
- Peças sobressalentes (se necessário): Junta de vedação, espaçadores, parafusos, porcas, anel fendido

Procedimento:

Preparação:

- **Isole o soprador de fuligem** da alimentação elétrica para impedir o funcionamento automático da unidade.
- **Desligue a alimentação do meio de sopragem** para evitar a ativação do sistema durante o processo de manutenção.

Desconexão da Válvula de poppet:

- **Desligue a tubagem da válvula de poppet** para a válvula de segurança de ar. Utilize uma chave ou alicate adequado para soltar as conexões de forma segura.

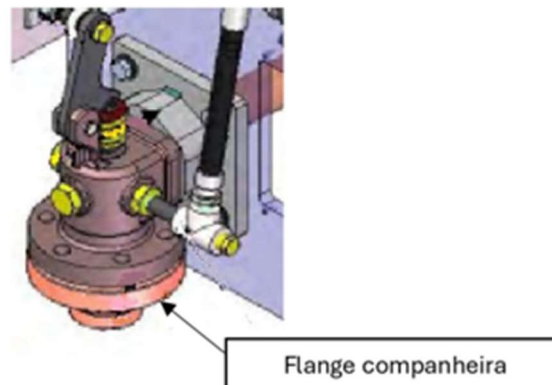
Desconectar a válvula poppet com mecanismo de abertura

1º Remova a porca que fixa a válvula poppet ao seu suporte.

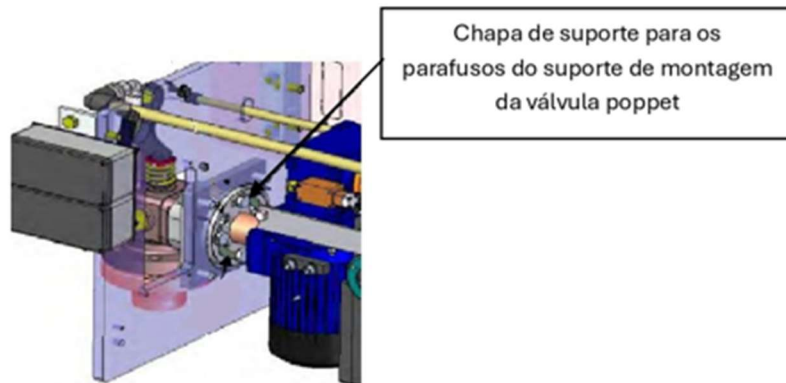
Retire os dois espaçadores e o parafuso que fazem parte do conjunto da válvula poppet, tomando cuidado para não danificar os componentes ao removê-los.



2º Desligue a válvula poppet da flange companheira. Para isso, solte os parafusos que mantêm a válvula presa à flange companheira com a chave adequada.

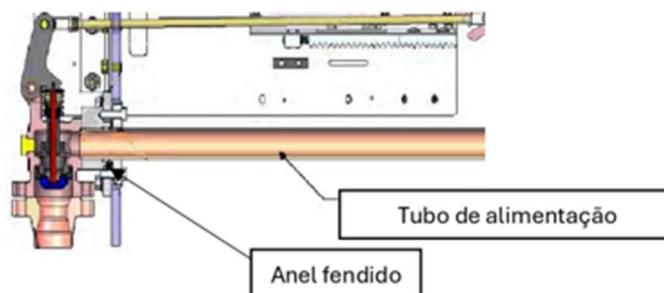


3º Remova os parafusos da chapa do suporte de montagem da válvula poppet.
Guarde as chapas e parafusos para a remontagem posterior.



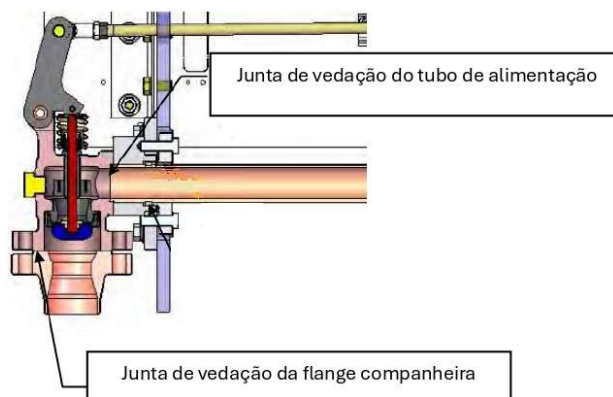
4º Remoção do Tubo de Alimentação:

- **Puxe o tubo de alimentação** para a caldeira até que o final do tubo fique visível. Durante este processo, **tenha cuidado para não soltar as duas metades do anel fendido** que estão montadas no tubo de alimentação. Mantenha a chave presa ao tubo de alimentação para evitar que ele se mova.
- **Retire os restantes parafusos** que fixam a válvula poppet no suporte de montagem, garantindo que a válvula seja solta completamente do sistema.



5º Substituição da Junta de Vedação:

- **Substitua a junta de vedação** da válvula poppet antes de recolocá-la no sistema. Certifique-se de que a superfície de contato esteja limpa e livre de resíduos para garantir uma vedação adequada.



6º Recolocação (Se necessário):

- Se a válvula poppet for reinstalada, siga a ordem inversa da remoção, garantindo que todos os componentes sejam corretamente fixados e que a junta de vedação esteja posicionada corretamente para evitar vazamentos.

Notas Importantes:

- **Verifique a integridade das peças:** Certifique-se de que a válvula poppet e os componentes associados não apresentam danos. Substitua qualquer peça desgastada ou danificada.
- **Atenção ao anel fendido:** Ao remover o tubo de alimentação, evite soltar as metades do anel fendido, pois isso pode dificultar a remontagem.
- **Manutenção da segurança:** Sempre utilize os EPIs adequados, como luvas e óculos de proteção, durante o procedimento.

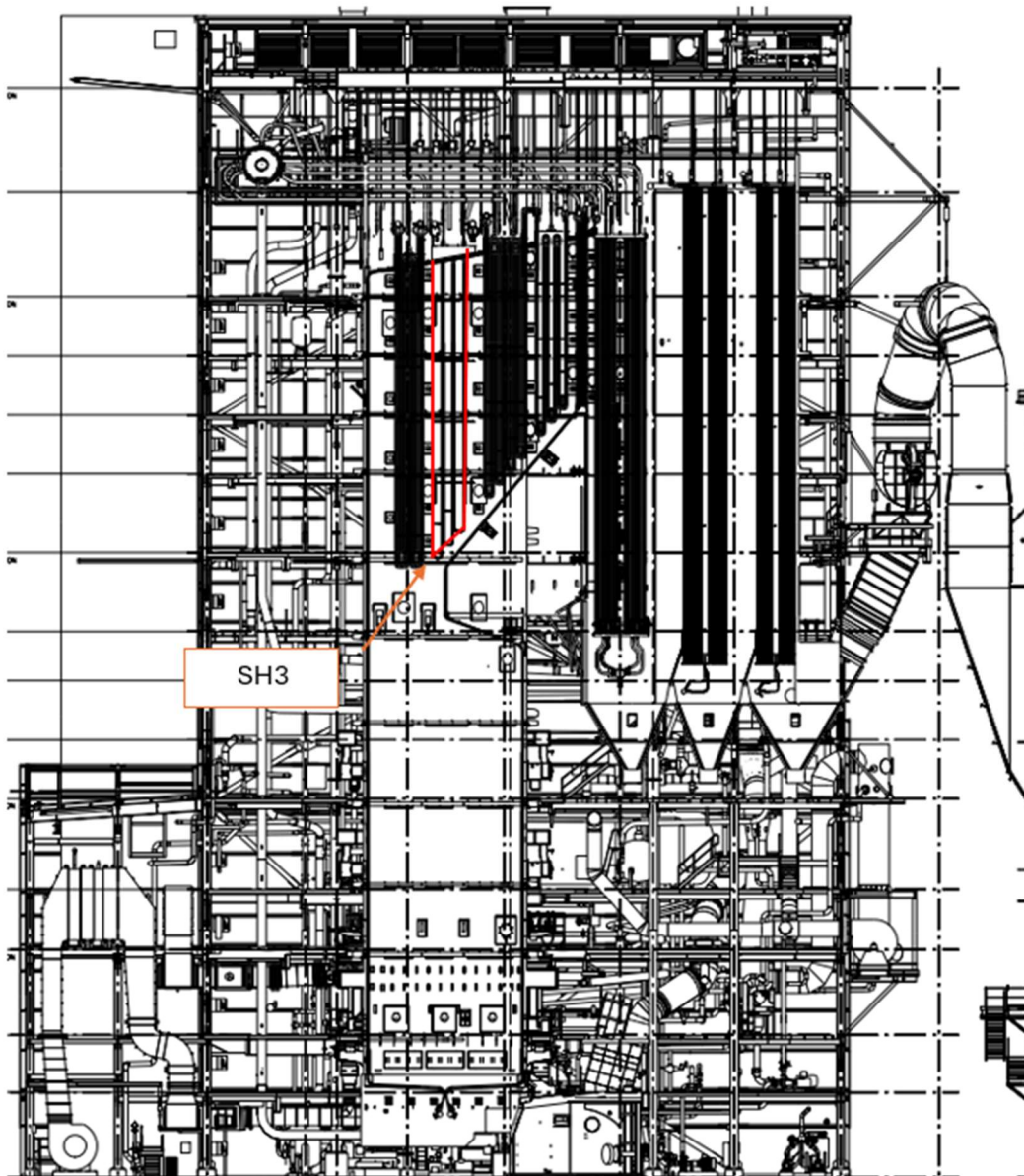
OBS: Este procedimento deve ser seguido rigorosamente para garantir a operação segura e eficiente do soprador de fuligem durante o processo de manutenção.

ANEXO E

Alguns dados da preparação da paragem da CR

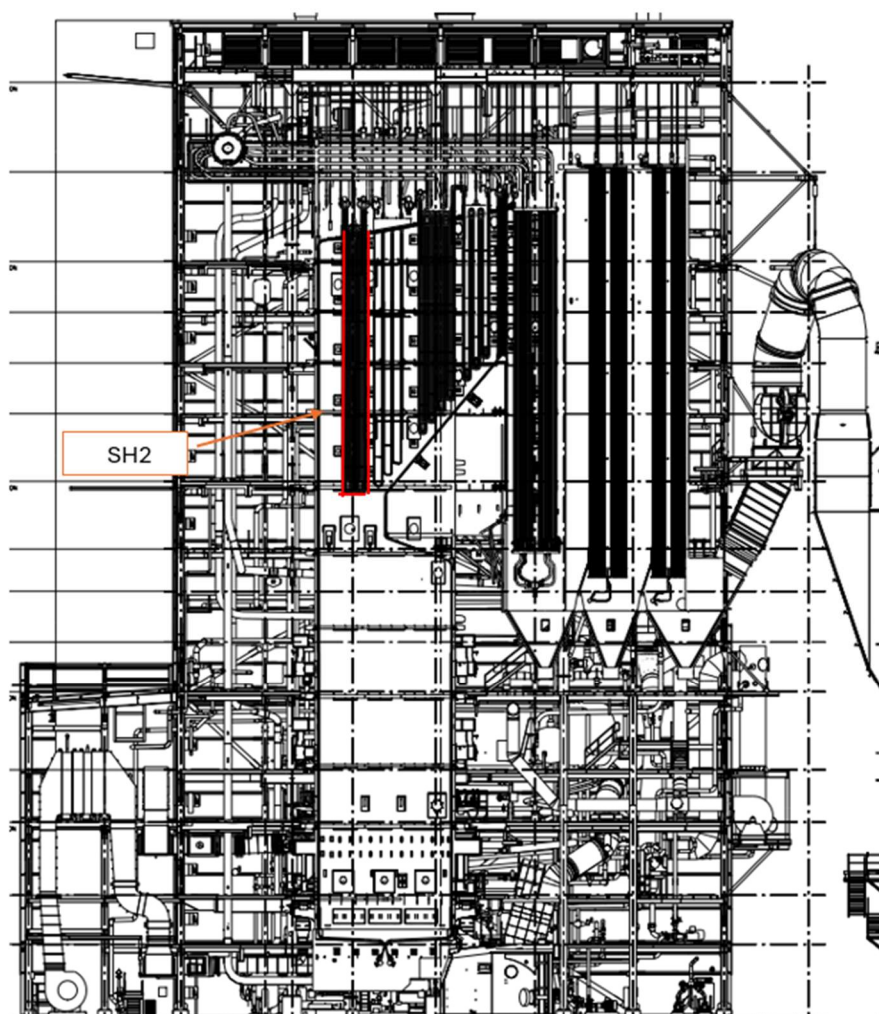
Equipamento/Área	Material a Substituir	Quantidade de Material	Tipo de Material
Tubos de Saída de Smelt	Material de enchimento para soldadura Sanicro 38	Conforme a necessidade durante a paragem da caldeira	Sanicro 38
Portas de Ar Primárias	Peças de reposição de rodder	Aproximadamente 20 peças casting de reposição	-----
	Peças sleeve de porta de ar para reposição, 58 APCs	58 APCs	
Portas de Ar Secundárias	Manga(sleeve) interna de porta de ar (grande e pequena)	5 grandes e 5 pequenas	Aço inox 304L, P265GH
	Placas pré-dobradas para mangas(sleeve) externas	Conforme necessidade	
Portas De Ar Terciários	Manga (sleeve) para reposição	5 unidades	Aço inox 304L, P265GH
Portas de Ar Quaternárias	Manga (sleeve) para reposição	5 unidades	Aço inox 304L, P265GH
Câmara de TV, Ar Secundário, Terciário e Quaternário	Material para o limpador de porta de ar, mangas(sleeves), APCs	50% de material para cada tipo de abertura.	-----
Abertura da Câmara de TV	Manga para abertura da câmara de TV no RSW	2 unidade e APCs	
Queimador de Arranque	Material para mangas (interna e externa), refratário, pontas de redemoinho (swirl).	Garanta redemoinhos e material de placa pré-dobrado para 6 queimadores.	-----
Sobreaquecedor Primário, Secundário e Terciário	Tubo com corrosão, abraçadeiras flexíveis	60 pares de abraçadeiras, tubo nº 9 do Painel #8	Aço carbono, aço inox (7CrMoVTiB10-10, ER309)
Economizador II	Cabeça de lança soprador de fuligem	Substitua a cabeça da lança SB #61-66	P265GH
Bicas de Smelt	Bicas de Smelt	3 bicas novas em stock	Sanicro 38/P265GH Composite
Aberturas do Soprador de Fuligem	Tubos de penetração na parede	10 tubos	Aço inox 304L, P265GH
Sobreaquecedor Secundário	Tubos T24 nus, tubos soldados de sobreposição (curvas)	60m de tubos T24 nus, tubos de sobreposição para curvas	Aço (7CrMoVTiB10-10, ER309)
Sobreaquecedor Terciário	Tubos T24 nus, tubos soldados de sobreposição (curvas)	Conforme necessidade, stock partilhado com o secundário	Aço (7CrMoVTiB10-10, ER309)
Tanque de Dissolução	Reparos do betão, placas para agitadores	Placas adicionais conforme necessidade	Aço inoxidável, Revestimento refratário

Algumas das análises preditivas feita na caldeira



Aplicação de Técnicas de Análise de Falhas para Reestruturação de Planos de Manutenção: Caso de Estudo numa Caldeira de Recuperação na Biotek

Tube No.	Tertiary SH S11/12				S21/22 T23			
	Espessura min	Ano	Taxa média anual de redução	Ano previsto espessura tr	Espessura min	Ano	Taxa média anual de redução	Ano previsto espessura tr
1								
2	5.5	2019	1%	✗ Fora da projeção1980	5.3	2022	0%	2052
3	5.5	2022	0%	2074	5.4	2022	0%	sem tendência
4								
5	5.5	2019	0%	2188	5.3	2019	0%	✗ Fora da projeção1896
6	5.7	2023	0%	2112	5.4	2019	0%	✗ Fora da projeção1970
7								
8	5.5	2019	0%	2188	5.5	2023	-1%	2062
9	5.7	2019	0%	✗ Fora da projeção1840	5.5	2019	0%	✗ Fora da projeção1999
10								
11	5.7	2019	0%	2082	5.7	2019	0%	sem tendência
12	5.5	2023	-1%	2057	5.7	2020	0%	2109
13								
14	5.2	2022	0%	2069	5.3	2019	1%	✗ Fora da projeção1990
15								
16	5.7	2022	-1%	2040	5.5	2023	0%	2102
17								
18	5.6	2019	0%	✗ Fora da projeção1855	5.5	2019	0%	✗ Fora da projeção1981
19	5.2	2022	0%	2170	5.4	2019	0%	✗ Fora da projeção1945
20								
21	5.8	2019	0%	sem tendência	5.5	2023	0%	2107
22	5.6	2019	0%	sem tendência	5.5	2019	0%	✗ Fora da projeção1938
23								
24	5.4	2022	0%	2178	5.6	2023	0%	2109
25	5.3	2019	1%	✗ Fora da projeção1972	5.0	2019	2%	✗ Fora da projeção2009
26								
27	5.6	2022	0%	2077	5.4	2022	0%	2048
28	5.6	2019	0%	✗ Fora da projeção1938	5.2	2020	0%	✗ Fora da projeção1984
29								



Vânio Guilherme Paulo Da Silva

Tube No.	Second SH S5/6 T13				Second SH S5/6 T14			
	Espeçura min	Ano	Taxa média anual de redução	Ano previsto espeçura t	Espeçura min	Ano	Taxa média anual de redução	Ano previsto espeçura t
1	5,6	2022	0%	sem tendência	5,6	2023	-1%	2028
2	5,3	2022	1%	✗ Fora da projeção 2018	5,4	2022	0%	✗ Fora da projeção 2014
3								
4	5,4	2022	0%	sem tendência	5,2	2022	0%	✗ Fora da projeção 2016
5								
6								
7	5,7	2022	0%	sem tendência	5,3	2022	1%	✗ Fora da projeção 2018
8	5,7	2022	0%	sem tendência	5,4	2022	1%	✗ Fora da projeção 2018
9								
10	5,3	2022	1%	✗ Fora da projeção 2018	5,3	2022	0%	sem tendência
11	5,3	2022	1%	✗ Fora da projeção 2018	5,4	2023	-1%	2027
12								
13	5,1	2022	1%	✗ Fora da projeção 2019	5,4	2022	2%	✗ Fora da projeção 2020
14								
15	5,3	2022	0%	sem tendência	5,4	2023	0%	2032
16	5,4	2023	-1%	2027	5,4	2022	0%	✗ Fora da projeção 2014
17	5,2	2022	1%	✗ Fora da projeção 2020	5,4	2023	0%	2032
18						2022		
19	5,5	2022	1%	✗ Fora da projeção 2017	5,3	2022	0%	sem tendência
20	5,2	2023	0%	2030	5,4	2022	1%	✗ Fora da projeção 2019
21								
22	5,4	2022	1%	✗ Fora da projeção 2018	5,2	2022	2%	✗ Fora da projeção 2020
23	5,3	2022	0%	✗ Fora da projeção 2015	5,5	2022	0%	sem tendência
24								
25								
26	5,4	2022	0%	sem tendência	5,0	2023	-1%	2025
27								
28	5,3	2022	0%	sem tendência	5,3	2023	0%	2031
29	5,6	2022	0%	✗ Fora da projeção 2012	5,4	2022	0%	sem tendência



**Instituto Superior
de Engenharia**

Politécnico de Coimbra